

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Πολυκριτηριακή Ανάλυση Ηλεκτρικής Διασύνδεσης Ευρώπης – Αφρικής



Εξεταστική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής Φώτιος Κανέλλος (Σχολή ΗΜΜΥ)

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης (Σχολή ΗΜΜΥ)

Δρ. Ελευθερία Σεργάκη (ΕΔΙΠ Σχολή ΗΜΜΥ)

Χανιά, Φεβρουάριος 2024

Γιώργος Βιριράκης: Πολυκριτηριακή Ανάλυση ηλεκτρικής διασύνδεσης Ευρώπης – Αφρικής.

Οι εκτιμήσεις και οι συγκρίσεις περιεχομένου εκφράζουν το συγγραφέα.

© Φεβρουάριος 2024 – All rights reserved

Ευχαριστίες

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Φώτιο Κανέλλο για την ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και την σημαντική του συνεισφορά στη διδασκαλία των ΣΗΕ και ειδικότερα του θέματος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος. Ευχαριστώ και τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταυρακάκη για την επίσης σημαντική του συνεισφορά στη μύησή μου στα σημαντικά για τους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς μαθημάτων Ενέργειας, καθώς και για το χρόνο του να συμμετέχει στην εξεταστική επιτροπή μου.

Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα την Δρ. κ. Ελευθερία Σεργάκη για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τη δημιουργική στήριξή τους στα χρόνια των σπουδών μου.

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, να ευχαριστήσω θερμά τις αδελφές μου και τους γονείς μου για τη συνεχή υποστήριξη που μου παρέχουν σε όλα τα στάδια της ζωής μου.

Abstract

The concept of energy security is admittedly interconnected to that of energy independence and is commonly perceived to have the characteristics of reliability and sufficiency. Electricity interconnections and grids can serve certain geo-political interests in numerous ways. Political entities can take advantage of the power demands to establish asymmetrical dependencies and therefore market dominance, legal-regulatory dominance, even technical and economic dominance; they can exploit them to pursue mercantilist goals. Cross-border transmission lines linking electric grids of different standards, establish new channels for projecting geopolitical influence and new spheres of influence. As they extend beyond state borders and across legal jurisdictions, they enable a diffusion of geo-political power which actually affects the energy security domain in a planetary scale.

The purpose of this thesis is the development of a cross-border route selection methodology that examines the project risks that reflect the geopolitical characteristics of the transit regions that influence the energy safety and its potential environmental impact. Defines the alternative routes, selects the weights of criteria that affect the interconnection design and compares the routes, considering the data of the geopolitical indicators of the regions involved, as well as the experience and the knowledge of the decision maker. Also, the consistency and sensitivity of the results are examined. The proposed methodology is applied in the real case of the transcontinental routing of electric power, between East- North Africa and East Europe, using the island of Crete as an energy hub for power transmission. Our analysis incorporates elements of AHP (Analytic Hierarchy Process). As a result, different scenarios of criteria weights are used and discussed. The use of the AHP modeling software from SpiceLogic allowed the quick application of the proposed methodology and scenarios, thus facilitating a quick and effective examination of the consequences of different route choices.

Keywords: Multi-criteria Analysis, Analytic Hierarchical Process, Cross-border transmission lines, Geopolitical criteria, Optimal Path Selection, Geopolitical Indices.

Περίληψη

Η έννοια της ενεργειακής ασφάλειας είναι ομολογουμένως διασυνδεδεμένη με αυτήν της ενεργειακής ανεξαρτησίας και συνήθως θεωρείται ότι έχει τα χαρακτηριστικά της αξιοπιστίας και της επάρκειας. Οι διασυνδέσεις και τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να εξυπηρετήσουν ορισμένα γεωπολιτικά συμφέροντα με διάφορους τρόπους. Οι πολιτικές οντότητες μπορούν να επωφεληθούν από τις απαιτήσεις ισχύος για να δημιουργήσουν ασύμμετρες εξαρτήσεις και επομένως κυριαρχία στην αγορά, νομική-ρυθμιστική κυριαρχία, ακόμη και τεχνική και οικονομική κυριαρχία. Διασυνδεδεμένες γραμμές μεταφοράς που συνδέουν ηλεκτρικά δίκτυα διαφορετικών προδιαγραφών, δημιουργούν νέα κανάλια προβολής γεωπολιτικής επιρροής και νέες σφαίρες επιρροής. Καθώς εκτείνονται πέρα από τα κρατικά σύνορα και υπόκεινται στις νομικές δικαιοδοσίες διαφορετικών κρατών, επιτρέπουν τη διάχυση της γεωπολιτικής ισχύος που επηρεάζει ουσιαστικά τον τομέα της ενεργειακής ασφάλειας σε πλανητική κλίμακα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας επιλογής διασυνδεδεμένης διαδρομής που εξετάζει τους κινδύνους έργου διηπειρωτικής διασύνδεσης ηλεκτρικών δικτύων. Κινδύνους που σχετίζονται με τα γεωπολιτικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν το έργο ως προς την ενεργειακή ασφάλεια και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του τόσο στις περιοχές διέλευσης όσο και σε διεθνές επίπεδο. Καθορίζει τις εναλλακτικές διαδρομές, επιλέγει τα βάρη των κριτηρίων που επηρεάζουν το σχεδιασμό της διασύνδεσης και συγκρίνει τις διαδρομές, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των γεωπολιτικών δεικτών των εμπλεκόμενων περιοχών, καθώς και την εμπειρία και τις γνώσεις της ομάδας που είναι υπεύθυνη για τη λήψη αποφάσεων. Επίσης, εξετάζεται η συνέπεια και η ευαισθησία των αποτελεσμάτων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στην πραγματική περίπτωση μιας διηπειρωτικής διασύνδεσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ Ανατολικής-Βόρειας Αφρικής και Νότια-Ανατολικής Ευρώπης, χρησιμοποιώντας το νησί της Κρήτης ως ενεργειακό κόμβο για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυσή μας ενσωματώνει στοιχεία AHP (Analytic Hierarchy Process). Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται και συζητούνται διαφορετικά σενάρια βαρύτητας κριτηρίων. Η χρήση του λογισμικού μοντελοποίησης AHP της SpiceLogic μας επέτρεψε να εφαρμόσουμε γρήγορα την προτεινόμενη μεθοδολογία και τα σενάρια, διευκολύνοντας έτσι μια γρήγορη και αποτελεσματική εξέταση των συνεπειών των διαφορετικών επιλογών διαδρομής.

Λέξεις Κλειδιά: Πολυκριτηριακή Ανάλυση, Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης, Ηλεκτρική Διασύνδεση, Εύρεση Βέλτιστης Όδευσης, Γεωπολιτικοί Δείκτες.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iv
Abstract.....	vi
Περίληψη.....	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εικόνων	xi
Ακρωνύμια	xii
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 - Ενεργειακή πολιτική και ασφάλεια στην ΕΕ	1
1.2 - Γεωπολιτική διάσταση των διασυνοριακών διασυνδέσεων δικτύων ηλεκτρικής ισχύος ¹	
1.3 - Αντικείμενο διπλωματικής.....	2
1.4 – Εννοιολογικό και επιστημολογικό πλαίσιο της Συστημικής Γεωπολιτικής Ανάλυσης ³	
1.4.1 – Ορολογία γεωπολιτικών εννοιών	3
1.4.2 – Γεωπολιτικοί πυλώνες και οι δείκτες κινδύνων των κρατών	3
1.4.3 - Πηγές δεδομένων βαθμολογίας δεικτών κινδύνων κρατών.....	5
1.5 – Ορισμός Exclusive Economic Zone (EEZ).....	6
1.6 - Δομή Κεφαλαίων.....	7
Κεφάλαιο 2 – Ηλεκτρική διασύνδεση χωρών.....	10
2.1 - Ιδιαιτερότητα ηλεκτρικής διασύνδεσης.....	10
2.2 - Τρόποι ηλεκτρικής διασύνδεσης μεταξύ χωρών	10
2.3 Παραδείγματα ηλεκτρικής διασύνδεσης μεταξύ χωρών στη Μεσόγειο	13
2.3.1 - GREGY Interconnector	13
2.3.2 - Διασύνδεση Κρήτης – Χερσαίας Ελλάδας.....	14
Κεφάλαιο 3 – Πολυκριτηριακή ανάλυση (ΠΑ) - Μέθοδος AHP	16
3.1 - Γενικά	16
3.2 - Θεωρητικό υπόβαθρο ΠΑ.....	16
3.3 - Μεθοδολογικό πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων στην Πολυκριτήρια Ανάλυση (ΠΑ) ..	18
3.4 - Επισκόπηση των μεθόδων Πολυκριτήριων Αποφάσεων (ΠΑ)	20
3.5 - Γιατί επιλέγουμε την διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης στην αξιολόγηση διαδρόμων όδευσης ηλεκτρικής ισχύος.....	24
3.6 – Επεξήγηση AHP	25

3.6.1 - Αποδόμηση προβλήματος – Καθορισμός Ιεραρχίας.....	27
3.6.2 - Εκτίμηση των σχετικών βαρών (προτεραιότητα) από την ομάδα απόφασης.....	28
3.6.3 - Συνδυασμός των επιμέρους σχετικών βαρών των κριτηρίων, ώστε να γίνει αξιολόγηση των εναλλακτικών ενεργειών.....	30
3.6.4 - Έλεγχος Συνέπειας.....	30
Κεφάλαιο 4 – Υλοποίηση περίπτωσης μελέτης.....	36
4.1 – Μεθοδολογία έρευνας.....	36
4.2 – Γεωπολιτική ανάλυση της περίπτωσης μελέτης.....	37
4.2.1 – Σενάρια όδευσης ηλεκτρικής ισχύος.....	38
4.2.2 – Καθορισμός κριτηρίων και υπό-κριτηρίων.....	41
4.3 - Καθορισμός προτιμήσεων και υπολογισμός συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων	43
4.3.1 - Καθορισμός προτιμήσεων	43
4.3.2 Υπολογισμός συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων και υπό-κριτηρίων.....	46
4.3.3 Έλεγχος συνέπειας συγκρίσεων κριτηρίων	47
4.4 – Συλλογή δεδομένων δεικτών κινδύνου των κρατών όδευσης	48
4.5 – Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων	53
4.6 - Υπολογισμός ολικών προτεραιοτήτων - ταξινόμηση εναλλακτικών	60
4.7 - Έλεγχος ευαισθησίας	61
4.8 – Η Κρήτη ως ενεργειακός κόμβος μεταφοράς ισχύος στην Ευρώπη.....	62
Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα & Συμπεράσματα	63
5.1 – Σύνοψη	63
5.2 – Περιορισμοί και βελτιώσεις και μελλοντικές μελέτες.....	64
Κεφάλαιο 6 – Βιβλιογραφία	65

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Κατηγορίες προβληματικής ΠΑ (Roy, 1985).....	19
Πίνακας 2. Χαρακτηριστική προβλήματος παρούσας μελέτης	24
Πίνακας 3. Βασικές ιδιότητες μεθόδου AHP	25
Πίνακας 4. Μεθοδολογία της μεθόδου AHP	25
Πίνακας 5. Κυριότερα πλεονεκτήματα μεθόδου AHP	26
Πίνακας 6. Στάδια Υλοποίησης AHP	26
Πίνακας 7. Κλίμακα σύγκρισης κατά ζεύγη που παρουσιάζεται από τον Saaty	28
Πίνακας 8. Πίνακας σύγκρισης κατά ζεύγη, Pairwise Comparison Matrix (PCM)	29
Πίνακας 9. Μέγεθος του πίνακα σε σχέση με τιμές του τυχαίου δείκτη συνέπειας RCI. Όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται.....	34
Πίνακας 10. Μέγεθος του Πίνακα σε σχέση με τιμές αποδοχής συνέπειας με τη μέθοδο των Alonso και Lamata, 2006. Όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται	35
Πίνακας 11: Σύνθετα κριτήρια και πρωτογενείς μεταβλητές προβλήματος.....	42
Πίνακας 12: Πίνακας συγκρίσεων σε επίπεδο κύριων κριτηρίων	46
Πίνακας 13. Πίνακας συγκρίσεων σε επίπεδο υπό-κριτηρίων	46
Πίνακας 14 Παγκόσμιοι δείκτες κρατών.	49
Πίνακας 15. Δείκτες ρυθμιστικών πρωτόκολλων κρατών.	51
Πίνακας 16: Οικονομικοί δείκτες κρατών.	51
Πίνακας 17. Θεσμικοί δείκτες κρατών.....	52
Πίνακας 18. Κάλυψη προστατευόμενης περιοχής, πυκνότητα κατοίκησης και αστικοποίηση των κρατών.	53
Πίνακας 19. Εκτίμηση δείκτη ολόκληρης της όδευσης από την τιμή του κράτους με την χειρότερη τιμή.	53
Πίνακας 20. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C1α	55
Πίνακας 21. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C1β	55
Πίνακας 22. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C1γ	56
Πίνακας 23. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C2α	56
Πίνακας 24. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C2β	56
Πίνακας 25. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C2γ	57
Πίνακας 26. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C3α	57
Πίνακας 27. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C3β	58
Πίνακας 28. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C3γ	58
Πίνακας 29. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C4α	59
Πίνακας 30. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C4β	59
Πίνακας 31. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C4γ	59
Πίνακας 32. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C5α	59
Πίνακας 33. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C5β	60
Πίνακας 34. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C5γ	60
Πίνακας 35: Αποτελέσματα μεθόδου AHP: Τελικές προτεραιότητες σεναρίων όδευσης	61

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Οριοθετήσεις κατόπιν συμφωνιών και διεκδικήσεις Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) στην Ανατολική Μεσόγειο.....	7
Εικόνα 2. Μεταφορά ενέργειας με εναέρια γραμμή ισχύος.....	13
Εικόνα 3. Υποβρύχιο καλώδιο μεταφοράς ισχύος (underwater power cable).	13
Εικόνα 4. GREGY Interconnector. Ηλεκτρική διασύνδεση Ελλάδας – Αιγύπτου.....	14
Εικόνα 5. Ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης – Χερσαίας Ελλάδας.....	15
Εικόνα 6. Προσέγγιση συστήματος αξιών, Value System approach.	21
Εικόνα 7. Πολυκριτηριακή ιεράρχηση επιλογών.....	22
Εικόνα 8. Αναλυτική συνθετική προσέγγιση.....	23
Εικόνα 9. Πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός.....	24
Εικόνα 10. Δομή ΑHP Ιεραρχίας.....	27
Εικόνα 11. Διάγραμμα μεθοδολογίας υλοποίησης της εργασίας.....	36
Εικόνα 12. GAP Interconnector.....	39
Εικόνα 13. LEG1 Interconnector.....	40
Εικόνα 14. EuroAsia Interconnector.....	41
Εικόνα 15. Ισχυρισμοί χωρών για όρια ΕΕΖ. (Μπλε: Ελλάδα – Κύπρος, Κόκκινο - Τουρκία).	57
Εικόνα 16. Αποτελέσματα μεθόδου ΑΗΠ: Ανάλυση ευαισθησίας της βέλτιστης λύσης.....	62
Εικόνα 17. Σενάριο πιθανής διασύνδεσης βέλτιστου μονοπατιού από Αίγυπτο σε Κρήτη.....	62

Ακρωνύμια

PCI	Projects of Common Interest
AHP	Analytic Hierarchy Process
ΑΗΠ	Ελληνικά για ΑΗΠ
HVDC	High Voltage Direct Current
HVAC	High Voltage Alternating Current
AC	Alternating Current
VSC	Voltage Source Converter
AHP	Analytic Hierarchy Process
ΠΑ	Πολυκριτηριακή Ανάλυση
GAP	Greece – Africa Power Interconnector
LEG1	Libya – Egypt - Greece Interconnector
GREGY	Greece - Egypt Interconnector
bcm	billion cubic meters
CO₂	Διοξείδιο του άνθρακα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
kV	Kilo Volt
MVA	Mega Volt-Ampere
MW	Mega Watt
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
PCM	Pairwise Comparison Matrix
CI	Consistency Index
CR	Consistency Ratio
ROI	Return On Investment
ΔΣΜ	Διεύθυνση Συστημάτων Μεταφοράς
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 - Ενεργειακή πολιτική και ασφάλεια στην ΕΕ

Η ενεργειακή πολιτική αποτελεί κοινή αρμοδιότητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) και των κρατών μελών της. Ενώ η ΕΕ είναι αρμόδια, βάσει των Συνθηκών, για την εξασφάλιση της ασφάλειας του εφοδιασμού, τα κράτη μέλη είναι αρμόδια για τον καθορισμό της διάρθρωσης του ενεργειακού τους εφοδιασμού και την επιλογή των ενεργειακών τους πηγών.

Μέχρι τώρα η τρέχουσα νομοθεσία της ΕΕ για την ασφάλεια του εφοδιασμού επικεντρώνεται στις αγορές αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας με άλλους στόχους: (i) την ολοκλήρωση της ενιαίας αγοράς ενέργειας, (ii) τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, (iii) την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την απαλλαγή της οικονομίας από τις ανθρακούχες εκπομπές.

Είναι γεγονός ότι οι αλλαγές στην εξωτερική πολιτική, οι ανταγωνισμοί, οι γεωπολιτικές συμμαχίες επηρεάζουν ισχυρά την ενεργειακή ασφάλεια. Μετά την ανακήρυξη του πολέμου Ρωσίας – Ουκρανίας, κλονίζεται η ενεργειακή ασφάλεια της ΕΕ και διερευνάται εντονότερα η ενεργειακή της διαφοροποίηση από τη Ρωσία.

Ένας τρόπος να διασφαλίσει η ΕΕ την ενεργειακή της ασφάλεια είναι να αναπτύξει τη δική της εξωτερική πολιτική στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας με νέα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και να διαμορφώσει/υλοποιήσει διηπειρωτικές διασυνδέσεις ηλεκτρικών δικτύων. Ένας τρόπος επίτευξης διασυνδεσιμότητας είναι κυρίως η κατασκευή νέων έργων κοινού ενδιαφέροντος (PCI) για τη διασύνδεση διαφορετικών δικτύων ηλεκτρικής ισχύος.

1.2 - Γεωπολιτική διάσταση των διασυνοριακών διασυνδέσεων δικτύων ηλεκτρικής ισχύος

Οι διασυνοριακές γραμμές διασύνδεσης ηλεκτρικής ισχύος συνδέουν διαφορετικά ηλεκτρικά δίκτυα και δημιουργούν νέα κανάλια προβολής γεωπολιτικής επιρροής και νέων σφαιρών επιρροής. Επειδή εκτείνονται πέρα από τα κρατικά σύνορα υπόκεινται στις πολιτικές και νομικές δικαιοδοσίες/δίκαιο διαφορετικών κρατών, επιτρέποντας τη διάχυση της γεωπολιτικής ισχύος. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα οι κύριοι παράγοντες που χαρακτηρίζουν τη διασύνδεση και τον συγχρονισμό των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας να μπορούν να αναλυθούν υπό το πρίσμα των συνεπειών τους στους ακόλουθους τομείς: (i) τεχνικό-λειτουργικούς, (ii) κοινωνικό-οικονομικούς, (iii) κλίμα και περιβαλλοντικούς και (iv) γεωπολιτικούς.

1.3 - Αντικείμενο διπλωματικής

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο ορισμός και η ανάλυση του προβλήματος διασυνοριακής διασύνδεσης δικτύων ηλεκτρικής ισχύος με περίπτωση μελέτης την διασύνδεση της ΕΕ με τη βόρεια-ανατολική Αφρική με κόμβο την Κρήτη.

Η ανάλυσή μας βασίζεται σε γεωπολιτικά κριτήρια και τους γεωπολιτικούς δείκτες των κρατών από τα οποία διέρχεται η διασύνδεση και την εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Η ανάλυση γίνεται υπό το πρίσμα των ακόλουθων θεωρητικών και εννοιολογικών παραδοχών:

- Οι υποδομές δικτύου μπορούν να επεκτείνουν τις τεχνοπολιτικές σφαίρες επιρροής και να χρησιμοποιηθούν ως μέσο προβολής πολιτικής ισχύος και εξουσίας πέρα από τον εδαφικό χώρο.
- Οποιαδήποτε υποδομή δικτύου εξακολουθεί να συνεπάγεται μια κυριολεκτική γεωγραφική διάσταση.
- Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποδομές ζωτικής σημασίας για κάθε οικονομία και κοινωνία.
- Η υποδομή ξεπερνά τις χωρικές και χρονικές αποστάσεις και επιτρέπει την αμφίπλευρη ανταλλαγή.

1.4 – Εννοιολογικό και επιστημολογικό πλαίσιο της Συστημικής Γεωπολιτικής Ανάλυσης

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στη «Συστημική Γεωπολιτική Ανάλυση» που προτάθηκε αρχικά από τον καθηγητή κ. Ιωάννη Μάζη το 1976, ο οποίος όρισε την έννοια της γεωπολιτικής εν συντομία ως εξής:

«Γεωπολιτική είναι «η γεωγραφική αναλυτική μέθοδος που μελετά προβλέπει και περιγράφει την ανακατανομή της ισχύος στον πλανήτη».

«Η Γεωπολιτική ανάλυση ενός γεωγραφικού Συστήματος, που χαρακτηρίζεται από μια ανομοιόμορφη κατανομή της ισχύος, είναι μια γεωγραφική μέθοδος που μελετά, περιγράφει και προβλέπει τις τάσεις και τα αποτελέσματα μεταξύ των σχέσεων διαφόρων πολιτικών πρακτικών από την ανακατανομή της ισχύος, μέσα σε ένα ευρύτερο πλαίσιο με γεωγραφικές δυσκολίες όπου και εφαρμόζονται οι πρακτικές αυτές.» (Μάζης, 2018).

1.4.1 – Ορολογία γεωπολιτικών εννοιών

Μια γεωπολιτική ανάλυση ορίζει τα δεδομένα και τα ζητούμενα του εκάστοτε υπό εξέταση προβλήματος χρησιμοποιώντας την ορολογία, γεωπολιτικό υπερσύστημα, γεωπολιτικό υποσύστημα, γεωπολιτικούς παράγοντας. Αυτά ορίζονται ως εξής:

- **Γεωπολιτικό Υπερσύστημα** είναι το Γεωγραφικό Σύμπλοκο το οποίο και αποτελεί το γεωγραφικό πεδίο που αφορά την ανάλυση.
- **Γεωπολιτικό Υποσύστημα** είναι ο προς μελέτη χώρος (εσωτερικός ή εξωτερικός) του Συμπλόκου ο οποίος μας ενδιαφέρει ως πεδίο κατανομής ή ανακατανομής ισχύος λόγω της δράσεως ενός συγκεκριμένου γεωπολιτικού παράγοντα.
- **Γεωπολιτικός παράγοντας** είναι το έργο/πράξη που η συμπεριφορά του δύναται να επηρεάσει την κατανομή ισχύος στο εσωτερικό ή και στο εξωτερικό του δεδομένου Γεωγραφικού Συμπλόκου.

1.4.2 – Γεωπολιτικοί πυλώνες και οι δείκτες κινδύνων των κρατών

Ο εκάστοτε γεωπολιτικός παράγοντας δύναται να επηρεάσει διαφορετικούς **γεωπολιτικούς πυλώνες**, οι οποίοι ομαδοποιούνται στους παρακάτω τομείς:

1. Πολιτική Διεθνοπολιτική κατάσταση κράτους.
2. Άμυνα και Ασφάλεια κράτους.
3. Οικονομία και Ανάπτυξη κράτους.
4. Εμπορικότητα Έργου/Ενέργεια – Βιομηχανία κράτους.
5. Πολιτισμός – Κοινωνία – Εκπαίδευση κράτους.
6. Γεω-Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί.

Για να συγκριθούν μεταξύ τους τα διαφορετικά κράτη ως προς τους κινδύνους που παρουσιάζουν στους διαφορετικούς γεωπολιτικούς πυλώνες χρησιμοποιούνται οι δείκτες κινδύνου κράτους (country risk) που μετρούνται με διαφορετικές μεθόδους

από πολλές διαφορετικές πηγές. Έχουν οριστεί απλοί δείκτες κινδύνου για την κάθε συνιστώσα κινδύνου ενός κράτους, καθώς και σύνθετοι δείκτες κινδύνου για την ευκολότερη σύγκριση. Οι σύνθετοι δείκτες κινδύνου ενσωματώνουν επί μέρους απλούς δείκτες κινδύνων.

Σε κάθε γεωπολιτική ανάλυση, οι γεωπολιτικοί πυλώνες και οι αντίστοιχοι γεωπολιτικοί τους δείκτες, επιλέγονται από την ομάδα ανάλυσης.

Οι δείκτες υφιστάμενων ή δυνητικών κινδύνων ανά γεωπολιτικό πυλώνα ομαδοποιούνται στην παρακάτω λίστα:

1. Πολιτική και Διεθνοπολιτική Κατάσταση:
 - Πολιτική Σταθερότητα.
 - Αξιοπιστία και Εκσυγχρονισμός Θεσμών-Δικαιοσύνης.
 - Σταθερότητα Διεθνών σχέσεων.
 - Επιρροές Διεθνών Οργανισμών και Δράσεων (π.χ. ΟΗΕ, ΕΕ, Οργανισμός Ισλαμικής Διάσκεψης, Islamic Development Bank, BRI, κλπ.).
2. Οικονομία και Ανάπτυξη:
 - Ρυθμός Οικονομικής Μεγέθυνσης (ΑΕΠ).
 - Νομισματική Σταθερότητα – Πληθωρισμός.
 - Ελκυστικότητα Φορολογίας (για μακροπρόθεσμες ενεργειακές επενδύσεις).
 - Σταθερότητα χρηματοπιστωτικού/τραπεζικού συστήματος .
 - Καταλληλότητα Υποδομών (λιμάνια, δρόμοι, αεροδρόμια, σιδηροδρομικό δίκτυο, κλπ.).
3. Ενέργεια – Βιομηχανία:
 - Σχέσεις με Προμηθευτές ενεργειακών πόρων (ΦΑ, πετρέλαιο, κλπ.)
 - Δείκτης Βιομηχανικής Ανάπτυξης
 - Στρατηγική εκμετάλλευσης εγχώριων Ενεργειακών Πόρων
 - Επίπεδο Ασφάλειας Ενεργειακού Εφοδιασμού, καταλληλότητα υποδομών
4. Άμυνα και Ασφάλεια:
 - Γεωστρατηγικές εμπλοκές/συγκρούσεις (σε εξέλιξη - διαφαινόμενες).
 - Διεκδικήσεις εδαφών, ή θαλασσίων εκτάσεων, από/έναντι γειτονικών χωρών.
 - Επίπεδο Επιχειρησιακής Ετοιμότητας ΕΔ (προσωπικό και οπτικά συστήματα).
 - Ασύμμετρες/Υβριδικές ενέργειες από/προς γειτονικές χώρες.
 - Ένταση Μεταναστευτικών ροών από/προς γειτονικές χώρες.
 - Τρομοκρατικές Ενέργειες.
5. Πολιτισμός – Κοινωνία – Εκπαίδευση:
 - Διεκδικήσεις Εθνοτικών ομάδων/μειονοτήτων (εντός της χώρας).
 - Θρησκευτικές/Πολιτιστικές/Εθνοτικές αντιπαραθέσεις.
 - Απασχόληση και Ανεργία.
 - Επίπεδο Εκπαίδευσης και Επιστημονικής/Τεχνολογικής Έρευνας.

- Δημόσια υγεία/ασφάλεια.

6. Γεω-Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί:

- Περιορισμοί στη Χρήση/Εκμετάλλευση γης.
- Νομοθετικές Απαγορεύσεις διέλευσης έργων από Προστατευόμενες ή Περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές (π.χ. Natura-2000).
- Περιορισμοί διέλευσης έργων από Θαλάσσιες ζώνες λόγω αμφισβήτησης κυριαρχικών δικαιωμάτων.
- Περιορισμοί διέλευσης-γειτνίασης έργων από Οικοσυστήματα λόγω αμφισβήτησης κυριαρχικών δικαιωμάτων.

1.4.3 - Πηγές δεδομένων βαθμολογίας δεικτών κινδύνων κρατών

Η **World Risk Review** της Marsh Specialty, παρέχει αξιολογήσεις κινδύνου για 197 χώρες σε δείκτες που σχετίζονται με την ασφάλεια, τις συναλλαγές και τις επενδύσεις.

- Κίνδυνος πολέμου και εμφυλίου πολέμου (War and civil war risk)
- Κίνδυνος τρομοκρατίας (Terrorism risk).
- Απεργίες, ταραχές και κίνδυνοι εμφύλιων ταραχών (Strikes, riots, and civil commotion risks).
- Νομικός και ρυθμιστικός κίνδυνος (Legal and regulatory risk).
- Κίνδυνος απόρριψης συμβατικής συμφωνίας (Contractual agreement repudiation risk).
- Οικονομικός κίνδυνος χώρας (Country economic risk).
- Αδυναμία μετατροπής συναλλάγματος και κίνδυνος μεταφοράς (Currency inconvertibility and transfer risk).
- Δημόσιος πιστωτικός κίνδυνος (Sovereign credit risk).
- Κίνδυνος απαλλοτρώσεως (Expropriation risk).

Οι αξιολογήσεις ενημερώνονται μηνιαίως σε μια κλίμακα από 0,1 έως 10, όπου το 10 να εκφράζει τον υψηλότερο κίνδυνο.

Η **World Bank** είναι μια βάση δεδομένων δεικτών κινδύνου που συλλέγει από διαφορετικούς φορείς και υπολογίζει τους ακόλουθους δείκτες για 215 χώρες:

- Μέτρηση της διαφθοράς.
- Αποτελεσματικότητα κυβέρνησης.
- Πολιτική σταθερότητα.
- Ρυθμιστική ποιότητα.
- Κράτος δικαίου.
- Ελευθερία λόγου.

Οι αξιολογήσεις βαθμολογούνται με κλιμάκωση γύρω από το μηδέν, με αρνητικούς αριθμούς για να εκφράσουν μεγαλύτερο κίνδυνο και θετικούς αριθμούς για σχετικά μικρότερο κίνδυνο.

Η **Economist** ανέπτυξε τη δική της παραλλαγή βαθμολογίας κινδύνου κράτους με κριτήρια:

- Συναλλαγματικό κίνδυνο.
- Κίνδυνο κρατικού χρέους.
- Τραπεζικό κίνδυνο.

Η **Political Risk Services (PRS)** βαθμολογεί τους κινδύνους για περισσότερα από 200 κράτη. Τα δεδομένα διατίθενται μόνο σε μέλη της επί πληρωμή. Η PRS χρησιμοποιεί είκοσι δύο μεταβλητές για τη μέτρηση τριών συνιστωσών κινδύνου:

- Πολιτική.
- Χρηματοπιστωτική.
- Οικονομική.

Οι βαθμολογίες κυμαίνονται από μηδέν έως εκατό, με υψηλές βαθμολογίες 80 έως 100 να υποδηλώνουν χαμηλό κίνδυνο και τις χαμηλές βαθμολογίες για υψηλό κίνδυνο. Επιπλέον παρέχει και μια σύνθετη βαθμολογία για το κάθε κράτος.

1.5 – Ορισμός Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ)

Ένα παράκτιο κράτος κατέχει τα κυριαρχικά δικαιώματα του βυθού και του υπεδάφους της υφαλοκρηπίδας του, επιτρέποντάς του έτσι την εκμετάλλευση φυσικών πόρων, όπως εξερεύνηση και εξόρυξη υδρογονανθράκων.

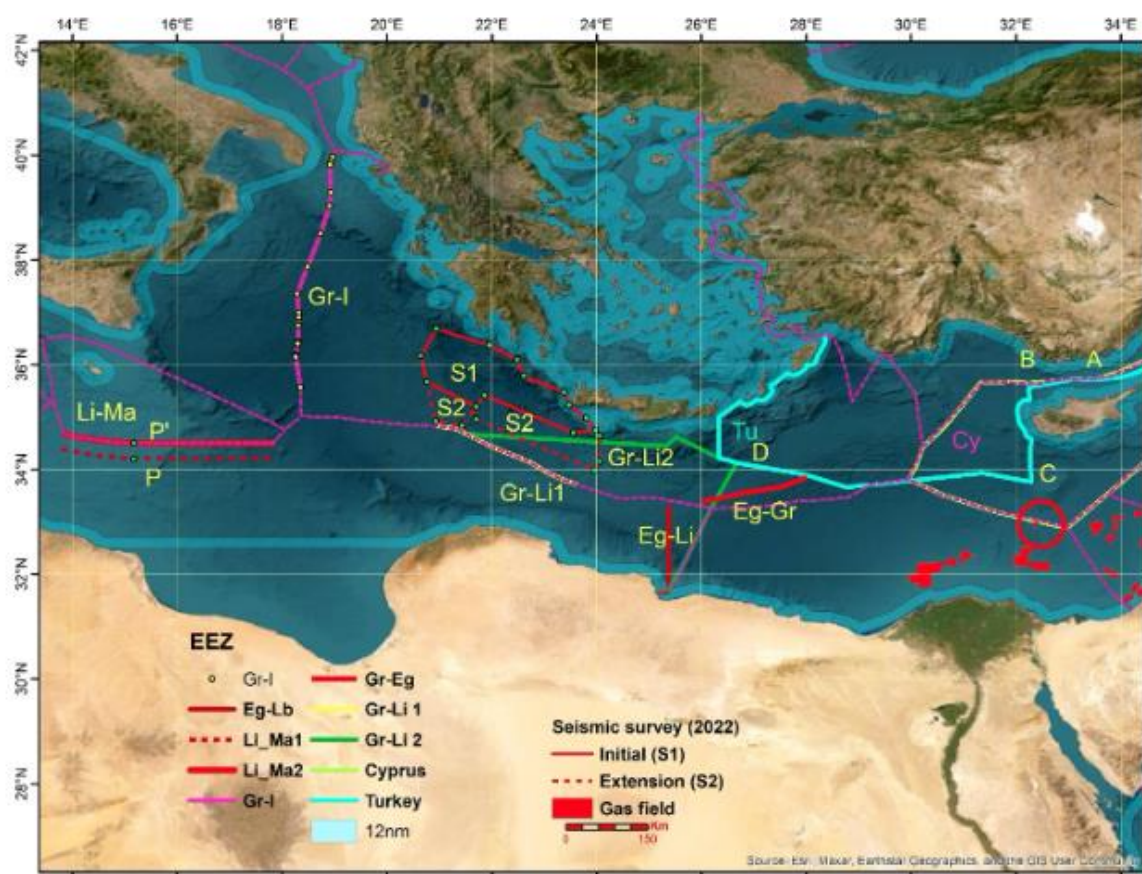
Σύμφωνα με τη Διεθνή Συνθήκη του ΟΗΕ περί Δικαίου της Θάλασσας (1982), η Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ) θεωρείται η θαλάσσια έκταση εντός της οποίας ένα κράτος έχει δικαίωμα έρευνας ή άλλης εκμετάλλευσης των θαλασσίων πόρων, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας από το νερό και τον άνεμο.

Η υφαλοκρηπίδα υπάρχει αυτομάτως και δεν χρειάζεται να ανακηρυχθεί, πρέπει όμως να οροθετηθεί ανάμεσα σε γειτονικά κράτη και, αν υπάρχει διαφωνία, να παραπεμφθεί με κοινό συμφωνητικό στο Διεθνές Δικαστήριο. Ο βασικός κανόνας οριοθέτησης της υφαλοκρηπίδας και της ΑΟΖ ανάμεσα σε γειτονικά κράτη είναι η αρχή της μέσης γραμμής. Συμπληρωματικά κριτήρια αποτελούν, πρώτον, η αρχή της ευθυδικίας όταν συντρέχουν ειδικές περιστάσεις και, δεύτερον, η αρχή της αναλογικότητας για την αποφυγή ακραίων και δυσανάλογων ρυθμίσεων, επειδή η τελευταία λαμβάνει υπ' όψη το μέγεθος των εκατέρωθεν ακτών καθώς και τη γεωγραφική διαμόρφωση.

Ορισμός της ΑΟΖ (Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη):

Η ΑΟΖ εκτείνεται στα 200 ναυτικά μίλια από την ακτογραμμή πέραν των χωρικών υδάτων μιας χώρας. Αποτελεί απλό κυριαρχικό δικαίωμα που αναφέρεται στη δικαιοδοσία του παράκτιου κράτους μέχρι και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, δηλαδή τον βυθό και το υπέδαφος. Η επιφάνεια θεωρείται διεθνή ύδατα. Η υφαλοκρηπίδα, σύμφωνα με τη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της

Θάλασσας του 1982, ορίζεται ως ο βυθός της θάλασσας εντός ακτίνας 200 ναυτικών μιλίων από την ακτή (ανεξάρτητα από τη γεωλογική μορφή του βυθού). Σύμφωνα με τη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας του 1982, ως υφαλοκρηπίδα ορίζεται κατά βάση ο βυθός της θάλασσας εντός ακτίνας 200 ναυτικών μιλίων από την ακτή. Αυτό ισχύει ανεξάρτητα από τη γεωλογική μορφή του βυθού. Σε περίπτωση που το υφαλοπλαίσιο εκτείνεται και πέρα των 200 μιλίων από την ακτή, τότε η υφαλοκρηπίδα κατά το Διεθνές Δίκαιο προεκτείνεται είτε ως τα 350 ν.μ. είτε ως τα 100 ν.μ. πέραν της ισοβαθούς των 2.500μ., είτε ως τα 60 ν.μ. από τη βάση του ηπειρωτικού ανυψώματος. Σύμφωνα με τη Σύμβαση του 1982, το παράκτιο κράτος έχει κυριαρχικά δικαιώματα επί της υφαλοκρηπίδας, του ανήκουν τα ορυκτά του εδάφους και του υπεδάφους του βυθού, οι μη ζώντες οργανισμοί του βυθού, καθώς και οι ζώντες οργανισμοί του βυθού που ανήκουν στα καθιστικά είδη, δηλαδή τα είδη που δεν μπορούν να κινηθούν μόνα τους χωρίς συνεχή επαφή με τον βυθό. Τα παράκτια αυτά δικαιώματα του κράτους τού ανήκουν αυτοδικαίως, ανεξάρτητα της τήρησης οποιωνδήποτε διατυπώσεων (π.χ. δήλωσης, οριοθέτησης κ.λπ.) και είναι αποκλειστικά: ακόμα κι αν δεν τα ασκήσει το παράκτιο κράτος, δεν δικαιούνται να τα ασκήσει κανένα άλλο κράτος¹.



Εικόνα 1. Οριοθετήσεις κατόπιν συμφωνιών και διεκδικήσεις Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) στην Ανατολική Μεσόγειο.

¹ Πηγή: <http://www.parakato.gr/2020/07/navtex.html>

1.6 - Δομή Κεφαλαίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική εισαγωγή στους τρόπους διασύνδεσης ηλεκτρικών δικτύων, και παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα διασύνδεσης δικτύων διαφορετικών κρατών με παράδειγμα της Ελλάδας ως κράτος – μέλος ηλεκτρικής διασύνδεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μέθοδος και ο τρόπος υλοποίησης της ΑΗΠ (AHP – Analytic Hierarchy Process).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται και επιλύεται το πρόβλημα της παρούσας μελέτης. Συγκρίνονται μεταξύ τους τα εναλλακτικά ρητά ορισμένα σενάρια όδευσης, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2 – Ηλεκτρική διασύνδεση χωρών

2.1 - Ιδιαιτερότητα ηλεκτρικής διασύνδεσης

Στην παρούσα εργασία, η διασύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως μια διασυννοριακή γραμμή μεταφοράς μέσω ενός κόμβου (σημείο διασυννοριακής διασύνδεσης). Σε αντίθεση με το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο, οι διασυνδέσεις ηλεκτρικής ενέργειας δεν χαρακτηρίζονται από ασύμμετρες διακρατικές σχέσεις εισαγωγών-εξαγωγών. Αντίθετα, ο ηλεκτρισμός ρέει σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και προς τις δύο κατευθύνσεις. Παρά αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά, μπορεί να προκύψουν πολύ διαφορετικά τρωτά σημεία μεταξύ διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών δικτύων. Αυτά εξαρτώνται από το εάν και σε ποιο βαθμό η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να σταθεροποιηθεί στην περίπτωση που υπάρξει κάποια αστοχία ή αποσύνδεση του μέσου διασύνδεσης. Μια διασύνδεση που συνδέει δύο δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επομένως να συνεπάγεται γεωπολιτικούς κινδύνους και να χρησιμοποιηθεί ως ένα είδος πολιτικού εκβιασμού.

2.2 - Τρόποι ηλεκτρικής διασύνδεσης μεταξύ χωρών

Τρόποι διασύνδεσης δικτύων ηλεκτρικής ισχύος εντός και εκτός των διαφορετικών κρατών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων όπως παρακάτω:

Διασύνδεση συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC): Η μεταφορά HVDC περιλαμβάνει τη μετατροπή της ισχύος εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση και τη μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις μέσω αποκλειστικών γραμμών μεταφοράς HVDC. Στο άκρο λήψης, η ισχύς συνεχούς ρεύματος μετατρέπεται ξανά σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Στα HVDC δεν δημιουργούνται τα επιδερμικά φαινόμενα ροής ρεύματος, αξιοποιείται και το εσωτερικό υλικό των αγωγών (skin effect)². Η μεταφορά HVDC προτιμάται στην μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, λόγω των μικρότερων απωλειών ισχύος σε σύγκριση με τη μεταφορά εναλλασσόμενης ισχύος. Στα HVDC η μεταφερόμενη ισχύς δύναται να ελέγχεται ανεξάρτητα της γωνίας φάσης μεταξύ πηγής και φορτίου. Τα μειονεκτήματα της μεταφοράς υψηλής συνεχούς τάσης είναι ο έλεγχος, η μεταγωγή, η μετατροπή και η γενική συντήρηση του συστήματος. Οι ακριβότεροι μετατροπείς με ειδική χωρητικότητα υπερφόρτωσης χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) στον υποσταθμό άκρου λήψης για σκοπούς διανομής. Λόγω του πολύ υψηλού επιπέδου τάσης του HVDC, οι αυτόματοι διακόπτες προστασίας είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι το HVDC απαιτεί ειδική και προηγμένη συσκευή προστασίας.

Το HVDC χρειάζεται μικρότερο αριθμό αγωγών ανά μονάδα απόστασης σε σχέση με το εναλλασσόμενο, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη υποστήριξης τριών φάσεων.

Ανάλογα με το επίπεδο τάσης και τις λεπτομέρειες κατασκευής, οι απώλειες μεταφοράς του HVDC ανέρχονται σε περίπου 3,5% ανά 1000 χιλιόμετρα, που είναι κατά 30% με 40% λιγότερο σε σχέση με τις γραμμές εναλλασσόμενου, αναφορικά με

² <https://www.hellenicaworld.com/Science/Physics/gr/SkinEffect.html>

τα ίδια επίπεδα τάσης³. Αυτό συμβαίνει επειδή το συνεχές ρεύμα μεταφέρει μόνο ενεργή ισχύ και συνεπώς έχει μικρότερες απώλειες από το εναλλασσόμενο, που μεταφέρει και ενεργή και άεργη ισχύ.

Η ροή ισχύος HVDC μεταξύ ξεχωριστών συστημάτων εναλλασσόμενου μπορεί να ελεγχθεί αυτόματα έτσι ώστε να υποστηρίζεται κάθε δίκτυο για όσο διαρκούν οι προσωρινές συνθήκες, χωρίς όμως να υπάρχει ο κίνδυνος ότι μια σημαντική διακοπή ισχύος (Power outage) σε ένα δίκτυο θα οδηγήσει στην κατάρρευση του δεύτερου.

Το HVDC βελτιώνει την ευκολία ελέγχου των συστημάτων, καθώς τουλάχιστον μία σύνδεση HVDC θα είναι ενσωματωμένη σε ένα δίκτυο εναλλασσόμενου—στο απορυθμισμένο περιβάλλον, το πόσο εύκολα ελέγχεται είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, εκεί όπου απαιτείται έλεγχος των συναλλαγών ενέργειας.

Τα συνδυασμένα οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα της μεταφοράς HVDC μπορούν να το καταστήσουν κατάλληλη επιλογή για τη σύνδεση ηλεκτρικών πηγών που είναι τοποθετημένες μακριά από τους κύριους χρήστες.

Ιδιαίτερες εφαρμογές όπου η τεχνολογία μεταφοράς HVDC παρέχει πλεονεκτήματα:

- Σχήματα μεταφοράς με υποθαλάσσια καλώδια (Undersea cables).
- Μαζική μεταφορά ισχύος ακραίου σημείου σε ακραίο σημείο μεγάλης απόστασης (Endpoint-to-endpoint long-haul bulk power transmission) χωρίς ενδιάμεσους ρευματοδότες (taps), το οποίο συνηθίζεται στη σύνδεση μιας απομακρυσμένης εγκατάστασης παραγωγής με το κύριο δίκτυο.
- Αύξηση της χωρητικότητας υφιστάμενου ηλεκτρικού δικτύου σε περιπτώσεις όπου η προσθήκη καλωδίων είναι δύσκολη ή δαπανηρή για εγκατάσταση.
- Σταθεροποίηση κύριου ηλεκτρικού δικτύου εναλλασσόμενου, χωρίς αύξηση των ανώμαλων επιπέδων (προσδοκώμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (prospective short circuit current)).
- Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως ο άνεμος στο κύριο δίκτυο μεταφοράς. Εναέριες γραμμές HVDC για έργα ενσωμάτωσης παράλιων ανέμων και καλώδια HVDC για υπεράκτια έργα έχουν προταθεί για τη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη. Τα δίκτυα συνεχούς με πολλαπλούς μετατροπείς πηγής τάσης (VSCs) είναι μια από τις τεχνικές λύσεις για συγκέντρωση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας και μεταφοράς της για να χρησιμοποιηθεί σε κέντρα που είναι μακριά από την ακτή.

Τα μειονεκτήματα του HVDC βρίσκονται κυρίως στην μετατροπή, στον έλεγχο, στη διαθεσιμότητα και στη συντήρηση.

Το HVDC είναι λιγότερο αξιόπιστο και έχει πιο μικρή διαθεσιμότητα από τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, κυρίως λόγω του πρόσθετου εξοπλισμού μετατροπής. Τα μονοπολικά συστήματα έχουν διαθεσιμότητα περίπου 98,5%, με το ένα τρίτο περίπου του χρόνου διακοπής λειτουργίας που δεν έχει προγραμματιστεί να οφείλεται σε βλάβες. Η ανοχή σε σφάλματα διπολικών συστημάτων δίνει μεγάλη

³ Siemens AG – Ultra HVDC Transmission System

διαθεσιμότητα για το 50% της χωρητικότητας σύνδεσης, αλλά η διαθεσιμότητα της πλήρους χωρητικότητας είναι περίπου 97% με 98%⁴.

Οι απαιτούμενοι σταθμοί μετατροπής έχουν μεγάλο κόστος και περιορισμένη δυνατότητα υπερφόρτωσης. Σε μικρότερες αποστάσεις μεταφοράς, οι απώλειες στους σταθμούς μετατροπών μπορεί να είναι πιο μεγάλες από ότι σε μια γραμμή μεταφοράς εναλλασσόμενου για την ίδια απόσταση.⁵ Το κόστος των μετατροπών μπορεί να μην αντισταθμίζεται από τις μειώσεις του κόστους στη γραμμή κατασκευής και τις πιο χαμηλές απώλειες γραμμής.

Η λειτουργία ενός σχήματος HVDC απαιτεί τη διατήρηση πολλών ανταλλακτικών, συχνά αποκλειστικά για ένα σύστημα, επειδή τα συστήματα HVDC είναι λιγότερο τυποποιημένα από τα συστήματα εναλλασσόμενου και η τεχνολογία αλλάζει πιο γρήγορα.

Αντίθετα με τα συστήματα εναλλασσόμενου, η πραγματοποίηση συστημάτων πολλών σταθμών είναι περίπλοκη (ιδιαίτερα με μετατροπείς μεταγόμενης γραμμής), επειδή επεκτείνονται υφιστάμενα σχήματα σε πολυτερματικά συστήματα. Ο έλεγχος της ροής ισχύος σε πολυτερματικό σύστημα συνεχούς ρεύματος θεωρεί προαπαιτούμενο την καλή επικοινωνία μεταξύ των τερματικών, καθώς η ροή ισχύος να είναι ενεργά ρυθμισμένη από το σύστημα ελέγχου μετατροπείας, αντί να βασίζεται στις ιδιότητες εγγενούς εμπέδησης και της γωνίας φάσης γραμμής μεταφοράς εναλλασσόμενου⁶.

Διασύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης (HVAC): Η μεταφορά HVAC είναι η παραδοσιακή μέθοδος μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Περιλαμβάνει τη μεταφορά ισχύος εναλλασσόμενης τάσης σε υψηλές τάσεις μέσω εναέριων γραμμών ή υπόγειων καλωδίων. Η ισχύς AC μπορεί να αυξηθεί σε υψηλές τάσεις χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές για αποτελεσματική μεταφορά και να μειωθεί στο άκρο λήψης για διανομή.

Εναέρια διασύνδεση: Τα κλασσικά δίκτυα χρησιμοποιούν εναέριες γραμμές μεταφοράς ισχύος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, σε πολύ υψηλές μεταδόσεις ισχύος και μεγάλες αποστάσεις, περίπου 600 km ή περισσότερο, συνήθως από απομακρυσμένους σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η τεχνολογία HVDC και η HVAC είναι κατάλληλες για τέτοιες εφαρμογές.

⁴ «HVDC Classic reliability and availability»

⁵ «Design, Modeling and Control of Modular Multilevel Converter based HVDC Systems. - NCSU Digital Repository»

⁶ Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, (25 Αυγούστου 2006), *Standard Handbook for Electrical Engineers*.



Εικόνα 2. Μεταφορά ενέργειας με εναέρια γραμμή ισχύος. Πηγή:
<https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/hvdc/overhead-lines>

Υποβρύχια/Υποθαλάσσια διασύνδεση: Τα υποβρύχια ή υποθαλάσσια καλώδια χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ύδατος, όπως θάλασσα, ωκεανό ή λίμνες.



Εικόνα 3. Υποβρύχιο καλώδιο μεταφοράς ισχύος (underwater power cable). Πηγή:
<https://news.b2green.gr/>

2.3 Παραδείγματα ηλεκτρικής διασύνδεσης μεταξύ χωρών στη Μεσόγειο

2.3.1 - GREGY Interconnector

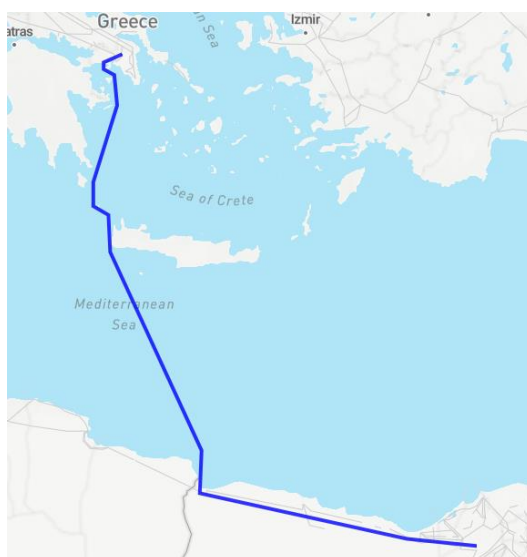
Ένα⁷ έργο που πρόκειται να αλλάξει το ενεργειακό τοπίο στην Ελλάδα και στην Ευρώπη είναι αυτό που μελετάται για την κατευθείαν ηλεκτρική διασύνδεση Αιγύπτου-Αττικής, χωρίς ενδιάμεσα σημεία. Η μελέτη ολοκληρώνεται το 2024, όπου και αναμένεται να ξεκινήσει την υλοποίηση ο Όμιλος Κοπελούζου.

⁷ <https://www.copelouzos.gr/en/service/gregy-interconnector/>

Το υποθαλάσσιο καλώδιο ηλεκτρικής ενέργειας με αμφίδρομη δυναμικότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και συνολικού προϋπολογισμού 4,2 δισ. ευρώ θα κατασκευαστεί μεταξύ Ελλάδας και Αιγύπτου. Η σημασία του είναι κυρίως να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας της Αιγύπτου και να ωφελήσει τόσο την Ελλάδα όσο και την ΕΕ. Με αυτόν τον τρόπο, η χώρα μας θα γίνει σημαντικός ενεργειακός κόμβος «πράσινης» ενέργειας στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο και στην Ευρώπη γενικότερα.

Σημαντική είναι η συμβολή του GREGY στην αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης και στην επιτάχυνση της μετάβασης σε μια πράσινη οικονομία. Τα νούμερα είναι ενδεικτικά του θετικού ενεργειακού αποτυπώματος του έργου. Αυτά τα 3000 μεγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας που θα μεταφέρει το έργο GREGY θα αντικαταστήσουν 4,5 bcm φυσικού αερίου ετησίως και θα μειώσουν τις εκπομπές CO₂ κατά 10 εκατομμύρια τόνους ετησίως.

Αυτή η θετική διάσταση του GREGY ενισχύεται περαιτέρω εάν ληφθεί υπόψη η χρήση της μεταφερόμενης ενέργειας: περίπου το ένα τρίτο θα καταναλώνεται στην Ελλάδα, το ένα τρίτο θα εξάγεται σε γειτονικές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το ένα τρίτο θα χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου, με τη μεγαλύτερη ποσότητα αυτού του υδρογόνου να εξάγεται και σε γειτονικές ευρωπαϊκές χώρες.



Εικόνα 4. GREGY Interconnector. Ηλεκτρική διασύνδεση Ελλάδας – Αιγύπτου.

2.3.2 - Διασύνδεση Κρήτης – Χερσαίας Ελλάδας

⁸Το έργο στοχεύει στην πλήρη αξιοποίηση του τοπικού δυναμικού ΑΠΕ και συγχρόνως στην αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας και της ενεργειακής σταθερότητας του νησιού, το οποίο επιτυγχάνεται με τη διασύνδεσή του με το ήδη υπάρχον ηπειρωτικό σύστημα.

⁸ <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/1055>

Θα βοηθήσει στην ελάττωση της λειτουργίας των μονάδων πετρελαίου που τροφοδοτούν το νησί, επιτρέποντας, μακροπρόθεσμα, τον σταδιακό παροπλισμό τους, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του κόστους παραγωγής, καθώς και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η διασύνδεση αυτή υλοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση η Κρήτη συνδέεται με την Πελοπόννησο με υποβρύχιο καλώδιο διπλού κυκλώματος εναλλασσόμενου ρεύματος 150 kV ονομαστικής χωρητικότητας 2x200 MVA. Στη δεύτερη φάση η Κρήτη συνδέεται με την Αττική με διπολική υποβρύχια σύνδεση HVDC-VSC μεταφοράς ισχύος 2x500 MW. Το έργο συνολικά βοηθά στο να επιτευχθούν οι στόχοι πολιτικής σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης που ορίζονται στο πλαίσιο που αφορά το κλίμα και την ενέργεια μέχρι και το 2030⁹.



Εικόνα 5. Ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης – Χερσαίας Ελλάδας.

⁹ https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/electricity-interconnection-targets_en

Κεφάλαιο 3 – Πολυκριτηριακή ανάλυση (ΠΑ) - Μέθοδος ΑΗΡ

3.1 - Γενικά

Το πρόβλημα της επιλογής βέλτιστης όδευσης μεταξύ ρητά καθορισμένων εναλλακτικών λύσεων αφορά πρόβλημα τοποθέτησης υποδομών, είναι η ιεράρχησή τους σε σειρά προτεραιότητας, βάσει τις «επιδόσεις» τους σε έναν συγκεκριμένο αριθμό κριτηρίων. Εξετάζει ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους, αντανakλά τις επιλογές της ομάδας απόφασης και είναι αντικείμενο πολυκριτηριακής ανάλυσης (ΠΑ), πολυσταδιακό ως προς κριτήρια.

Οι επικρατέστερες θεωρίες για προβλήματα επιλογής τοποθέτησης, είναι η πολυκριτηριακή θεωρία χρησιμότητας (Multi Attribute Value or Utility Theory, MAUT) με μεθοδολογίες όπως η ΑΗΠ και η Πολυκριτηριακή ιεράρχηση επιλογών (outranking relations approach) με μεθοδολογίες όπως η ELECTRE, PROMETHÉE, TOPSIS.

Κύριο χαρακτηριστικό των προβλημάτων απόφασης που βρίσκει εφαρμογή η Διαδικασία της Αναλυτικής Ιεράρχησης, είναι το γεγονός ότι, θεωρείται αδύνατη η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων βαθμολογώντας τις με απόλυτα σκορ, μόνο η σχετική σύγκριση μεταξύ τους ως προς τα επιμέρους κριτήρια είναι δυνατή.

3.2 - Θεωρητικό υπόβαθρο ΠΑ

Οι μεθοδολογίες πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων, Multiple Criteria Decision Making (MCDM), ή πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων, Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA), προέκυψαν από την ανάγκη για αποφάσεις που λαμβάνουν υπόψη σύνολο στόχων και κριτηρίων.

Τα μειονεκτήματα της ΠΑ είναι ότι μειώνει την επίδραση του παράγοντα "χρόνου", που απαντάται στα δυναμικά προβλήματα. Επίσης η ΠΑ δεν οδηγεί σε βελτιστοποίηση λύσεων, αλλά σε "συμβιβαστικές λύσεις" (Voocd, 1983).

Η λήψη αποφάσεων διαχωρίζεται στην **λήψη αποφάσεων πολλαπλών στόχων (Multi Objective - MODM)** και **λήψη αποφάσεων πολλαπλών ιδιοτήτων (Multi Attribute - MADM)**.

3.2.1 - Multi Objective (MODM)

Η **λήψη αποφάσεων πολλαπλών στόχων MODM** (Multi Objective Decision Making) μελετά προβλήματα λήψης αποφάσεων στα οποία ο χώρος της απόφασης είναι συνεχής. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν τα προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού με συναρτήσεις πολλών στόχων. Σε αυτές τις λύσεις το πρόβλημα μοντελοποιείται σαν μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού, δίνει μια πολύ καλή θεωρητική λύση, αλλά δύσχρηστη για την πρακτική υλοποίηση από τον χρήστη.

3.2.2 - Multi Attribute (MADM)

Η λήψη αποφάσεων πολλαπλών ιδιοτήτων **MADM** (Multi Attribute) επιλύει προβλήματα με διακριτούς χώρους αποφάσεων. Σε αυτά τα προβλήματα, το σύνολο των εναλλακτικών αποφάσεων έχει προκαθοριστεί. Αυτές οι μεθοδολογίες δεν προσπαθούν να υπολογίσουν την βέλτιστη λύση, αλλά προσπαθούν μέσω διάφορων διαδικασιών κατάταξης, την κατάταξη εναλλακτικών αποφάσεων σε σχέση με τα κριτήρια, αναζητώντας τις «βέλτιστες» αποφάσεις ανάμεσα σε εναλλακτικές. Αυτές οι μέθοδοι δεν είναι μαθηματικά τόσο ισχυρές όσο αυτές του μαθηματικού προγραμματισμού.

3.2.3 - Ορισμοί βασικών εννοιών ΠΑ

Παρακάτω ορίζονται οι βασικές έννοιες που απαντώνται στα προβλήματα ΠΑ.

Οι «**Εναλλακτικές αποφάσεις**» είναι οι διαφορετικές επιλογές της ομάδας απόφασης (ατόμου ή συνόλου ατόμων).

Οι «**Πολλαπλές Ιδιότητες**», attributes, αναφέρονται στους στόχους/ κριτήρια της απόφασης.

Χαρακτηριστικά των δεδομένων της ομάδας απόφασης. Τα δεδομένα από τον λήπτη της απόφασης μπορεί να είναι ή **απόλυτες τιμές**, cardinal, δηλαδή αριθμητικά δεδομένα συνεπειών, ή **δεδομένα πρότυπου επιπέδου**, standard level, δηλαδή κατηγοριοποιούνται σε ομάδες ή **τακτικά δεδομένα**, ordinal, που δηλώνουν τη θέση που παίρνει κάτι ή κάποιος σε σχέση με άλλα.

Το «**Κριτήριο**» καταδεικνύει τη συμπεριφορά των εναλλακτικών σε ένα πραγματικό αριθμό, ώστε για οποιοσδήποτε εναλλακτικές να διατυπώνεται ότι η μια προτιμάται έναντι της άλλης. Η έννοια του κριτηρίου διαφέρει από την έννοια του «ιδιότητας» ή αλλιώς καλούμενο ως «χαρακτηριστικό» (attribute). Το χαρακτηριστικό δεν εκφράζει καμιά συμπεριφορά προτίμησης. Τα κριτήρια μπορεί να είναι **ποσοτικά** (ή αλλιώς μετρικά), ή να είναι **ποιοτικά** ή **διάταξης** σε μια κλίμακα προτίμησης, ή να είναι κριτήρια **πιθανοτικά** (η αξιολόγηση μιας δράσης είναι κατά πιθανότητα γνωστή), ή κριτήρια **ασαφή** (fuzzy, η τιμής αξιολόγηση μιας δράσης βρίσκεται σε ένα διάστημα της κλίμακας).

Η επιλογή των κριτηρίων ακολουθεί τουλάχιστον δύο προσεγγίσεις (Voocd, 1983) ή και περισσότερες (Shrader - Frechette, 1985):

- Η επιλογή με **Deductive προσέγγιση** (είναι καταγραφή κύριων ομάδων κριτηρίων ή χαρακτηριστικών του προβλήματος εξειδικεύονται ποιοτικά ή ποσοτικά με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων κριτηρίων).
- Η επιλογή με **Inductive προσέγγιση** (αφορά αντίστροφη διαδικασία - καταγραφή όλων των στοιχείων ή χαρακτηριστικών των εναλλακτικών λύσεων, έτσι ώστε να προκύψει το σύνολο των κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση).
- Η επιλογή που βασίζεται σε **προηγούμενες επιδόσεις ή αποκαλυπτόμενες προτιμήσεις, εμπειρία άλλων έργων**, π.χ. εμπειρία από άλλα έργα διασυνοριακών αγωγών.

Οι «**Συγκρούσεις κριτηρίων**», αναφέρονται στις διαφορετικές διαστάσεις των εναλλακτικών επιλογών.

Ο «**Πίνακας (μήτρα) Απόφασης**» είναι ένας πίνακας διαστάσεων $m \times n$, όπου n είναι το πλήθος των εναλλακτικών αποφάσεων, m το σύνολο των στόχων σύμφωνα με τους οποίους κρίνουμε την προτίμηση μιας απόφασης. Τα στοιχεία του πίνακα είναι οι τιμές της απόδοσης μιας εξεταζόμενης εναλλακτικής ως προς ένα κριτήριο.

Τα «**Βάρη κριτηρίων**» αποδίδονται ανάλογα με την σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου. Τα βάρη, συνήθως, κανονικοποιούνται έτσι ώστε το άθροισμά τους να ισούται με την μονάδα. Τα βάρη είναι είτε αυτά που προκύπτουν μέσω συμβιβασμών ή αλλιώς καλούνται **αντισταθμιστικά** είτε **μη αντισταθμιστικά**.

Τα **αντισταθμιστικά βάρη**, προβλέπουν μια αντιστάθμιση τιμών της διαμέσου των κριτηρίων, καθώς επιτρέπουν στα στοιχεία των προτιμήσεων να συγκρίνονται όπως αυτά αθροίζονται σε μια γενική εκτίμηση. Τα **μη αντισταθμιστικά βάρη**, αντίθετα, δεν το επιτρέπουν.

3.2.4 - Μέθοδοι συγκρίσεων κριτηρίων

Οι μέθοδοι ταξινομούνται με βάση πως δημιουργούνται οι τιμές των εναλλακτικών σε:

- Μέθοδο μοναδικής εναλλακτικής.
- Μέθοδοι γλωσσικών κανόνων.
- Μέθοδοι δύο εναλλακτικών.

3.2.5 - Μέθοδοι προσδιορισμού των βαρών κριτηρίων

Οι μέθοδοι προσδιορισμού των βαρών είναι οι εξής:

- **Ανάλυση προτίμησης (Preference Analysis)**. Αφορά τον προσδιορισμό προτεραιοτήτων μέσω ερωτηματολογίων, συνεντεύξεων κ.λπ., με στόχο την απόκτηση γνώσης για την απόδοση βαρών.
- **Ανάλυση συμπεριφοράς (Behavioral Analysis)**. Αφορά τον προσδιορισμό προτεραιοτήτων μέσα από τη μελέτη της πραγματικής συμπεριφοράς σε παρόμοια προβλήματα του παρελθόντος (revealed preference).
- **Χρήση υποθετικών προτεραιοτήτων (Hypothetical Priorities)**. Αφορά την υιοθέτηση υποθετικών προτεραιοτήτων / βάρη προσεγγίζοντας κάθε φορά το πρόβλημα από μία διαφορετική πτυχή.

3.3 - Μεθοδολογικό πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων στην Πολυκριτήρια Ανάλυση (ΠΑ)

Σε κάθε ΠΑ, η μεθοδολογία περιλαμβάνει αυστηρά στάδια και σειρά βημάτων για τον καθορισμό του προβλήματος, τον καθορισμό κριτηρίων αξιολόγησης, τον καθορισμό προτιμήσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, την εφαρμογή της μεθόδου και ανάλυση ευαισθησίας. Παρακάτω περιγράφονται τα στάδια της ΠΑ.

3.3.1 - Προβληματική στην ΠΑ

Ένας από τους θεμελιωτές της σύγχρονης θεωρίας ΠΑ είναι ο Bernard Roy, (1985). Ο Roy ορίζει ως πρώτο βήμα την «**Προβληματική**»: Να καθοριστεί η αντίληψη του αναλυτή (αναλυτής εργάζεται για την ομάδα απόφασης) «τι αποτελέσματα προσδοκά, σε ποια κατεύθυνση να στρέψει την διερεύνηση, ποια μορφή θα λάβει η συμβουλή του».

Ο Roy ταξινομεί τις «προβληματικές» σε τέσσερα διαφορετικά είδη, όπως παρακάτω:

Πίνακας 1. Κατηγορίες προβληματικής ΠΑ (Roy, 1985)

Επιλογή. Επιλέγεται μια εναλλακτική, μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών
Ταξινόμηση. Ταξινομούνται οι εναλλακτικές λύσεις σε προκαθορισμένες ομάδες, στις οποίες δίνεται μια σειρά προτίμησης
Κατάταξη. Κατατάσσονται οι εναλλακτικές, από την καλύτερη στην χειρότερη
Περιγραφή. Περιγράφονται οι εναλλακτικές λύσεις ως προς τα κύρια αλλά και τα διακριτά χαρακτηριστικά τους

3.3.2 - Στάδια λήψης απόφασης στην ΠΑ

Ο Roy (1985), για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων στα πλαίσια ΠΑ, ορίζει τέσσερα διαδοχικά, αλληλοεπιδρώντα στάδια, όπου ο αναλυτής, διατρέχοντας τα στάδια είναι δυνατό να διορθώσει τα προηγούμενα στάδια.

Στάδιο I: Καθορισμός του αντικειμένου της απόφασης. Αν αφορά Διακριτό πρόβλημα και τι είδους είναι (Επιλογής, Κατάταξης, Ταξινόμησης, Περιγραφής).

Στάδιο II: Καθορισμός μιας συνεπούς οικογένειας κριτηρίων.

Στάδιο III: Ανάπτυξη μιας μεθόδου σύνθεσης των κριτηρίων. Αν είναι μοναδική σύνθεση κριτηρίων, ή αν είναι σχέσεις υπεροχής, ή αν είναι αλληλεπιδραστικές. Αν θα λυθεί με μέθοδο:

- «Πολυκριτήριο Μαθηματικό Προγραμματισμό».
- «Πολυκριτήρια Θεωρία Χρησιμότητας».
- «Θεωρία Σχέσεων Υπεροχής (ή αλλιώς Αναλυτική Ιεράρχηση)».
- «Αναλυτική Συνθετική Προσέγγιση».

Στάδιο IV: Υποστήριξη της απόφασης με ανάλυση ευαισθησίας.

Στο Στάδιο II: Ο αναλυτής καταλήγει και οριστικοποιεί μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων κατόπιν μιας σειράς ενεργειών:

- Αυστηρό ορισμό του συνόλου των δράσεων.
- Ανάλυση των στοιχειωδών επιπτώσεων συνόλου δράσεων.
- Καθορισμό αξόνων προτίμησης της ομάδας απόφασης.
- Επιλογή διαστάσεων κριτηρίων.
- Τα κριτήρια μπορεί να προσδιοριστούν είτε από παρελθόντα έργα, είτε υπό το πρίσμα κινδύνου – οφέλους, καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά του

προβλήματος, είτε αντίστροφα καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών.

Στο Στάδιο III: ο αναλυτής αποφασίζει αν το πρόβλημα θα αντιμετωπιστεί ως **πρόβλημα ολικής προτίμησης** οπότε αποτελεί σύνθεση των κριτηρίων και αν θα χρησιμοποιήσει **Αντισταθμιστικό μοντέλο** ή **Μη-αντισταθμιστικό μοντέλο**. Στα Μη-αντισταθμιστικά, δεν είναι επιτρεπτή η αντιστάθμιση κριτηρίου από άλλο. Τα αντισταθμιστικά βάρη προβλέπουν αντιστάθμιση τιμών διαμέσου των κριτηρίων, καθώς επιτρέπουν στα στοιχεία των προτιμήσεων να συγκρίνονται, καθώς αυτά αθροίζονται.

Στο Στάδιο IV: ο αναλυτής έχει τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το Στάδιο III. Συμπληρωματικά, τα οργανώνει ώστε να μπορεί να δώσει απαντήσεις σε συγκεκριμένα ερωτήματα που θέτουν οι εμπλεκόμενοι στην διαδικασία απόφασης. Διεξάγει ανάλυση ευαισθησίας και δοκιμάζει την ευστάθεια των αποτελεσμάτων (προτιμήσεων) και τη διεξαγωγή εναλλακτικών σεναρίων (τι θα συμβεί αν).

3.3.3 - Μαθηματική κατάταξη μεθόδων ΠΑ

Οι κυριότερες κατηγορίες ΠΑ μεθόδων, από μαθηματική άποψη είναι:

- **Συναρτησιακές μέθοδοι.** Η σύνθεση των κριτηρίων γίνεται μέσω συναρτήσεων αξίας ή χρησιμότητας.
- **Σχεσιακές μέθοδοι.** Η σύνθεση των κριτηρίων γίνεται μέσω σχέσεων υπεροχής.
- **Αναλυτικές μέθοδοι.** Η σύνθεση των κριτηρίων συμπεραίνεται έμμεσα από δεδομένα ολικής προτίμησης της ομάδας απόφασης.

3.4 - Επισκόπηση των μεθόδων Πολυκριτήριων Αποφάσεων (ΠΑ)

Οι κύριες οικογένειες των **μεθόδων ΠΑ διακριτής ανάλυσης** πολλαπλών κριτηρίων, βάσει της θεωρητικής τάσης τις ταξινομεί σε τέσσερις κύριες οικογένειες, όπως παρακάτω, όπου αναφέρονται και αντιπροσωπευτικές μέθοδοι κάθε οικογένειας.

1. **Πολυκριτηριακή θεωρία χρησιμότητας** (Multi Attribute Value / Utility Theory, MAVT, MAUT): AHP, MAUT, SMART, SAW, VMDA.
2. **Πολυκριτηριακή ιεράρχηση επιλογών** (outranking relations approach): ELECTRE, PROMETHÉE.
3. **Αναλυτική συνθετική προσέγγιση:** UTA
4. **Πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός:** TOPSIS, DEA.

Παρακάτω, δίνεται μια συνοπτική επισκόπηση των μεθόδων.

3.4.1 - Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας (Multi Attribute Value or Utility Theory, MAUT).

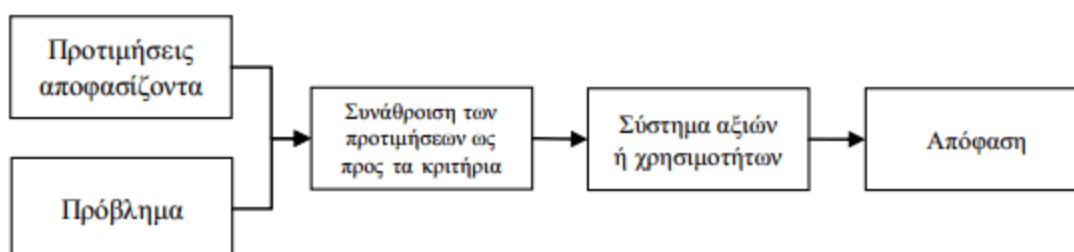
Η θεωρία Χρησιμότητας (Σύστημα Αξιών), είναι μια κλασσική προσέγγιση της ΠΑ με προτιμήσεις ως προς τα κριτήρια, με αντισταθμιστικά βάρη, και με προτιμήσεις ως προς τις συνέπειες, όπως η **AHP, SMART, SAW, VMDA**.

Υλοποιείται σε συνεχές και σε διακριτό σύνολο επιλογών. Βασίζεται στη λογική της αναγωγής του πολύ-κριτηριακού σε μονό-κριτηριακό πρόβλημα. Σε κάθε πρόβλημα απόφασης υπάρχει μια πραγματική συνάρτηση εκτίμησης την οποία ο λήπτης απόφασης επιθυμεί να μεγιστοποιήσει.

Στόχος της θεωρίας είναι να αποδοθούν οι προτιμήσεις του λήπτη απόφασης με την μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας, με παραμέτρους τα κριτήρια εκτίμησης, συνήθως αθροιστική συνάρτηση. Η MAUT βασίζεται στις διαδικασίες της αποδοχής, δηλαδή όλες οι εναλλακτικές επιλογές είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους και σε καμία περίπτωση να μην υφίσταται σύγκριση ανάμεσα σε δύο εναλλακτικές.

Αναλυτικότερα, για την μέθοδο **MAVT (Multi-attribute Value Theory)**: Κατά την εφαρμογή του μοντέλου, ακολουθούνται με συνέπεια τα βήματα του διαγράμματος ροής, δες εικόνα 6.

- Ορίζονται οι υποψήφιες εναλλακτικές και τα κριτήρια απόφασης (με μια ιεραρχία) που τις χαρακτηρίζουν.
- Διενεργείται αξιολόγηση των εναλλακτικών ξεχωριστά ως προς κάθε κριτήριο.
- Ορίζονται τα βάρη των κριτηρίων, ανάλογα με τη σημαντικότητα που τα χαρακτηρίζει σε κάθε περίπτωση. Το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων ισούται με τη μονάδα.
- Το συνολικό μέτρο της αξίας (π.χ. συνάρτηση προσθετικής αξίας) κάθε εναλλακτικής προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους γινομένων των αξιολογήσεων των εναλλακτικών ως προς κάθε κριτήριο, με το βάρος του αντίστοιχου κριτηρίου.
- Κατατάσσονται οι εναλλακτικές, από την καλύτερη προς τη λιγότερο θεμιτή, σύμφωνα με την τιμή συνάρτησης αξίας, που αποδίδεται τελικά στην κάθε εναλλακτική.
- Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας.



Εικόνα 6. Προσέγγιση συστήματος αξιών, Value System approach. Πηγή: Siskos, Spyridakos, 1999.

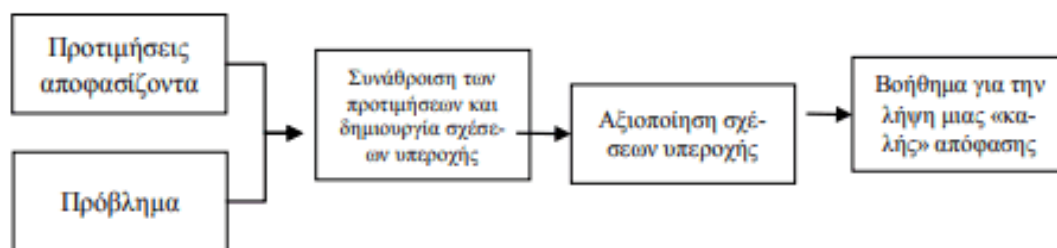
3.4.2 - Πολυκριτηριακή ιεράρχηση επιλογών (outranking relations approach).

Η θεωρία Σχέσεων Υπεροχής, τέθηκε από τον Roy το 1968, με προτιμήσεις ως προς τα κριτήρια και με μη-αντισταθμιστικά βάρη και με προτιμήσεις ως προς τις συνέπειες. Παραδείγματα είναι οι μέθοδοι **ELECTRE** (Roy, 1991), **PROMETHÉE** (Brans, Vincke, 1985) με μη-αντισταθμιστικά βάρη.

Υλοποιείται σε προβλήματα που εξετάζουν ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών επιλογών. Το μοντέλο απόφασης που αναπτύσσεται μέσω της θεωρίας σχέσεων υπεροχής δεν έχει την μορφή μίας μαθηματικής συνάρτησης (σε αντίθεση με τις τρεις άλλες θεωρίες) που να υπολογίζεται ένα σκορ ή συνάρτηση της χρησιμότητας των εναλλακτικών ενεργειών.

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου δείχνεται στην εικόνα 7. Συμπερασματικά το μοντέλο απόφασης αναπαριστά με κατανοητό τρόπο, τις σχέσεις προτίμησης, αδιαφορίας και μη-συγκρισιμότητας που υπάρχουν μεταξύ των εξεταζόμενων εναλλακτικών ενεργειών.

Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων σχέσεων υπεροχής σε αντίθεση με τα άλλες τρεις προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η παροχή δυνατότητας μοντελοποίησης της σχέσης μη-συγκρισιμότητας (incomparability) μεταξύ των εναλλακτικών ενεργειών. Συχνά κατά τη ενέργεια λήψης απόφασης σε πραγματικό πρόβλημα να εναλλάσσονται τα χαρακτηριστικά σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησης από τις εξεταζόμενες εναλλακτικές ενέργειες.



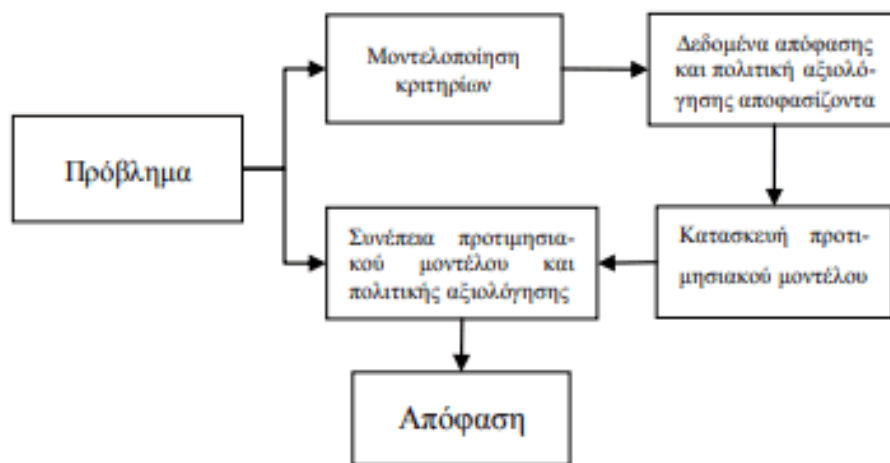
Εικόνα 7. Πολυκριτηριακή ιεράρχηση επιλογών. Πηγή: Siskos, Spyridakos, 1999.

Ειδικότερα για την **ELECTRE** (OUTRANKING): Η ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality) είναι η σημαντικότερη ίσως από τις μεθόδους που βασίζονται στο θεωρητικό ρεύμα των σχέσεων υπεροχής. Οι παραλλαγές της είναι ELECTRE όπως η I, II, III, IV, IS και ELECTRE TRI. Η ELECTRE I θεωρείται μη-αντισταθμιστική μέθοδος, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Αυτό σημαίνει πώς ένα πολύ κακό σκορ σε ένα κριτήριο δε αντισταθμίζεται από πολύ υψηλά σκορ σε άλλα κριτήρια. Η ELECTRE II σχεδιάστηκε για να βρίσκει λύσεις σε προβλήματα κατάταξης.

Ειδικότερα για την **PROMETHÉE** (OUTRANKING): Η μέθοδος PROMETHÉE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων σχέσεων υπεροχής (outranking relations methods). Σε αυτές τις μεθόδους, η κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων πραγματοποιείται μέσω των ανά ζεύγη συγκρίσεων των επιδόσεων των εναλλακτικών σεναρίων ως προς τα κριτήρια της ανάλυσης.

3.4.3 - Αναλυτική συνθετική προσέγγιση (Preference Disaggregation Approach).

Παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την θεωρία χρησιμότητας και την θεωρία σχέσεων υπεροχής. Με αυτήν την θεωρία καθορίζουμε ένα σύνολο των εναλλακτικών επιλογών, καθώς και ένα σύνολο κριτηρίων που τις χαρακτηρίζουν, ενώ καταγράφονται οι προτιμήσεις των μελών της ομάδας απόφασης. Εκτιμάται, συνεπώς, ένα αναλυτικό μοντέλο χρησιμότητας, το οποίο καταδεικνύει με βέλτιστο τρόπο τις προτιμήσεις των μελών της ομάδας απόφασης. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, στην αναλυτική-συνθετική προσέγγιση γίνεται αποδεκτό πώς η απόφαση και τα κριτήρια είναι αλληλεξαρτώμενα μέσα στο χρόνο, δεχόμενα περαιτέρω επεξεργασία. Το διάγραμμα ροής φαίνεται στην Εικόνα 8. Παράδειγμα μεθόδου για προβλήματα κατάταξης είναι η **UTA Plus** (Utilities Additives).



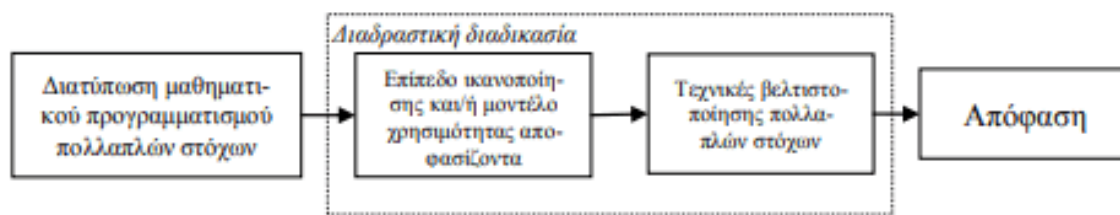
Εικόνα 8. Αναλυτική συνθετική προσέγγιση. Πηγή: Siskos, Spyridakos, 1999.

Πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός (Multi Objective Mathematical Programming, MOMP).

Υλοποιείται σε προβλήματα με συνεχές σύνολο άπειρου αριθμού επιλογών, στόχος είναι η εύρεση ιδανικής λύσης σε ένα πρόβλημα το οποίο περιλαμβάνει πολλές εναλλακτικές λύσεις.

Η εύρεση βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο *MOMP* αποτελεί μια γενίκευση του κλασικού γραμμικού προγραμματισμού που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλαπλών υπό μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων.

Το διάγραμμα ροής δείχνεται στην Εικόνα 9. Γνωστή μέθοδος πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος **TOPSIS** (TECHNIQUE FOR ORDER OF PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION) και η **DEA** (DATA ENVELOPMENT ANALYSIS).



Εικόνα 9. Πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός. Πηγή: Siskos, Spyridakos, 1999.

Η **TOPSIS** στηρίχθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου ELECTRE, βασίζεται στην κεντρική ιδέα της ελάχιστης ή μέγιστης απόστασης. Η επιλεγόμενη εναλλακτική (σε ένα σύνολο εναλλακτικών), θα πρέπει να είναι εκείνη με την ελάχιστη δυνατή γεωμετρική απόσταση από την «βέλτιστη» λύση και ταυτόχρονα, τη μεγαλύτερη δυνατή γεωμετρική απόσταση από την «χειρίστη» λύση.

Η μέθοδος **DEA** είναι μέθοδος κατηγοριοποίησης του πληθυσμού των παρατηρήσεων, αποτελεί ένα τρόπο για την αξιολόγηση της απόδοσης των οργανώσεων, από την άποψη των σχετικών αποδόσεών τους, είναι μια μη-παραμετρική μέθοδος ανάλυσης αποδοτικότητας, δεν οδηγεί σε ολική κατάταξη των πηγών, προτείνει όμως ποιες πηγές είναι καλύτερες από τις άλλες, καθορίζει την αποτελεσματικότητα κάθε πηγής ξεχωριστά επιλύοντας ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

Τα βάρη των κριτηρίων δεν τα καθορίζει ο χρήστης αλλά η μέθοδος αφού αποτελούν μεταβλητές της. Η βέλτιστη τιμή ενός κριτηρίου είναι είτε 1 (αποτελεσματική), είτε μεταξύ 0 και 1, προσδιορίζοντας δηλαδή τον βαθμό αναποτελεσματικότητας.

3.5 - Γιατί επιλέγουμε την διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης στην αξιολόγηση διαδρόμων όδευσης ηλεκτρικής ισχύος

Το πρόβλημα μελέτης μας έχει τα χαρακτηριστικά που καταγράψαμε στον παρακάτω πίνακα, βάσει των οποίων επιλέγουμε την μεθοδολογία AHP, που έχει δυνατότητα για δυαδικές συγκρίσεις χωρίς χρήση συναρτήσεων, επιτρέπει αντισταθμιστικά βάρη, και δίνει τιμές για κάθε εναλλακτική λύση.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστική προβλήματος παρούσας μελέτης

1) Είναι πρόβλημα μη-δυναμικό
2) Μελετάται περιορισμένος αριθμός εναλλακτικών (μικρότερος των εννέα)
3) Αφορά ομαδική λήψη απόφασης
4) Αφορά ολική προτίμηση για αυτό αποτελεί σύνθεση των κριτηρίων.
5) Κάθε κριτήριο συνεισφέρει στην τελική επιλογή με βάση την σημαντικότητά του για αυτό χρειάζεται αντισταθμιστικό μοντέλο πολυκριτηριακής ανάλυσης

6) Εξετάζονται ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια, δεν είναι εφικτός ο σχηματισμός συναρτήσεων χρησιμότητας για όλα τα κριτήρια, ενώ είναι εύκολη η δυαδική σύγκριση
7) Δεν υπάρχουν δεδομένα που να καθορίζουν κατώφλια προτίμησης, αδιαφορίας και βέτο
8) Το πρόβλημα αποδομείται με βάση τις παραμέτρους που το επηρεάζουν, για αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί με ιεραρχική δομή
9) Η ομάδα απόφασης δεν είναι ειδικό στις μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, για αυτό η μέθοδος προτιμάται να είναι εύκολα κατανοητή
10) Η πολυπλοκότητα του προβλήματος πιθανώς να οδηγήσει σε ασυνέπειες, για αυτό χρειάζεται η μέθοδος να υπολογίζει δείκτες με όρια ανοχής

3.6 – Επεξήγηση AHP

Στην ενότητα αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία της AHP. AHP ονομάζεται η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process, AHP) που προτάθηκε αρχικά από τον Thomas L. Saaty. Η μέθοδος AHP χαρακτηρίζεται από τις βασικές ιδιότητες που παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 3. Βασικές ιδιότητες μεθόδου AHP

1) Είναι αναλυτική, εμπεριέχει τόσο μαθηματική όσο και λογική αιτιολόγηση για τη λήψη αποφάσεων, δίνοντας αριθμητικές αξιολογήσεις
2) Δομεί το έκαστο πρόβλημα ιεραρχικά, με την από την αποδόμηση σε υπό-προβλήματα
3) Ορίζει μια ρητή διαδικασία για τη λήψη αποφάσεων. Η εμπειρία του εμπειρογνώμονα, ή των εμπειρογνομόνων, ενσωματώνονται στη διαδικασία για συλλογική λήψη αποφάσεων
4) Επιτρέπει δυαδική σύγκριση μεταξύ κριτηρίων
5) Για κάθε κριτήριο είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών επιλογών
6) Τα κριτήρια είναι ανεξάρτητα και συνεισφέρουν στην τελική επιλογή με βάση την σημαντικότητά τους

Η μεθοδολογία παρέχει τις δυνατότητες που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 4. Μεθοδολογία της μεθόδου AHP

1) Προσφέρει ένα αναλυτικό υπόβαθρο ανάδειξης και αξιολόγησης διαφορετικής φύσης παραγόντων κινδύνου. Μπορεί να διαχειριστεί ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια
2) Δέχεται αντισταθμιστικά βάρη
3) Είναι εύκολα αντιληπτή από μη εξειδικευμένο χρήστη, δεν μπερδεύει τον αναλυτή και την ομάδα απόφασης με δύσκολες έννοιες
4) Μέσω ιεραρχίας παρέχεται οπτικοποίηση του προβλήματος, καθιστώντας το απλούστερο στην κατανόηση
5) Παρέχει ανάλυση ευαισθησίας

Έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, με κυριότερα αυτά που παρατίθενται παρακάτω.

Πίνακας 5. Κυριότερα πλεονεκτήματα μεθόδου AHP

1) Απλή τεκμηρίωση
2) Εύκολη επαναληψιμότητα
3) Πολυκριτηριακός χαρακτήρας
4) Κατανόηση του υπό μελέτη προβλήματος, αποσυνθέτοντάς το μέσω της ιεραρχικής δομής
5) Δυνατότητα συνδυασμού τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών δεδομένων
6) Αξιοποίηση της εμπειρίας ειδικών
7) Δυνατότητα προσδιορισμού τυχόν ασυνεπειών στις κρίσεις των εμπειρογνώμων

Τα στάδια υλοποίησης της μεθόδου AHP συγκεντρώνονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 6. Στάδια Υλοποίησης AHP

1) Αποδόμηση του μελετώμενου προβλήματος σε επιμέρους στοιχεία (ο όρος στοιχεία αναφέρεται σε κριτήρια και εναλλακτικές) και κατάταξή τους σε ένα ιεραρχικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από τις βασικές συνιστώσες του, επιτρέποντας έτσι τις συγκρίσεις κατά ζεύγη. Οι συγκρίσεις πραγματοποιούνται με κοινή βάση την θεμελιώδη κλίμακα του Saaty
2) Συγκριτική αξιολόγηση κάθε συνιστώσας- κριτηρίου / υπό-κριτηρίου (στοιχείου), με δυαδική σύγκριση, ώστε να υπολογιστούν τα τοπικά βάρη (προτεραιότητες) τους, δηλαδή το πόσο σημαντικό είναι κάθε στοιχείο σε σχέση με τα υπόλοιπα μιας ομάδας της ιεραρχικής δομής
3) Σύνθεση των τοπικών βαρών (προτεραιοτήτων) σε ολική προτεραιότητα των κριτηρίων που αξιολογούνται, με σκοπό να παρθούν τα τελικά αποτελέσματα σε αριθμητική μορφή, για την κάθε εναλλακτική

Η AHP βασίζεται σε τρία αξιώματα:

Το 1ο αξίωμα, καλείται «αντίστροφο αξίωμα» και δηλώνει ότι εφόσον υπάρχει ένα ζεύγος στοιχείων a και b που θέλουμε να συγκρίνουμε, αν το c αναπαριστά την αριθμητική σχέση μεταξύ των a και b , τότε $1/c$ είναι η σχέση μεταξύ των b και a .

Το 2ο αξίωμα, καλείται “αξίωμα ομοιογένειας” και δηλώνει ότι τα στοιχεία που συγκρίνονται οφείλουν να μην παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Σε αντίθετη περίπτωση, το παραγόμενο αποτέλεσμα τείνει να παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα. Η ομοιογένεια αφορά κυρίως τις τιμές των μεταβλητών, αλλά ως ένα βαθμό και τους συντελεστές βαρύτητας. Ο λεκτικός προσδιορισμός σύγκρισης ανά ζεύγη στην AHP κυμαίνεται σε αριθμητική κλίμακα από 1 έως 9 κατά σειρά σπουδαιότητας. Η αριθμητική ή η γραφική μέθοδος που έχουν επιλέξει οι ειδικοί, αποδίδει συντελεστές βαρύτητας στα επιμέρους κριτήρια, επιτρέποντας έτσι τη «χαλάρωση» του αξιώματος. Σημειώνεται ότι μ’ αυτόν τον τρόπο αποδίδονται συντελεστές βαρύτητας στο διάστημα 0 έως 1, οι οποίοι έχουν άθροισμα ίσο με 1.

Το 3ο αξίωμα, καλείται “αξίωμα ανεξαρτησίας” και δηλώνει ότι οι αξιολογήσεις για τα στοιχεία, ή τα βάρη των στοιχείων σε μια ιεραρχία δεν εξαρτώνται από τα στοιχεία

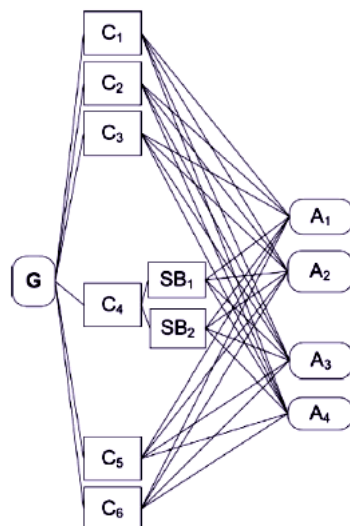
κατωτέρου επιπέδου. Αυτό το αξίωμα εφαρμόζεται μόνο στα πλαίσια μιας ιεραρχικής σύνθεσης. Ενώ τα δύο πρώτα αξιώματα είναι, εμπειρικά, απολύτως συνεπή με τις εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, το τρίτο αξίωμα χαίρει προσεκτικής εξέτασης και συχνά παραβιάζεται.

3.6.1 - Αποδόμηση προβλήματος – Καθορισμός Ιεραρχίας

Οι ιεραρχίες έχουν τον σημαντικότερο ρόλο, μελετώντας τις επιπτώσεις των εναλλακτικών αποφάσεων, όσον αφορά τους αντικειμενικούς στόχους ενός συστήματος. Περιγράφοντας το πρόβλημα ιεραρχικά, δύνανται να αναγνωριστούν όλοι οι σημαντικοί παράγοντες και τα επίπεδα στα οποία βρίσκονται καθώς και να μετρηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των επιπέδων.

Σε αυτό το στάδιο αποφασίζουμε ποιους παράγοντες θέλουμε να συμπεριλάβουμε στην ανάλυση. Είναι απαραίτητο να συμπεριλάβουμε αρκετές σχετικές πληροφορίες για να αναπαραστήσουμε το πρόβλημα όσο το δυνατόν πληρέστερα, αλλά να είμαστε σε θέση να το περιγράψουμε και για τις μικρές αλλαγές των στοιχείων του (Saaty, Vargas, 2012). Στην εικόνα 10 δείχνεται η δομή της AHP ιεραρχίας. Η ιεραρχία αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα:

- G: Απώτερος στόχος.
- C: Κύρια κριτήρια (παράγοντες) προς αξιολόγηση.
- SB: Υπό-κριτήρια που συνδέονται με τα κριτήρια.
- A: Οι διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις.



Εικόνα 10. Δομή AHP Ιεραρχίας. Πηγή: Samarakoon and Ratnayake, 2015.

3.6.2 - Εκτίμηση των σχετικών βαρών (προτεραιότητα) από την ομάδα απόφασης

Εδώ η μέθοδος υπολογίζει τα σχετικά βάρη (προτεραιότητα) των στοιχείων ενός επιπέδου, σε σχέση με τα στοιχεία του αμέσως προηγούμενου επιπέδου, βάσει των οποίων έγιναν οι συγκρίσεις. Το στάδιο αυτό ονομάζεται «συγκρίσεις κατά ζεύγη» (Pairwise Comparison).

Αυτό διεξάγεται με βοήθεια από τα μέλη της ομάδας απόφασης (εμπειρογνώμονες διαφορετικών ειδικοτήτων). Ένας κόμβος έχει προτεραιότητα έναντι ενός άλλου εάν συνεισφέρει, επηρεάζει ή ωφελείται περισσότερο σε σχέση με το γονικό κόμβο. Για να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε και να καταγράψουμε αυτές τις συγκρίσεις, δημιουργούμε πίνακες των συγκρίσεων κατά ζεύγη το πλήθος των οποίων είναι ίσο με τους κόμβους του δέντρου της ιεραρχίας, εξαιρώντας τις εναλλακτικές λύσεις.

3.6.2.1 – Κλίμακα σύγκρισης κατά ζεύγη

Στο στάδιο αυτό συγκρίνονται και βαθμολογούνται σε κλίμακα από 1 έως 9 οι εναλλακτικές λύσεις ως προς το κάθε υπό-κριτήριο και οι τιμές καταγράφονται σε πίνακες, ένας για τα κύρια κριτήρια και οι υπόλοιποι για τα υπό-κριτήρια κάθε επιπέδου. Για αυτή την αξιολόγηση συλλέγονται κρίσεις από ειδικούς σχετικών ειδικοτήτων.

Αν οι αξιολογήσεις διαφέρουν μεταξύ των μελών αξιολόγησης, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γεωμετρική μέση τιμή (\bar{w}) των διαφορετικών αξιολογήσεων, για την εύρεση της μέσης τιμής κρίσης. Ο γεωμετρικός μέσος όρος δίνεται από την Εξ. (1):

$$\bar{w} = \left(\prod_{i=1}^n w_i \right)^{1/n} = \sqrt[n]{w_1 w_2 w_3 \cdots w_n} \quad \text{Εξ. (1)}$$

όπου w_i ο συντελεστής βαρύτητας κριτηρίου.

Πίνακας 7. Κλίμακα σύγκρισης κατά ζεύγη που παρουσιάζεται από τον Saaty

Τιμή	Σημασία
1	Τα δύο στοιχεία απόφασης έχουν την ίδια σημασία
3	Το επιλεγμένο στοιχείο απόφασης είναι ασθενώς πιο σημαντικό από το άλλο
5	Το επιλεγμένο στοιχείο απόφασης είναι αρκετά πιο σημαντικό από το άλλο
7	Το επιλεγμένο στοιχείο απόφασης είναι πολύ πιο σημαντικό από το άλλο
9	Το επιλεγμένο στοιχείο απόφασης είναι απολύτως πιο σημαντικό από το άλλο
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες τιμές

3.6.2.2 - Βήματα για την εξέλιξη του Πίνακα σύγκρισης κατά ζεύγη (PCM):

I. Αρχικά συμπληρώνονται τα στοιχεία που βρίσκονται πάνω στη διαγώνιο του Πίνακα και έχουν όλα την τιμή ένα.

II. Στη συνέχεια συμπληρώνεται η επάνω τριγωνική μήτρα.

III. Ο κάτω τριγωνικός Πίνακας συμπληρώνεται χρησιμοποιώντας τις αντίστροφες τιμές από τον επάνω τριγωνικό Πίνακα, σύμφωνα με την κλίμακα του Saaty.

$$P = \left\{ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9} \right\} \quad \text{Εξ. (2)}$$

όπου:

- 1 = ισοδύναμα.
- 3 = ασθενής προτίμηση.
- 5 = ισχυρή προτίμηση.
- 7 = πολύ ισχυρή προτίμηση.
- 9 = απόλυτη προτίμηση.
- 2, 4, 6, 8 ενδιάμεσες τιμές, ενώ οι αντίστροφοί τους εκφράζουν αντίθετη προτίμηση.

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη, ότι τα στοιχεία του Πίνακα συγκρίσεων της αριστερής στήλης συγκρίνονται με τα στοιχεία της πάνω σειράς. Δηλαδή συγκρίνονται πόσο καλύτερο (ή χειρότερο) είναι το στοιχείο της στήλης σε σχέση με το στοιχείο της γραμμής.

Ο Πίνακας συγκρίσεων, n κριτηρίων, συμβολίζεται ως $A_{n \times n} = [a_{ij}]$ και φαίνεται όπως παρακάτω:

Πίνακας 8. Πίνακας σύγκρισης κατά ζεύγη, Pairwise Comparison Matrix (PCM)

Κριτήριο	1	2	i	n
1	a_{11}	a_{12}	\cdots	a_{1n}
2	a_{21}	a_{23}		a_{2n}
j	\vdots		\ddots	\vdots
n	a_{n1}	a_{n2}	\cdots	a_{nn}

όπου, n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται.

Αν $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$, τότε $a_{ii} = 1$ συγκρίσεις στοιχείων με τον εαυτό τους,

$a_{ij} = 1 / a_{ji}$ για κάθε ij , $a_{ii} > 1$ όταν στοιχείο i προτιμάται έναντι του j ,

$a_{ii} < 1$, όταν στοιχείο j προτιμάται έναντι του i .

3.6.3 - Συνδυασμός των επιμέρους σχετικών βαρών των κριτηρίων, αξιολόγηση των εναλλακτικών ενεργειών

Σε αυτό το στάδιο γίνεται συνδυασμός των σχετικών βαρών των στοιχείων από όλα τα επίπεδα, για να υπολογιστούν τα βάρη των εναλλακτικών αποφάσεων του τελευταίου επιπέδου της ιεραρχίας. Τα βάρη αυτά θεωρούνται ως το σκορ της κάθε εναλλακτικής απόφασης. Η τελική αξιολόγηση γίνεται βάσει της κατάταξης των εναλλακτικών αποφάσεων από τις καλύτερες προς τις χειρότερες (ιεραρχικά).

Η τελική βαθμολογία αξιολόγησης των διάφορων εναλλακτικών, προκύπτει από τη σχέση:

$$W_{Tot,i} = \sum_j^n (w_j R_{ij}) \quad \text{Εξ. (3)}$$

όπου $W_{Tot,i}$ είναι η ολική προτεραιότητα της εναλλακτικής i , w_j ο τοπικός συντελεστής βαρυτήτων του κριτηρίου j , R_{ij} η τοπική βαθμολογία της λύσης i ως προς το κριτήριο j . Όταν υπάρχουν δύο επίπεδα κριτηρίων, το w_j είναι η προτεραιότητα μονοπάτι που υπολογίζεται αρχίζοντας από το δεύτερο επίπεδο κριτηρίου και πολλαπλασιάζοντας κάθε προτεραιότητα με την αντίστοιχη προτεραιότητα του γονικού κριτηρίου.

Πρόκειται, για πράξεις πολλαπλασιασμού των πινάκων προτεραιοτήτων, ακολουθώντας ιεραρχικά το κατώτερο προς το ανώτερο επίπεδο. Με αυτή τη διαδικασία εκφράζουμε τις προτεραιότητες (βάρη) των εναλλακτικών λύσεων. Ο πίνακας των βαρών ενός επιπέδου ιεραρχίας πολλαπλασιάζεται με το διάνυσμα βαρών του ανώτερου επιπέδου, κ.ο.κ..

Τέλος, οι υπολογισμοί επαληθεύονται και με μια ανάλυση ευαισθησίας στα τελικά αποτελέσματα καθώς και στα υπό σύγκριση κριτήρια, έτσι ώστε να περιλαμβάνεται και η αβεβαιότητα ως προς την αξιολόγηση της σημαντικότητας των διαφόρων κριτηρίων.

3.6.4 - Έλεγχος Συνέπειας

Ο έλεγχος Συνέπειας αφορά το πρόβλημα της αποδοχής/απόρριψης πινάκων και έχει συζητηθεί πολύ, ειδικά η σχέση μεταξύ της συνέπειας και της κλίμακας που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των κρίσεων της ομάδας λήψης αποφάσεων.

Όταν πραγματοποιούμε τις συγκρίσεις (ιδίως σε μεγάλο πλήθος κριτηρίων), ίσως να παρατηρήσουμε ότι υπάρχει ασυνέπεια στις βαθμολογήσεις (σκορ που αποδίδουμε σε κάθε κριτήριο), το οποίο δημιουργεί αναξιопιστία. Για αυτό προβλέπεται να υπολογίζουμε το επίπεδο ασυνέπειας για κάθε πίνακα προτιμήσεων. Γενικά έχει συμφωνηθεί ότι το επίπεδο συνέπειας θα πρέπει να είναι μικρότερο του 10%. Εάν κάποιος πίνακας είναι ασυνεπής, η ομάδα απόφασης οφείλει να αναθεωρήσει τα στοιχεία της.

Ένας τρόπος εξαγωγής του διανύσματος των προτεραιοτήτων είναι σύμφωνα με τον Πίνακα **A** (Εξ. (4)). Στην AHP τα βάρη υπολογίζονται με την μέθοδο ιδιοδιανυσμάτων, **Eigenvector μέθοδος**, σε άμεση σχέση με την **συνέπεια, consistency**.

Αναλυτικότερα, αν η ομάδα απόφασης γνωρίζει από πριν τα πραγματικά βάρη των στοιχείων απόφασης που συγκρίνονται, ο Πίνακας των κατά ζεύγη προτιμήσεων θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & w_2/w_3 & \dots & w_2/w_n \\ w_3/w_1 & w_3/w_2 & w_3/w_3 & \dots & w_3/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_3 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. (4)}$$

όπου τα βάρη είναι $\mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_n]^T$

Για ένα τέτοιο πίνακα ισχύουν τα παρακάτω γινόμενα διανυσμάτων, όπου " · " συμβολίζει εσωτερικό γινόμενο.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = n\mathbf{w}$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & w_2/w_3 & \dots & w_2/w_n \\ w_3/w_1 & w_3/w_2 & w_3/w_3 & \dots & w_3/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_3 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ nw_3 \\ \vdots \\ nw_n \end{bmatrix} = n\mathbf{w}$$

Εξ. (5)

όπου n είναι ιδιοτιμή του Πίνακα **A**.

Η Γραμμική άλγεβρα ορίζει τα n και w ως προς την μέγιστη ιδιοτιμή και το ιδιοδιάνυσμα του Πίνακα **A**. Ως δεξιό ιδιοδιάνυσμα ενός τετραγωνικού Πίνακα **A** ορίζεται κάθε διάνυσμα n που ικανοποιεί την σχέση $\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = n\mathbf{w}$ (εσωτερικό γινόμενο των πινάκων **A**, **w**),

Ο αριθμός των μη μηδενικών ιδιοτιμών ισούται με τον βαθμό (rank) του Πίνακα **A**.

Το γινόμενο Πίνακα **A**_{3x3}, με το διάνυσμα βαρών $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ w_3]^T$ δίνει ένα νέο διάνυσμα βαρών:

$$\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ b_3]^T \quad \text{Εξ. (6)}$$

όπου

$$b_1 = a_{11}w_1 + a_{12}w_2 + a_{13}w_3$$

$$b_2 = a_{21}w_1 + a_{22}w_2 + a_{23}w_3$$

$$b_3 = a_{31}w_1 + a_{32}w_2 + a_{33}w_3$$

Διαιρώντας κάθε στοιχείο του διανύσματος **B** με το αντίστοιχο στοιχείο του διανύσματος βάρους **w** προκύπτει το νέο διάνυσμα

$$\mathbf{c} = [b_1 / w_1 \quad b_2 / w_2 \quad b_3 / w_3]^T = [c_1 \quad c_2 \quad c_3]^T \quad \text{Εξ. (7)}$$

Το λ_{max} είναι η μέση τιμή των στοιχείων του διανύσματος **c**

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad \text{Εξ. (8)}$$

όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται.

Χαρακτηρίζουμε ένα **Πίνακα ως συνεπή, consistent**, αν για τα στοιχεία του ισχύει

$$a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik} \quad (\forall i, j, k) \quad \text{Εξ. (9)}$$

Όταν τα βάρη δεν είναι γνωστά, ο Πίνακας πιθανόν να είναι **ασυνεπής**.

Για να ελέγξουμε εάν οι κρίσεις είναι συνεπείς, πραγματοποιείται μια ανάλυση συνέπειας:

«Καθώς ο Πίνακας **A** έχει μια ειδική μορφή (η κάθε σειρά είναι σταθερό πολλαπλάσιο της πρώτης σειράς), ο βαθμός (rank) του Πίνακα είναι ένα, και εκτός από μία ιδιοτιμή, όλες οι άλλες ιδιοτιμές του Πίνακα **A** είναι μηδέν. Ωστόσο, ως το άθροισμα από τις ιδιοτιμές ενός θετικού Πίνακα είναι ίσο με το ίχνος (trace) του Πίνακα, η μη μηδενική ιδιοτιμή έχει την τιμή του n (δηλαδή, το μέγεθος του Πίνακα). Αυτή αναφέρεται ως λ_{max} και χρησιμοποιείται για ανάλυση συνέπειας». Εάν υπάρχουν μικρά λάθη και ασυνέπειες στις κρίσεις και, ο Πίνακας **w** δεν είναι γνωστός και οι τιμές για το PCM έχουν εκτιμηθεί, τότε το πρόβλημα ιδιοτιμής για την ασυνεπή περίπτωση δίνεται από:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = \lambda_{max} \mathbf{w} \quad \text{Εξ. (10)}$$

όπου $\lambda_{max} \geq n$ όταν ο Πίνακας **A** είναι ασυνεπής, δηλαδή δεν ισχύει ότι για όλα τα στοιχεία του η σχέση $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$ για κάθε i, j, k και τα άλλα λ είναι περίπου μηδέν ($\lambda \sim 0$). Το λ_{max} είναι το πρωτεύον ιδιοδιάνυσμα, είναι εκείνο που αντιστοιχεί στην μέγιστη ιδιοτιμή του Πίνακα **A**.

«Οι εκτιμήσεις των βαρών για τις δραστηριότητες υπολογίζονται κανονικοποιώντας το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ιδιοτιμή της Εξ. (10) σύμφωνα με την Εξ. (11). Η κανονικοποίηση εκτελείται με άθροιση κάθε στήλης και στη συνέχεια

διαίρεση κάθε καταχώρησης (κελί) της στήλης με το αντίστοιχο άθροισμα στηλών». Η διαδικασία κανονικοποίησης δίνεται από:

$$\alpha' = [\alpha'_{ij}] \text{ όπου } \alpha'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \quad \forall (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n) \quad \text{Εξ. (11)}$$

Η μέση τιμή σε κάθε σειρά του κανονικοποιημένου πίνακα υπολογίζεται για να ληφθούν τα σχετικά βάρη ή ιδιοδιάνυσμα, από το οποίο καθορίζεται. Όσο πιο συνεπείς είναι οι κρίσεις, τόσο πιο κοντά το λ_{max} είναι στο n (n είναι το πλήθος των εναλλακτικών λύσεων). Αυτό σημαίνει ότι αν υπάρχει τέλεια συνέπεια τότε $\lambda_{max} = n$ (λόγω της συνέπειας όλες οι στήλες του κανονικοποιημένου πίνακα έχουν ίδιες τιμές και το \mathbf{w} ισούται με οποιαδήποτε στήλη, όπως στην Εξ. (12):

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_k] \text{ όπου } w_k = \sum_{i=1}^n \frac{a'_{ij}}{n} \text{ για } (1 \leq i \leq n) \quad \text{Εξ. (12)}$$

όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται.

Το διάνυσμα προτεραιοτήτων υπολογίζεται με την μέθοδο ιδιοδιανυσμάτων με τα ακόλουθα βήματα, που επαναλαμβάνονται έως η διαφορά δύο διαδοχικών υπολογισμών να είναι μικρότερη από μια καθορισμένη ακρίβεια:

1. Ύψωση του Πίνακα \mathbf{A} στο τετράγωνο.
2. Υπολογισμός του αθροίσματος κάθε σειράς του πίνακα και κανονικοποίηση

$$3. \quad \mathbf{W} = [\mathbf{w}_k] \text{ όπου } w_k = \frac{\sum_{i=1}^n a'_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a'_{ij}} \text{ για } (1 \leq i \leq n) \quad \text{Εξ. (13)}$$

Επομένως, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η διαφορά ($\lambda_{max} - n$) ως **μέτρο ασυνέπειας**.

Στην AHP, η συνέπεια των βαρών αξιολογείται από την **αναλογία συνέπειας (CR)**. Ο Saaty παρατηρεί ότι όσο πιο μεγάλη η διαφορά ($\lambda_{max} - n$) τόσο περισσότερες είναι οι ασυνέπειες.

Ο **δείκτης συνέπειας - Consistency index (CI)**, σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, ορίζεται στην Εξ. (14) και αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των υπόλοιπων ιδιοτιμών. Αν ο πίνακας είναι συνεπής ισχύει ότι $CI=0$, ενώ αν είναι ασυνεπής, $CI>0$:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Εξ. (14)}$$

όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται.

«Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για να εξαχθεί μια ουσιαστική ερμηνεία του CI, έχουν προσομοιωθεί τυχαίες συγκρίσεις ανά ζεύγη για διαφορετικά μεγέθη πινάκων. Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό των CI και καταλήγοντας σε ένα μέσο CI για τυχαίες κρίσεις για κάθε μέγεθος πίνακα (αναφέρεται ως τυχαίο δείκτης συνέπειας **random consistency index (RCI)**».

Το μέγεθος του Πίνακα **A** έναντι του RCI απεικονίζεται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Μέγεθος του πίνακα σε σχέση με τιμές του τυχαίου δείκτη συνέπειας RCI. Όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15
RCI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.56	1.57	1.59

Ο **λόγος συνέπειας Consistency Ratio (CR)** για αν κριθεί αν είναι αποδεκτός, υπολογίζεται από την σύγκριση μεταξύ του μέσου όρου ενός συνόλου κρίσεων με την τιμή του RCI, όπως φαίνεται στην στην Εξ. (15),

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad \text{Εξ. (15)}$$

Εμπειρικά έχει αποδειχθεί ότι οι κρίσεις είναι συνεπείς εάν $CR < 0.1$ (10%).

Αυτό σημαίνει ότι αν CR είναι μεγαλύτερο από 10% οι υποκειμενικές κρίσεις θα πρέπει να επανελεγχθούν, αν δεν χρήζουν αλλαγών σημαίνει ότι το πρόβλημα χρειάζεται περισσότερη μελέτη και περισσότερα δεδομένα. Εκτός την αυθαίρετη επιλογή του ορίου 0.1 ως προς το όριο συνέπειας στον λόγο του Saaty, έχουν αναπτυχθεί και άλλες εναλλακτικές μέθοδοι ελέγχου συνέπειας των συγκρίσεων.

Σύμφωνα με τους Alonso και Lamata (2006), ο πίνακας είναι συνεπής αν η τιμή λ_{max} είναι μικρότερη ίση από μια τιμή αποδοχής, όπως δίνεται στην Εξ. (16) που εξαρτάται από το μέγεθος του πίνακα και το όριο συνέπειας που έχει επιλέξει ο λήπτης απόφασης.

$$\lambda_{max} \leq n + \alpha(1.7699n - 4.3513) \quad \text{Εξ. (16)}$$

όπου α το όριο συνέπειας που επιλέγεται και n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται.

Έχει δειχθεί (Lane, Verdini, 1989) ότι χρησιμοποιώντας μια κλίμακα 9 σημείων, το όριο CR του Saaty είναι πολύ περιοριστικό λόγω της τυπικής απόκλισης του δείκτη CI για τυχαία δημιουργημένους πίνακες.

Πίνακας 10. Μέγεθος του πίνακα σε σχέση με τιμές αποδοχής συνέπειας με τη μέθοδο των Alonso και Lamata, 2006. Όπου n το πλήθος των στοιχείων που συγκρίνονται

	Όριο συνέπειας	0.01	0.05	0.08	0.1	0.2	0.5
$n = 3$	<i>λ_{max}</i>	3.0096	3.0479	3.0766	3.0958	3.1916	3.4789

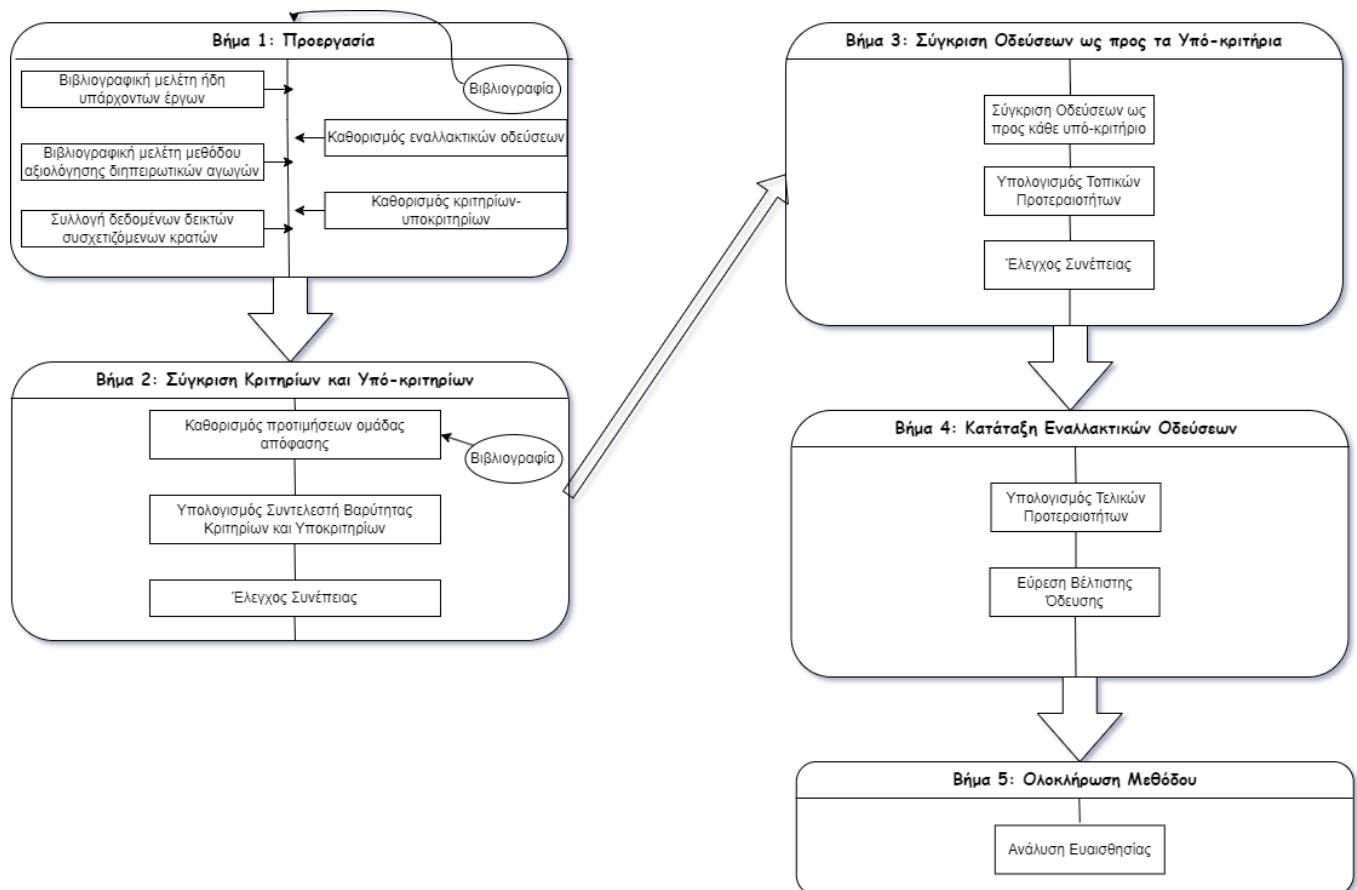
Η μη αυτοματοποιημένη ανάλυση (χωρίς λογισμικό) με AHP απαιτεί χρόνο και υπάρχει πιθανότητα λανθασμένου υπολογισμού. Υπάρχουν εφαρμογές λογισμικού της AHP, όπως για παράδειγμα το λογισμικό της SpiceLogic¹⁰. Το Analytic Hierarchy Process Software της SpiceLogic είναι λογισμικό λήψης αποφάσεων που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια, εφαρμόζει τη Μεθοδολογία Αναλυτικής Ιεραρχίας (AHP). Το λογισμικό παρέχεται δοκιμαστικά (shareware) από την εταιρία SpiceLogic.

¹⁰ <https://www.spicelogic.com/Products/ahp-software-30>

Κεφάλαιο 4 – Υλοποίηση περίπτωσης μελέτης

4.1 – Μεθοδολογία έρευνας

Η μεθοδολογία που ακολουθούμε για την υλοποίηση της παρούσας μελέτης κρίνουμε ότι πρέπει να διαχωριστεί στα ακόλουθα πέντε διαδοχικά βήματα. Στο βήμα 1 θα γίνουν οι απαραίτητες προεργασίες για συλλογή δεδομένων και στα υπόλοιπα 4 βήματα θα εφαρμοστεί η απαιτούμενη μεθοδολογία της ΑΗΡ.



Εικόνα 11. Διάγραμμα μεθοδολογίας υλοποίησης της εργασίας.

Παρακάτω αναλύεται ξεχωριστά το κάθε βήμα:

Στο **Βήμα 1**, γίνεται βιβλιογραφική έρευνα για τα ακόλουθα θέματα:

- Πραγματοποιείται βιβλιογραφική έρευνα δημοσιευμένων μεθόδων αξιολόγησης έργων διηπειρωτικής όδευσης ενέργειας (όπως πετρελαίου, φυσικού αερίου, ηλεκτρικής ισχύος), μελετών – προβλημάτων που έχουν διαπιστωθεί στην πράξη. Μελετάται η γεωγραφία της περιοχής ενδιαφέροντος, τα σύνορα των κρατών και καταγράφονται τα υποψήφια κράτη όδευσης (κράτη διακομιδής).

- Μελετώνται βιβλιογραφικά οι ήδη υφιστάμενοι και προτεινόμενοι διηπειρωτικοί αγωγοί ηλ. Ισχύος, αποκτώντας έτσι ξεκάθαρη εικόνα πιθανής αλληλεπίδρασης του έργου αυτού με άλλα.
- Συλλέγονται στατιστικά δεδομένα δεικτών κινδύνου των κρατών διακομιδής, βοηθώντας έτσι στη διαμόρφωση της εικόνας της πολιτικής, εμπορικής και γεωπολιτικής σταθερότητας των κρατών διέλευσης των εναλλακτικών μας οδεύσεων.

Στο **Βήμα 2**, με την ιδιότητα της ομάδας απόφασης, δημιουργούνται οι πίνακες δυαδικών συγκρίσεων μεταξύ των κύριων κριτηρίων αλλά και των υπό-κριτηρίων υπό την κλίμακα Saaty της AHP. Με το ρόλο αναλυτή, υπολογίζονται με τα μαθηματικά της μεθόδου AHP οι συντελεστές των υπό-κριτηρίων και κριτηρίων, πραγματοποιείται έλεγχος συνέπειας για κάθε πίνακα σύγκρισης και διορθώνονται οι πίνακες σύγκρισης μέχρι να ικανοποιούν το κριτήριο συνέπειας Saaty.

Στο **Βήμα 3**, με την ιδιότητα της ομάδας απόφασης, καταδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε εναλλακτικής όδευσης ως προς κάθε υπό-κριτήριο ως προς την κλίμακα Saaty και δημιουργούνται εκ νέου πίνακες δυαδικών συγκρίσεων, οι οποίοι συμπληρώνονται.

Με την ιδιότητα του αναλυτή, πραγματοποιείται έλεγχος συνέπειας για κάθε πίνακα σύγκρισης, από τους πίνακες δυαδικής σύγκρισης οδεύσεων, και υπολογίζονται οι τοπικές προτεραιότητές τους ως προς κάθε υπό-κριτήριο.

Στο **Βήμα 4**, με την ιδιότητα του αναλυτή, από τα αποτελέσματα των βημάτων 2 και 3 (συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων και υπό-κριτηρίων, τοπικές προτεραιότητες των οδεύσεων ως προς κάθε υπό-κριτήριο), υπολογίζονται οι ολικές προτεραιότητες των εναλλακτικών οδεύσεων έτσι ώστε να καταταγούν και να προσδιοριστεί έτσι η βέλτιστη όδευση.

Στο **Βήμα 5**, με την ιδιότητα του αναλυτή, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων.

4.2 – Γεωπολιτική ανάλυση της περίπτωσης μελέτης

Η περίπτωση μελέτης που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, σύμφωνα με τους ορισμούς που δόθηκαν στην παράγραφο 1.4.1, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά για κάθε γεωπολιτικό όρο:

Γεωπολιτικά Υπερσυστήματα: Κράτη μέλη της ΕΕ, ΗΠΑ, Ρωσία, Κίνα.

Γεωπολιτικά Υποσυστήματα: Κράτη όδευσης με την Κρήτη ως τελικό σύνδεσμο με την ΕΕ

1. Αίγυπτος – Ισραήλ – Κύπρος – Κρήτη (σε σειρά).
2. Αίγυπτος – Λιβύη – Κρήτη (σε σειρά).
3. Αίγυπτος – Κρήτη, παράλληλα με όδευση Ισραήλ -Κύπρος-Κρήτη (με κόμβο την Κρήτη)

Γεωπολιτικός Παράγον:

Έργο διηπειρωτικής διασύνδεσης ηλεκτρικής ισχύος Αφρικής – ΕΕ μέσω Κρήτης.

4.2.1 – Σενάρια όδευσης ηλεκτρικής ισχύος

Θα μελετηθούν τρία διαφορετικά σενάρια όδευσης της ισχύος, με αρχικό σημείο διέλευσης την Αφρική και τελικό την Ευρώπη, όπου όλα τα μονοπάτια διέλευσης θα περνούν από την Κρήτη. Συγκεκριμένα θα γίνει λόγος για τρία ήδη υπαρκτά project υπό μελέτη αυτή τη στιγμή.

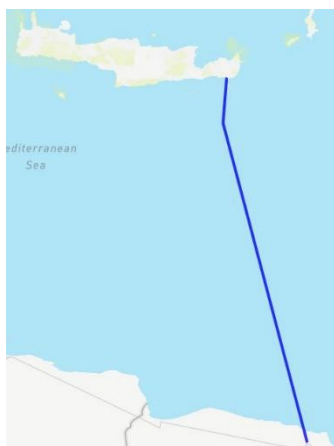
4.2.1.1 - Σενάριο A1: Αίγυπτος – Κρήτη – Ευρώπη Project GAP Interconnector¹¹

Το έργο αναφέρεται στην κατασκευή μιας υποθαλάσσιας ζεύξης μεταφοράς συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, συνολικής ισχύος 2000 MW (2x1000 MW), η οποία θα διασυνδέει τις ακτές της Βόρειας Μεσογείου της Αιγύπτου με την Ελλάδα στο νησί της Κρήτης. Ένας νέος σταθμός μετατροπής HVDC κοντά στον ήδη υπάρχοντα θερμοηλεκτρικό σταθμό του Αθερινόλακκου στη Νοτιοανατολική Κρήτη αναμένεται να είναι το σημείο σύνδεσης με την Ελλάδα.

Η ηλεκτρική διασύνδεση της Κρήτης με την ηπειρωτική Ελλάδα είναι ήδη υπό εξέλιξη από τον ελληνικό ΔΣΜ (ΑΔΜΗΕ), με τις εργασίες υλοποίησης να αναμένεται να ολοκληρωθούν πριν το 2030 (ζεύξεις AC και DC). Επιπλέον, το έργο «Southern Aegean Interconnector» θα παρέχει μια άλλη διαδρομή μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος μέσω του Αιγαίου Πελάγους. Το σημείο σύνδεσης στην Αίγυπτο θα βρίσκεται στη βόρεια ακτή της, νότια δηλαδή της Κρήτης, εκεί όπου υπάρχει το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρικού φορτίου της Αιγύπτου αλλά και της ήδη υπάρχουσας υποδομής του δικτύου μεταφοράς HVDC.

Το προτεινόμενο έργο διασύνδεσης Ελλάδας - Αφρικής θα είναι σε θέση να παρέχει ενεργειακή σταθερότητα στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου καθώς θα διευκολύνει τις διηπειρωτικές μεταφορές ενέργειας και η ηλεκτρική επάρκεια παραγωγής της περιφέρειας θα αυξηθεί.

¹¹ <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/1048>



Εικόνα 12. GAP Interconnector.

4.2.1.2 - Σενάριο A2: Αίγυπτος – Λιβύη – Κρήτη – Ευρώπη Project LEG1 Interconnector¹²

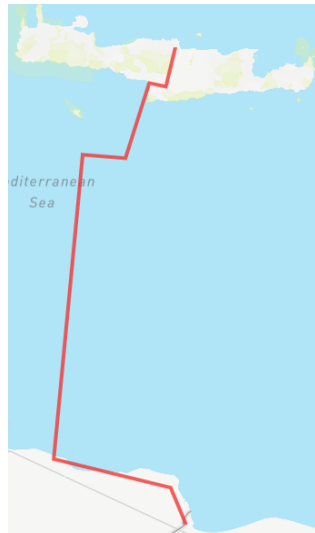
Το LEG1 (Libya-Egypt-Greece) είναι ένα έργο υποθαλάσσιου καλωδίου διασύνδεσης HVDC ελάχιστης ισχύος 2000 MW, που επιτρέπει την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ Ευρώπης και των χωρών της Νοτιοανατολικής Μεσογείου.

Η αμφίδρομη διασύνδεση θα συνδέει τη Λιβύη και την Αίγυπτο, μέσω Tobruk, στην Κρήτη (Ελλάδα) που επιτρέπει στην Ευρώπη να διασυνδεθεί με υπάρχοντα/προγραμματισμένα περιφερειακά δίκτυα.

Το LEG1 δημιουργεί ένα νέο χώρο ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας που επιτρέπει η Ευρώπη να εξαγάγει πλεονάσματα παραγωγής σε μια αγορά που εξυπηρετεί πάνω από 500 εκατομμύρια χρήστες της Βόρειας Αφρικής με υψηλή ηλεκτρική ενέργεια ζήτηση.

Υποστηρίζει επίσης τους στόχους της Ευρώπης για την ενεργειακή ασφάλεια και το κλίμα με την πρόσβαση στο δυναμικό παραγωγής ΑΠΕ στη Λιβύη, Αίγυπτο και Σαουδική Αραβία.

¹² <https://www.greenpower2020.net/>



Εικόνα 13. LEG1 Interconnector.

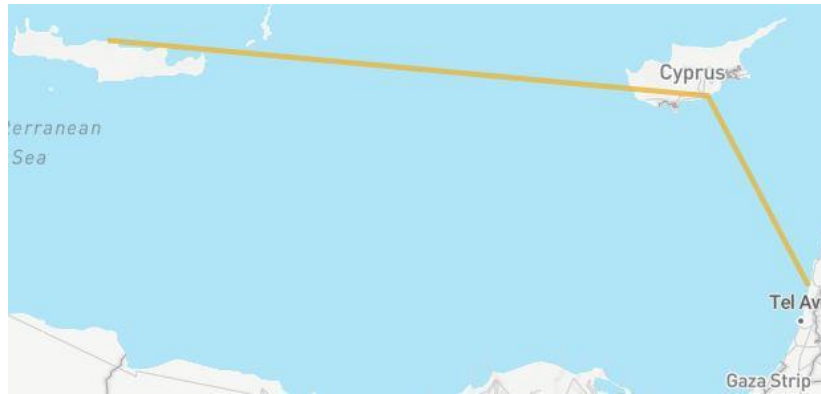
4.2.1.3 - Σενάριο A3: Ισραήλ – Κύπρος – Κρήτη - Ευρώπη Project EuroAsia Interconnector¹³

Το EuroAsia Interconnector θα είναι ένα υποβρύχιο καλωδιακό σύστημα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) συνολικού μήκους περίπου 1518 km. Θα αποτελείται από τρία τμήματα: ένα ελληνοκυπριακό τμήμα, ένα κυπριακό-ισραηλινό τμήμα και ένα ελληνό-ισραηλινό τμήμα.

Μόλις ολοκληρωθεί, η διασύνδεση θα επιτρέψει τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των τριών χωρών. Θα έχει χωρητικότητα 2000 MW και θα συμβάλει στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και στην προώθηση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην περιοχή.

Το EuroAsia Interconnector αναμένεται να ενισχύσει την ενεργειακή συνεργασία και να ενισχύσει τους στενότερους δεσμούς μεταξύ Ελλάδας, Κύπρου και Ισραήλ. Θα διευκολύνει την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα υποστηρίξει την ανάπτυξη έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και θα προωθήσει την αποτελεσματική χρήση των ενεργειακών πόρων στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου.

¹³ <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/219>



Εικόνα 14. EuroAsia Interconnector.

4.2.2 – Καθορισμός κριτηρίων και υπό-κριτηρίων

Λαμβάνοντας υπόψη την αποτίμηση των παραγόντων των κινδύνων σε παρόμοια έργα διασυννοριακών αγωγών πετρελαίου και ΦΑ, τη σχετική βιβλιογραφία¹⁴, καθώς και τον στόχο της δικής μας εργασίας (που είναι η μέγιστη ενεργειακή ασφάλεια της ΕΕ και η γεωπολιτική αναβάθμισή της ΕΕ), ξεκινήσαμε την εργασία καθορισμού των κριτηρίων και υπό-κριτηρίων.

4.2.2.1 – Καθορισμός προτιμήσεων ομάδας απόφασης

Παράγοντας ενεργειακής ασφάλειας: Στην παρούσα μελέτη, ο στόχος της ομάδας απόφασης είναι η διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας της ΕΕ και η γεωπολιτική αναβάθμιση κρατών της ΕΕ, για αυτό οι παράγοντες πιθανού κινδύνου έργου είναι οι ισχυρότεροι όλων των υπόλοιπων παραμέτρων του έργου, καθώς και η διαφοροποίηση της όδευσης από κράτη διακομιδής άλλων αγωγών ενέργειας προς την ΕΕ.

Το φάσμα κινδύνων εξαρτάται από πολλές διαστάσεις, όπως:

- Πολιτική σταθερότητα.
- Οικονομική σταθερότητα.
- Κοινωνική κατάσταση.
- Εξάρτηση των κρατών διακομιδής από τρίτες χώρες.
- Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι.
- Ρυθμιστικό πλαίσιο.

Παράγοντας γεωπολιτική αναβάθμιση της ΕΕ: Η γεωπολιτική αναβάθμιση κρατών της ΕΕ μεταξύ άλλων, ενισχύει και την ενεργειακή ασφάλεια. Αφορά την διέλευση της όδευσης μέσω της κατά το δυνατό περισσότερων κρατών της ΕΕ.

Παράγοντας επάρκειας κρατικής υποδομής σε συγκοινωνίες και ηλεκτρική ενέργεια: Η ποιότητα συντήρησης του έργου επηρεάζεται ως ένα βαθμό από την εύκολη πρόσβαση, μεταφορικά μέσα, υποδομές δρόμων και αεροδρομίων, καθώς και την επαρκή παροχή ηλεκτρικής ισχύος του κράτους διέλευσης. Θα μπορούσε να

¹⁴ <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28053.pdf> | <https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/handle/11400/4990>

αποτελέσει κριτήριο αξιολόγησης, όμως λιγότερο σημαντικού από εκείνο των κινδύνων.

4.2.2.2 – Καθορισμός κυρίων κριτηρίων

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, τα **κύρια κριτήρια**, τα οποία τελικά επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε στο υπό μελέτη θέμα είναι:

- C1: Γεωπολιτικά Κριτήρια,
- C2: Γεω-Περιβαλλοντικά κριτήρια,
- C3: Κριτήρια Εμπορικότητας Έργου,
- C4: Κοινωνικά Κριτήρια,
- C5: Τεχνοοικονομικά Κριτήρια.

Κύριος λόγος επιλογής των συγκεκριμένων κριτηρίων είναι η πολύπλευρη ανάλυση του θέματος που επιθυμείται να λάβει χώρα. Διαλέγοντας έτσι τις συγκεκριμένες κατηγορίες ως κύρια κριτήρια, είμαστε πλέον σε θέση να εξετάσουμε σφαιρικά το θέμα.

4.2.2.3 – Καθορισμός υπό-κριτηρίων

Όσον αφορά τα υπό-κριτήρια, στόχος είναι η ομοιογένεια ανάμεσα στα 5 προεπιλεγέντα κριτήρια, κι έτσι επιλέγονται 3 υπό-κριτήρια για κάθε κριτήριο. Συνεπώς, παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τα υπό-κριτήρια:

Πίνακας 11: Σύνθετα κριτήρια και πρωτογενείς μεταβλητές προβλήματος

Κύριο κριτήριο	Υπό-κριτήριο		
Γεωπολιτικά	C1	Πολιτική σταθερότητα	C1α
		Διεθνείς Σχέσεις	C1β
		Γεωστρατηγικές εμπλοκές/συγκρούσεις	C1γ
Γεωπεριβαλλοντικά	C2	Αποτύπωμα άνθρακα CO ₂	C2α
		Νομοθετικές απαγορεύσεις διέλευσης έργων από προστατευόμενες ή περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές / Οικοσυστήματα	C2β
		Περιορισμοί διέλευσης έργων από θαλάσσιες ζώνες λόγω αμφισβήτησης κυριαρχικών δικαιωμάτων.	C2γ
Εμπορικότητα	C3	Σχέση κόστους/αποτελεσματικότητας	C3α
		ROI (Return on Investment)	C3β
		Μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα	C3γ

Κοινωνικά	C4	Δημόσια Υγεία και Ασφάλεια	C4α
		Δημιουργία θέσεων εργασίας	C4β
		Θρησκευτικές/πολιτιστικές/εθνοτικές	C4γ
		αντιπαραθέσεις	
Τεχνοοικονομικά	C5	Επεκτασιμότητα	C5α
		Καταλληλόλητα υποδομών	C5β
		Μέγεθος κατασκευής/χρονικό περιθώριο	C5γ

4.3 - Καθορισμός προτιμήσεων και υπολογισμός συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων

4.3.1 - Καθορισμός προτιμήσεων

Στην περίπτωση μας, τον ρόλο της ομάδας απόφασης έχουμε εμείς. Η ισχυρότερη προτίμησή μας είναι η ενεργειακή ασφάλεια της ΕΕ, για αυτό τα **γεωπολιτικά κριτήρια** κρίνονται ισχυρότερα έναντι των υπολοίπων.

Οι κατά ζεύγη συγκρίσεις κριτηρίων διεξήχθησαν από εμάς με την διαδοχική υποβολή ερωτήσεων, του τύπου «Πόσο σημαντικό είναι το κριτήριο C1 σε σχέση με το C2, ως προς το ανώτερο στοιχείο της ιεραρχίας, κλπ. Κατά την αξιολόγηση ακολουθήσαμε την κλίμακα λόγων του Saaty, (Saaty, 1994).

Τις αξιολογήσεις τις συγκεντρώσαμε σε πίνακες (μήτρες), διαστάσεων 5x7 (όσο και το πλήθος των κύριων κριτηρίων).

Ο Πίνακας 17 αφορά το επίπεδο κύριων κριτηρίων και ο Πίνακας 18 δείχνει τους πίνακες με τις συγκρίσεις για τα υπό-κριτήρια κάθε κύριου κριτηρίου. Οι τιμές συγκρίσεων ζευγών κριτηρίων (Πίνακας 17), δείχνουν πόσο ένα κύριο κριτήριο (γραμμή) συμβάλλει στην επιλογή εναλλακτικής όδευσης σε σχέση με το κριτήριο (στήλη). Οι τιμές συγκρίσεων ζευγών υπό-κριτηρίων (Πίνακας 18), δείχνουν πόσο σημαντικό είναι το υπό-κριτήριο (γραμμή), σε σχέση με το υπό-κριτήριο (στήλη) ως προς το κύριο κριτήριο.

Η βαθμολόγηση των κριτηρίων στην παρούσα εργασία θα ακολουθήσει τις εξής αρχές:

Η εμπειρία μας σαν ομάδα απόφασης, για την ποσοτική σύγκριση των δεδομένων, θα βασιστεί στα βιβλιογραφικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί στην φάση της προεργασίας. Ο αριθμητικός προσδιορισμός των συγκρίσεων στη μήτρα ενός κριτηρίου, σε συνάρτηση με τους άλλα υπό-κριτήρια της ίδιας κατηγορίας, υπολογίζεται μαθηματικά με βάση του ποσοστού που αποτελεί το συνολικό άθροισμα βαρύτητας της κάθε κατηγορίας.

Η πρώτη κατηγορία κριτηρίων: Αρχικά κρίνεται ότι το κύριο κριτήριο C1, δηλαδή τα **γεωπολιτικά κριτήρια** επιλογής όδευσης, είναι και το σημαντικότερο, καθώς η πραγματοποίηση ή μη οποιουδήποτε έργου διέλευσης ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ χωρών ή ηπείρων προϋποθέτει την ύπαρξη γεωπολιτικής ευρυθμίας, δηλαδή την ύπαρξης πολιτικής σταθερότητας των κρατών-μελών, την διατήρηση καλών διεθνών

σχέσεων μεταξύ τους αλλά και την αποφυγή όποιων γεωστρατηγικών εμπλοκών ή συγκρούσεων.

Το υπό-κριτήριο C1α, η **πολιτική σταθερότητα των κρατών**, λαμβάνεται από την ομάδα απόφασης υπόψη ως το πιο σημαντικό υπό-κριτήριο, καθώς η ύπαρξη πολιτικής σταθερότητας εντός συνόρων είναι απαιτούμενη για τη διασφάλιση καλών διεθνών σχέσεων και την αποφυγή συγκρούσεων εκτός συνόρων.

Το υπό-κριτήριο C1γ, οι **γεωστρατηγικές εμπλοκές/συγκρούσεις**, κρίνεται σημαντικότερο από το C1β, δηλαδή τις **διεθνείς σχέσεις**.

Παρόλο που θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει αυτά τα δύο υπό-κριτήρια αλληλένδετα, οι επιπτώσεις του C1β είναι σαφώς βαρύτερες, κάτι που το καθιστά πιο επικίνδυνο, άρα και απαιτεί περισσότερη προσοχή.

Η δεύτερη κατηγορία κριτηρίων, αυτή των **γεω-περιβαλλοντικών κριτηρίων**, κρίνεται από την ομάδα απόφασης ως η σημαντικότερη μετά τα γεωπολιτικά κριτήρια, καθώς για την εκπόνηση ενός έργου ηλεκτρικής διασύνδεσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορα περιβαλλοντικά θέματα που θα μπορούσαν ενδεχομένως να το καθυστερήσουν.

Τα υπό-κριτήρια της συγκεκριμένης κατηγορίας κριτηρίων έχουν μικρές διαφορές στη σημασιολογική βαρύτητα. Στην προσπάθεια αποτύπωσης της διαφοράς στη βαρύτητα με αριθμητικά δεδομένα, λήφθηκε υπόψη η βιβλιογραφική έρευνα.

- Βαρύτερης σημασίας κρίνεται το υπό-κριτήριο C2β, δηλαδή οι **Νομοθετικές απαγορεύσεις διέλευσης έργων από προστατευόμενες ή περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές / Οικοσυστήματα**.
- Ακολουθεί το υπό-κριτήριο C2α, το **αποτύπωμα άνθρακα CO₂** και κατά συνέπεια το σύνολο ρύπων που θα προκαλέσει στο περιβάλλον η κατασκευή ενός τέτοιου αγωγού.
- Το υπό-κριτήριο C2γ, οι **Περιορισμοί διέλευσης έργων από θαλάσσιες ζώνες λόγω αμφισβήτησης κυριαρχικών δικαιωμάτων**, κρίνεται το λιγότερο σημαντικό από τα τρία.

Η τρίτη κατηγορία κριτηρίων, αυτή των **κριτηρίων εμπορικότητας έργου**, κρίνεται από την ομάδα απόφασης ως η τρίτη σημαντικότερη, καθώς αφορά ένα πολύ σημαντικό τομέα στην ανάπτυξη ενός έργου ηλεκτρικής διασύνδεσης, τον οικονομικό τομέα.

- Αξιολογούμε τα υπό-κριτήρια C3α **Σχέση κόστους - αποτελεσματικότητας** και C3γ **Μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα** ως ισοδύναμα. Το έργο οφείλει να είναι αποτελεσματικό, να έχει δηλαδή θετική επίδραση σε πληθώρα τομέων μετά την κατασκευή του, αλλά και να είναι οικονομικά βιώσιμο για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς πολλοί άνθρωποι θα εξαρτώνται από αυτό.
- Ακολουθεί το υπό-κριτήριο C3β, οι **ROI (Return On Investment) – απόδοση των επενδύσεων**, καθώς το επενδυτικό κέρδος του οργανισμού που θα αναλάβει το έργο θεωρείται από την ομάδα απόφασης λιγότερης σημασίας από την αποτελεσματικότητα ή τη βιωσιμότητα του έργου.

Η τέταρτη κατηγορία κριτηρίων, αυτή των **κοινωνικών κριτηρίων**, κρίνεται από την ομάδα απόφασης ως η τέταρτη στη σημαντικότερη, καθώς υστερεί έναντι των υπολοίπων αλλά θεωρείται σημαντικότερη από την τελευταία, τα **τεχνοοικονομικά κριτήρια**.

- Το υπό-κριτήριο C4α, **Δημόσια υγεία και ασφάλεια**, θεωρείται αρκετά πιο σημαντικό από τα άλλα δύο, καθώς η ομάδα απόφασης δίνει μεγαλύτερο βάρος στον ανθρωπιστικό τομέα των πιθανών επιπτώσεων σε σχέση με κάλυψη άλλων αναγκών όπως οι θέσεις εργασίας ή οι αντιλήψεις της κοινωνίας γύρω από κάποια θέματα.
- Μεταξύ των υπό-κριτηρίων C4β, δηλαδή **Δημιουργία θέσεων εργασίας** και C4γ, **Θρησκευτικές/πολιτιστικές/εθνοτικές αντιπαραθέσεις**, ελάχιστα πιο σημαντικό κρίνεται το δεύτερο, καθώς τα πιστεύω μιας κοινότητας μπορούν να οδηγήσουν σε πιθανή παρεμπόδιση ή καθυστέρηση στην κατασκευή του έργου.
- Το υπό-κριτήριο C5α, **Επεκτασιμότητα του έργου**, θεωρείται σημαντικότερο από τα υπόλοιπα δύο. Η επεκτασιμότητα ενός έργου κατασκευής αγωγού, αλλά και οποιουδήποτε έργου συνδέεται άμεσα και με την εμπορικότητα ενός έργου, καθώς μπορεί να αποφέρει κέρδη και στο μέλλον.
- Τα άλλα δύο υπό-κριτήρια είναι καθαρά τεχνικά κριτήρια, με το υπό-κριτήριο C5β, **Καταλληλότητα υποδομών**, να κρίνεται από την ομάδα απόφασης ως πιο σημαντικό από το υπό κριτήριο C5γ, **Μέγεθος κατασκευής / χρονικό περιθώριο εκπόνησης του έργου**.

4.3.2 Υπολογισμός συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων και υπό-κριτηρίων

Για την μοντελοποίηση των μαθηματικών της μεθόδου AHP, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο AHP software της Spicelogic¹⁵. Εκεί έγινε η εισαγωγή των τιμών στις μήτρες συγκρίσεων, βλέπε πίνακες 17 και 18. Η επίλυση της εξίσωσης ιδιοδιανυσμάτων και ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας των υπό-κριτηρίων έγινε επίσης στο λογισμικό. Η μέθοδος των ιδιοδιανυσμάτων εξηγείται στην ενότητα 3.1.3.

Πίνακας 12: Πίνακας συγκρίσεων σε επίπεδο κύριων κριτηρίων

Κύριο κριτήριο	Ζεύγη συγκρίσεων					Ιδιοδιάνυσμα (Σχετική προτεραιότητα)
	Γεωπολιτικά	Γεωπεριβαλλοντικά	Εμπορικότητα	Κοινωνικά	Τεχνοοικονομικά	
Γεωπολιτικά	1	3	5	7	9	0.541
Γεωπεριβαλλοντικά	1/3	1	2	3	5	0.216
Εμπορικότητα	1/5	1/2	1	2	3	0.123
Κοινωνικά	1/7	1/3	1/2	1	2	0.074
Τεχνοοικονομικά	1/9	1/5	1/3	1/2	1	0.045

Πίνακας 13. Πίνακας συγκρίσεων σε επίπεδο υπό-κριτηρίων

Υπό-κριτήριο	Ζεύγη συγκρίσεων			Ιδιοδιάνυσμα (Σχετική προτεραιότητα)
	C1α	C1β	C1γ	
<i>8.1 - Γεωπολιτικά</i>				
C1α: Πολιτική σταθερότητα	1	2	4	0.493
C1β: Διεθνείς Σχέσεις	1/2	1	3	0.196
C1γ: Γεωστρατηγικές εμπλοκές/συγκρούσεις	1/4	1/3	1	0.311
	C2α	C2β	C2γ	
<i>8.2 - Γεωπεριβαλλοντικά κριτήρια</i>				
C2α: Αποτύπωμα άνθρακα CO2	1	2	2	0.311
C2β: Οικοσυστήματα	1/2	1	2	0.493

¹⁵ www.spicelogic.com/Products/ahp-software-30

C2γ: Απαγόρευση διέλευσης έργων από θαλάσσιες ζώνες	1/2	1/2	1	0.196
	C3α	C3β	C3γ	
<i>8.3 - Κριτήρια Εμπορικότητας Έργου</i>				
C3α: Σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας	1	1	2	0.4
C3β: ROI	1	1	2	0.2
C3γ: Μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα	1/2	1/2	1	0.4
	C4α	C4β	C4γ	
<i>8.4 - Κοινωνικά κριτήρια</i>				
C4α: Δημόσια Υγεία/Ασφάλεια	1	3	3	0.594
C4β: Δημιουργία θέσεων εργασίας	1/3	1	2	0.157
C4γ: Θρησκευτικές/πολιτιστικές/εθνοτικές αντιπαράθεσεις	1/3	1/2	1	0.249
	C5α	C5β	C5γ	
<i>8.5 - Τεχνοοικονομικά κριτήρια</i>				
C5α: Πρόσβαση σε άλλη Ήπειρο	1	5	7	0.731
C5β: Ενδιάμεσες αγορές	1/5	1	3	0.188
C5γ: Προσάρτηση ενδιάμεσων προμηθευτών	1/7	1/3	1	0.081

4.3.3 - Έλεγχος συνέπειας συγκρίσεων κριτηρίων

Με αυτό τον έλεγχο ελέγχουμε αν οι πίνακες σύγκρισης των κυρίων κριτηρίων και των υπό-κριτηρίων παρουσιάζουν ασυνέπεια. Σε αυτή την περίπτωση θα σημαίνει ότι η ομάδα απόφασης έχει περιορισμένη κατανόηση του προβλήματος και επανεξετάζει τα ζεύγη συγκρίσεων.

Ο έλεγχος έχει αποδειχθεί ότι γίνεται εύκολα και αξιόπιστα χρησιμοποιώντας το λόγο συνέπειας του Saaty (Saaty 1987), όπου εμπειρικά έχει τεθεί σαν όριο συνέπειας η τιμή $CR \leq 0.1$ (βλέπε Κεφάλαιο 3, Εξ.(15)).

Στην δικιά μας περίπτωση, πάλι χρησιμοποιώντας το λογισμικό της Spicelogic για διευκόλυνση στις πράξεις, βλέπουμε ότι:

- Πίνακας κριτηρίων 17: $CR = 0.0105 < 0.1$

- Πίνακας υπό-κριτηρίων 18, 8.1: $CR = 0.0462 < 0.1$
- Πίνακας υπό-κριτηρίων 18, 8.2: $CR = 0.0462 < 0.1$
- Πίνακας υπό-κριτηρίων 18, 8.3: $CR = 0.0 < 0.1$
- Πίνακας υπό-κριτηρίων 18, 8.4: $CR = 0.0462 < 0.1$
- Πίνακας υπό-κριτηρίων 18, 8.5: $CR = 0.0559 < 0.1$

Οι παραπάνω τιμές ικανοποιούν το κριτήριο συνέπειας του Saaty, γιατί όλες οι τιμές των CR είναι μικρότερες του ορίου 0.01.

4.4 – Συλλογή δεδομένων δεικτών κινδύνου των κρατών όδευσης

Προκειμένου να συγκρίνουμε τις διαφορετικές οδεύσεις χρειαζόμαστε τις τιμές των δεικτών κινδύνου των κρατών όδευσης. Τον ρόλο του εμπειρογνώμων της ομάδας απόφασης, ως προς τη σύγκριση των ζευγών απόφασης για κάθε υπό-κριτήριο (στο Βήμα 3), τον έχουμε εμείς. Τα στατιστικά δεδομένα των κρατών συλλέχθηκαν από τις παρακάτω βάσεις δεδομένων:

GlobalEconomy, (2022); **World Bank**, (2022); **GHS**, (2022); Gygli et.al. (2019); **Heritage Foundation**, (2022); (2020); **Economics and Peace**, (2023); **index Mundi**, (2021); **Protected Planet** (2023).

Επιλέγουμε, τα δεδομένα να αφορούν μόνο τις τιμές των μη-κοινών κρατών, κράτη που είναι κοινά σε όλες τις οδεύσεις δεν επηρεάζουν την αξιολόγηση, δηλαδή των κρατών: Ελλάδα, Ισραήλ, Κύπρος, Αίγυπτος, Λιβύη.

Από την πληθώρα δεικτών κινδύνου που δημοσιεύονται, θα ληφθούν υπόψη αυτοί που σχετίζονται με τα υπό-κριτήρια που ορίζει η ομάδα απόφασης στην παρούσα εργασία, με απώτερο σκοπό την βαθμολόγηση της κάθε όδευσης.

Επειδή ο αγωγός είναι ένα σειριακό σύστημα, στα θέματα κινδύνων, αποφασίζουμε να δίνουμε ως ολική τιμή στην κάθε όδευση την τιμή του «χειρότερου» δείκτη κράτους της όδευσης. Η ασφάλεια (κίνδυνος) ενός αγωγού ενέργειας εξαρτάται από την ασφαλή λειτουργία όλων των εμπλεκόμενων τμημάτων του και η μη ασφαλής λειτουργία έστω και ενός επί μέρους τμήματός του θέτει σε κίνδυνο όλη την όδευση.

Γενικά, οι στατιστικοί δείκτες των κρατών υπολογίζονται από συνδυασμό πολλών επί μέρους συνιστωσών του κράτους και αρκετοί στατιστικοί δείκτες κρατών αναφέρονται σε κοινές συνιστώσες του κράτους, για αυτό αρκετοί δείκτες σχετίζονται ως ένα βαθμό με περισσότερα από ένα υπό-κριτήρια. Σημειώνουμε, ότι τα υπό-κριτήριά μας είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους (δεν έχουν κοινές διαστάσεις).

Παρακάτω, ο Πίνακας 11 έως και ο Πίνακας 15 δείχνουν συγκεντρωτικά τις τιμές των στατιστικών δεικτών των μη-κοινών κρατών, Αίγυπτος, Λιβύη, Ισραήλ, Κύπρος.

Πίνακας 14 Παγκόσμιοι δείκτες κρατών. Πηγές: <https://www.ghsindex.org/country/>, <https://www.economicsandpeace.org/>, <https://fragilestatesindex.org/country-data/>

ID	Δείκτης	Egypt	Libya	Israel	Cyprus
1	Κίνδυνος (0-100 ασθενής)	60.3 (72 ^η)	36.7 (176 ^η)	64.2 (54 ^η)	62.9 (63 ^η)
2	Συνολική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	66.08	58.46	76.45	79.29
3	Οικονομική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	43.96	55.16	71.32	83.64
4	Πολιτική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	91.38	69.81	74.13	68.3
5	Κοινωνική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	62.88	49.06	83.9	85.93
6	Παγκόσμια Τρομοκρατία (0 -10 ισχυρό)	6.632	4.730	5.489	1.392
7	Παγκόσμια Ειρήνη (0-5 χαμηλή)	2.267	2.605	2706	1.904
8	Πολιτική ασφάλεια (0 – 100 ισχυρό)	56.6	9.0	60.7	48.1
9	Πολιτική Σταθερότητα και Απουσία Βίας/Τρομοκρατίας (-2.5 έως +2.5 ισχυρή)	-1.02	-2.19	-1.28	0.42
10	Ευθραυστότητα κράτους (Fragile state index) (0-120 υψηλή)	81.6	96.1	44.1	57.0
11	Κοινωνικό-οικονομική ανθεκτικότητα (0 έως 100)	49.6	46.7	82.3	76.7
12	Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι (0 – 100)	54.8	65.3	26.1	70.6
13	Ανθεκτικότητα δημόσιας υγείας (0 έως 100)	65.3	54.1	76.8	52.7
14	Επάρκεια ηλεκτρικής και συγκοινωνιακής υποδομής (0 – 100 ισχυρό)	75.0	8.3	75	66.7
15	Πυκνότητα πληθυσμού (άνθρωποι/ km ² γης)	113	4	424	136
16	Αστικός πληθυσμός (0-100% ισχ)	41	82	92	65

Ο ορισμός των υπαρκτών ή δυνητικών δεικτών κινδύνου του παραπάνω πίνακα δίνονται παρακάτω:

- Ο **συνολικός δείκτης της παγκοσμιοποίησης** (The KOF Globalization Index) καλύπτει τις οικονομικές, κοινωνικές και πολιτικές διαστάσεις της παγκοσμιοποίησης. Οι υψηλότερες αξίες υποδηλώνουν μεγαλύτερη παγκοσμιοποίηση.
- Ο **δείκτης πολιτικής παγκοσμιοποίησης** (Political globalization index) καθορίζεται από τον συνολικό αριθμό των πρεσβειών και των ανωτάτων επιτροπών σε μια χώρα, τον αριθμό των διεθνών οργανισμών στους οποίους αποτελεί μέλος η χώρα, τον αριθμό των ειρηνευτικών αποστολών του ΟΗΕ στις οποίες συμμετείχε μια χώρα καθώς και τον αριθμό των συνθηκών που έχουν υπογραφεί μεταξύ δύο ή περισσότερων πολιτειών.
- Η **οικονομική παγκοσμιοποίηση** (Economic globalization) έχει δύο διαστάσεις: πραγματικές οικονομικές ροές και περιορισμούς στο εμπόριο και το κεφάλαιο. Ο πρώτος επιμέρους δείκτης για τις πραγματικές οικονομικές ροές περιλαμβάνει στοιχεία για το εμπόριο και τις επενδύσεις χαρτοφυλακίου. Ο δεύτερος δείκτης που αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς, λαμβάνει υπόψη τους κρυφούς φραγμούς στις εισαγωγές αγαθών, τους μέσους δασμολογικούς

συντελεστές, τους φόρους στο διεθνές εμπόριο (ως μερίδιο των τρεχόντων εσόδων) και έναν δείκτη κεφαλαιουχικών ελέγχων.

- **Η κοινωνική παγκοσμιοποίηση** (Social globalization) έχει τρεις διαστάσεις: προσωπικές επαφές, ροές πληροφοριών και πολιτιστική εγγύτητα. Ο επιμέρους δείκτης για τις προσωπικές επαφές περιλαμβάνει διεθνή τηλεπικοινωνιακή κίνηση, όγκο σε τουρισμό, μεταφορές, αλλοδαπό πληθυσμό και αριθμό διεθνών επιστολικών αποστολών. Ο επιμέρους δείκτης για τις ροές πληροφοριών περιλαμβάνει τον αριθμό των χρηστών του Διαδικτύου, το μερίδιο των νοικοκυριών με τηλεόραση και το εμπόριο εφημερίδων. Τέλος, ο επιμέρους δείκτης για την πολιτιστική εγγύτητα περιλαμβάνει το εμπόριο βιβλίων και τον αριθμό των εστιατορίων McDonald's και των εμπορικών καταστημάτων της Ikea που βρίσκονται εγκατεστημένα σε μια χώρα.
- **Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι:** Ανθεκτικότητα κοινοτήτων σε συμβάντα μετάδοσης ασθενειών και φυσικές καταστροφές.
- **Επάρκεια υποδομής:** δρόμοι, αεροδρόμια και δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας απαραίτητα για την κάλυψη των αναγκών της κοινότητας.
- **Πολιτική Σταθερότητα και Απουσία Βίας/Τρομοκρατίας:** μετρά τις αντιλήψεις για την πιθανότητα αποσταθεροποίησης ή ανατροπής της κυβέρνησης με αντισυνταγματικά ή βίαια μέσα, συμπεριλαμβανομένης της βίας και της τρομοκρατίας με πολιτικά κίνητρα. Ο δείκτης είναι ένας μέσος όρος πολλών άλλων δεικτών από το παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ, το Economist Intelligence Unit και τις Υπηρεσίες Πολιτικού Κινδύνου.
- Ο δείκτης **Εύθραυστων Κρατών** μετρά την ευπάθεια ενός κράτους σε καταστάσεις πριν από μια σύρραξη, κατά τη διάρκεια ενεργών συγκρούσεων και μετά από μια σύρραξη. Ο δείκτης περιλαμβάνει δώδεκα επιμέρους δείκτες κινδύνου σύγκρουσης που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κατάστασης ενός κράτους σε κάθε δεδομένη στιγμή: Μηχανισμοί ασφαλείας, ελίτ κερματισμένη σε φράξιες, δυσθυμία κοινωνικών ομάδων, οικονομική παρακμή, άνιση οικονομική ανάπτυξη, μείωση ανθρώπινου δυναμικού λόγω φυγής σε άλλες χώρες τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά (επίπεδο σπουδών και γνώσεων, «brain drain»), νομιμότητα του κράτους, δημόσιες υπηρεσίες, ανθρώπινα δικαιώματα και κράτος δικαίου, δημογραφικές πιέσεις, πρόσφυγες και εκτοπισμένοι, εξωτερική παρέμβαση. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη, τόσο πιο «εύθραυστη» θεωρείται και η χώρα.
- **Ανθεκτικότητα δημόσιας υγείας** (Public health vulnerabilities): πρόσβαση σε ποιοτική υγειονομική περίθαλψη.
- **Παγκόσμιος Δείκτης Τρομοκρατίας:** Global Terrorism Index 2020 (GTI).
- **Παγκόσμιος Δείκτης Ειρήνης:** Global Peace Index (GPI).
- **Κοινωνικό-οικονομική ανθεκτικότητα** (Socio-economic resilience): τους κοινωνικούς και οικονομικούς κινδύνους που μπορεί να αυξήσουν την ευπάθεια σε βιολογικές απειλές.

Πίνακας 15. Δείκτες ρυθμιστικών πρωτόκολλων κρατών. Πηγές: <https://www.ghsindex.org/country/>

ID	Δείκτης	Egypt	Libya	Israel	Cyprus
17	Διασυννοριακές συμφωνίες ασφάλειας υγείας (0-100 ισχυρό)	50	0	60	100
18	Μέλος σε διεθνείς δεσμεύσεις ασφάλειας υγείας (0-100 ισχυρό)	25	37.5	75	100
19	Νόρμες (0-100 ισχυρό)	33.3 (168 ^η 16)	31.3 (175 ^η)	30.9 (178 ^η)	52.8 (70 ^η)

Πίνακας 16: Οικονομικοί δείκτες κρατών. Πηγές: <http://data.worldbank.org/data-catalog/worldwide-governance-indicators> , <http://data.worldbank.org> , <https://www.heritage.org>

ID	Δείκτης	Egypt	Libya	Israel	Cyprus
20	Οικονομική Ελευθερία (EF) (0-100)	49.1	-	68	72.9
21	Ξένες επενδύσεις, καθαρές εισροές (%ΑΕΠ) (-2,5-+2,5 ισχυρή)	-1.9	1.1	6	-1.3
22	Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI) (0-1)	0.674	0.820	0.919	0.873

Ο ορισμός των υπαρκτών ή δυνητικών δεικτών κινδύνου του παραπάνω πίνακα δίνονται παρακάτω:

- **Οικονομική Ελευθερία (EF):** Κράτος δικαίου, (ιδιοκτησιακά δικαιώματα, δικαστική αποτελεσματικότητα, κυβερνητική ακεραιότητα), ρυθμιστική αποτελεσματικότητα (Επιχειρηματική ελευθερία, ελευθερία εργασίας, νομισματική ελευθερία), ανοιχτές αγορές (εμπορική ελευθερία, ελευθερία επενδύσεων, οικονομική ελευθερία), κυβερνητικό μέγεθος (φορολογική επιβάρυνση, κρατικές δαπάνες, Δημοσιονομική Υγεία).
- **Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI)** μετρά τρεις βασικές διαστάσεις της ανθρώπινης ανάπτυξης: μακρά και υγιή ζωή, γνώση και αξιοπρεπές βιοτικό επίπεδο. Τέσσερις επιμέρους δείκτες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη: το προσδόκιμο ζωής κατά τη γέννηση, ο τυπικός μέσος αριθμός των σχολικών ετών, ο πρακτικά αναμενόμενος αριθμός ετών σχολικής εκπαίδευσης και το κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό εισόδημα, ΑΕΕ).
- **Άμεσες ξένες επενδύσεις, καθαρές εισροές (% του ΑΕΠ):** Εμπορικές και χρηματοοικονομικές ροές. Άθροισμα μετοχικού κεφαλαίου, επανεπένδυση κερδών, λοιπών μακροπρόθεσμων κεφαλαίων και βραχυπρόθεσμων κεφαλαίων, εκφρασμένο ως ποσοστό του ΑΕΠ. Πηγή: Παγκόσμια Τράπεζα (2020a). Βάση δεδομένων για τους παγκόσμιους δείκτες ανάπτυξης. Ουάσιγκτον. <http://data.worldbank.org>. Πρόσβαση στις 22 Ιουλίου 2020.

¹⁶ Από τις 195 χώρες που αξιολογήθηκαν, ο βαθμός τους τις κατατάσσει σε αυτή τη θέση.

Δεδομένα: Διεθνές Νομισματικό Ταμείο, βάσεις δεδομένων Διεθνών Χρηματοοικονομικών Στατιστικών και Ισοζυγίου Πληρωμών, Παγκόσμια Τράπεζα, Στατιστικές Διεθνούς Χρέους και εκτιμήσεις ΑΕΠ της Παγκόσμιας Τράπεζας και του ΟΟΣΑ.

Πίνακας 17. Θεσμικοί δείκτες κρατών. Πηγές: <http://data.worldbank.org>, <http://data.worldbank.org/data-catalog/worldwide-governance-indicators>

ID	Δείκτης	Egypt	Libya	Israel	Cyprus
23	Ρυθμιστική Ποιότητα (-2.5-+2.5 υψηλή) (Regulatory Quality)	-0.71	-2.08	1.2	0.77
24	Κράτος δικαίου (-2.5-+2.5 υψηλή) (Rule of law)	-0.26	-1.8	0.94	0.57
25	Αποτελεσματικότητα της Κυβέρνησης (-2.5-+2.5 υψηλή)	-0.44	-1.75	1.23	0.73

Ο ορισμός των υπαρκτών ή δυνητικών δεικτών κινδύνου του παραπάνω πίνακα δίνονται παρακάτω:

- **Η Ρυθμιστική Ποιότητα** καταγράφει τις αντιλήψεις για το πόσο είναι ικανή μια κυβέρνηση να διαμορφώνει και να εφαρμόζει υγιείς πολιτικές και κανονισμούς που επιτρέπουν και προάγουν την ανάπτυξη του ιδιωτικού τομέα. Η εκτίμηση καθορίζει τη βαθμολογία της χώρας στον συνολικό δείκτη, σε μονάδες τυπικής κανονικής κατανομής, δηλαδή που κυμαίνεται από -2.5 έως 2.5 περίπου.
- **Το Κράτος Δικαίου** καταγράφει τις αντιλήψεις για το βαθμό εμπιστοσύνης και τήρησης των κοινωνικών κανόνων και ειδικότερα την ποιότητα της εκτέλεσης των συμβολαίων, τα δικαιώματα ιδιοκτησίας, την εύρυθμη λειτουργία της αστυνομίας και των δικαστηρίων, καθώς και τις πιθανότητες εκδήλωσης εγκληματικών ή και βίαιων πράξεων στο κοινωνικό σύνολο (κυμαίνεται από -2.5 έως 2.5).
- **Αποτελεσματικότητα της Κυβέρνησης** καταγράφει τις αντιλήψεις για την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα των δημόσιων υπηρεσιών, καθώς και τον βαθμό ανεξαρτησίας τους από πολιτικές πιέσεις. Επίσης, την αξιοπιστία της κυβέρνησης στην δέσμευσή της να εφαρμόσει τέτοιες πρακτικές (κυμαίνεται από -2.5 έως 2.5).

Πίνακας 18. Κάλυψη προστατευόμενης περιοχής, πυκνότητα κατοίκησης και αστικοποίηση των κρατών. Πηγή: <https://www.protectedplanet.net/country>

ID	Δείκτης	Egypt	Libya	Israel	Cyprus
26	Επίγεια κάλυψη %	13.14	0.13	24.49	38.72
27	Θαλάσσια κάλυψη %	4.95	0.63	0.04	8.62
15	Πυκνότητα πληθυσμού (άνθρωποι/ km ² γης)	113	4	424	136
16	Αστικός πληθυσμός (0-100% ισχ)	41	82	92	65

Όσον αφορά τα δεδομένα επίγειας ή θαλάσσιας κάλυψης προστατευόμενων περιοχών, υπολογίζουμε το ποσοστό κάλυψης της κάθε όδευσης το άθροισμα των ποσοστών των επί μέρους κρατών της. Δίνουμε σημασία στον δείκτη αστικοποίησης παρά στον δείκτη πυκνότητας πληθυσμού στα κράτη. Ο δείκτης ποσοστού προστατευόμενων περιοχών της όδευσης και ο δείκτης αστικοποίησης μας δίνει μια εικόνα κατά πόσο είναι εύκολο να ελιχθεί η όδευση στο εσωτερικό μιας χώρας διακομιδής.

4.5 – Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων

Οι προτεραιότητες των τριών εναλλακτικών μας οδεύσεων υπολογίζονται από τους πίνακες συγκρίσεων τους ανά δύο σε κάθε υπό-κριτήριο, δηλαδή έξι πίνακες (15 πίνακες γιατί έχουμε 15 υπό-κριτήρια), διάστασης 3x3 (διάσταση 3x3, γιατί έχουμε τρεις εναλλακτικές). Σαν ομάδα απόφασης, κάναμε την βαθμολόγηση της κάθε ολικής διαδρομής ως προς κάθε υπό-κριτήριο, στην κλίμακα 1-9 του Saaty, με βάση τα δεδομένα των κρατών διέλευσης, από τα στατιστικά στοιχεία δεικτών των κρατών (από τη διεθνή βιβλιογραφία), χωρίς την χρήση ειδικών εργαλείων. Από διεθνείς οργανισμούς συλλέξαμε για το κάθε μη-κοινό κράτος διακομιδής τις τιμές των δεικτών των παραγόντων που σχετίζονται με τα υπό-κριτήρια.

Η τιμή του ολικού δείκτη της κάθε εναλλακτικής όδευσης θεωρούμε ότι **είναι ίση με την τιμή του «χειρότερου» δείκτη κράτους της διαδρομής (μια αλυσίδα είναι τόσο ισχυρή όσο ο πιο αδύνατος κρίκος της).**

Πίνακας 19. Εκτίμηση δείκτη ολόκληρης της όδευσης από την τιμή του κράτους με την χειρότερη τιμή.

		Όδευση		
		A1	A2	A3
	Δείκτης	Egypt-Greece	Libya-Egypt-Greece	Israel-Cyprus-Greece
0	Κίνδυνος (0-100 ασθενής)	60.3	36.7	62.9
1	Συνολική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	66.08	58.46	76.45
2	Οικονομική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	43.96	43.96	83.64

3	Πολιτική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	91.38	69.81	74.13
4	Κοινωνική παγκοσμιοποίηση (0-100 ισχυρό)	62.88	49.06	85.93
5	Παγκόσμια Τρομοκρατία (0 -10 ισχυρό)	6.632	4.730	1.392
6	Παγκόσμια Ειρήνη (0-5 χαμηλή)	2.267	2.267	1.904
7	Πολιτική ασφάλεια (0 – 100 ισχυρό)	56.6	9.0	48.1
8	Πολιτική Σταθερότητα και Απουσία Βίας/Τρομοκρατίας (-2.5 έως +2.5 ισχυρή)	-1.02	-2.19	-1.28
9	Ευθραυστότητα κράτους (Fragile state index) (0-120 υψηλή)	81.6	96.1	44.1
10	Κοινωνικό-οικονομική ανθεκτικότητα (0 έως 100)	49.6	46.7	76.7
11	Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι (0 – 100)	54.8	65.3	70.6
12	Ανθεκτικότητα δημόσιας υγείας (0 έως 100)	65.3	54.1	52.7
13	Επάρκεια ηλεκτρικής και συγκοινωνιακής υποδομής (0 – 100 ισχυρό)	75.0	8.3	66.7
14	Πυκνότητα πληθυσμού (άνθρωποι/ km ² γης)	113	4	136
15	Αστικός πληθυσμός (0-100% ισχ)	41	41	65
16	Διασυνοριακές συμφωνίες ασφάλειας υγείας (0-100 ισχυρό)	50	0	60
17	Μέλος σε διεθνείς δεσμεύσεις ασφάλειας υγείας (0-100 ισχυρό)	25	25	75
18	Νόρμες (0-100 ισχυρό)	33.3	31.3	30.9
19	Οικονομική Ελευθερία (EF) (0-100)	49.1	-	68
20	Ξένες επενδύσεις, καθαρές εισροές (%ΑΕΠ) (-2,5-+2,5 ισχυρή)	-1.9	-1.9	-1.3
21	Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI) (0-1)	0.674	0.674	0.873
22	Ρυθμιστική Ποιότητα (-2.5-+2.5 υψηλή)	-0.71	-2.08	0.77

23	Κράτος δικαίου (-2.5-+2.5 υψηλή) (Rule of law)	-0.26	-1.8	0.57
24	Αποτελεσματικότητα της Κυβέρνησης (-2.5-+2.5 υψηλή)	-0.44	-1.75	0.73
25	Επίγεια κάλυψη %	13.14	0.13	24.49
26	Θαλάσσια κάλυψη %	4.95	0.63	0.04

A. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για πολιτική σταθερότητα, C1α

Η ομάδα απόφασης λαμβάνει υπόψη τις τιμές των δεικτών 0-9, 21-24 και αποφασίζει ότι το σενάριο όδευσης A1 είναι 5 φορές πιο σημαντικό από το A2 και 3 από το A3. Αντίστοιχα, το σενάριο όδευσης A3 είναι 2 φορές πιο σημαντικό από το A2. Έτσι δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας δυαδικών συγκρίσεων.

Πίνακας 20. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C1α

Πολιτική σταθερότητα, C1α	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	5	3	0.648
A2	1/5	1	1/2	0.122
A3	1/3	2	1	0.23

B. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για διεθνείς σχέσεις, C1β

Αυτή τη φορά θα ληφθούν υπόψη οι τιμές των δεικτών 1-5, 16, 17, 18. Σύμφωνα με αυτές, καταλήγουμε στο ότι η όδευση A1 είναι αρκετά πιο σημαντική από την όδευση A2 και πιο σημαντική από την όδευση A3. Αντίστοιχα, η όδευση A3 είναι πιο σημαντική από την όδευση A2. Κύριος λόγος κατάταξης των οδεύσεων με αυτό τον τρόπο είναι η χαμηλές τιμές που λαμβάνει η όδευση A2 λόγω του κράτους – μέλους της Λιβύης.

Πίνακας 21. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C1β

Διεθνείς Σχέσεις, C1β	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	5	3	0.637
A2	1/5	1	1/3	0.105
A3	1/3	3	1	0.258

Γ. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για γεωστρατηγικές εμπλοκές/συγκρούσεις, C1γ

Η ομάδα απόφασης πιστεύει ότι ο κίνδυνος εστιάζεται κυρίως στην τρομοκρατία και στον πόλεμο. Έτσι, για την δημιουργία του πίνακα συγκρίσεων για το συγκεκριμένο

υπό-κριτήριο, λήφθηκαν υπόψη οι τιμές των δεικτών 0, 5, 6, 8. Σύμφωνα με αυτές ο πίνακας 22 διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 22. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C1γ

Γεωστρατηγικές εμπλοκές, C1γ	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	3	9	0.648
A2	1/3	1	8	0.3
A3	1/9	1/8	1	0.052

Δ. Δυαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για αποτύπωμα άνθρακα, C2α

Βάσει των δεδομένων που έχει δημοσιεύσει ο οργανισμός ENTSO-E¹⁷, αλλά και βάσει του μεγέθους κατασκευής του αγωγού της κάθε όδευσης, θεωρούμε ότι η όδευση A1 και η όδευση A2 είναι προτιμότερες από την A3, καθώς και η A2 ελάχιστα προτιμότερη της A1.

Πίνακας 23. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C2α

Αποτύπωμα άνθρακα, C2α	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	1/2	5	0.352
A2	2	1	5	0.559
A3	1/5	1/5	1	0.089

Ε. Δυαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για οικοσυστήματα, C2β

Τα τρία σενάρια όδευσης ισχύος βασίζονται σε ήδη υπαρκτά projects. Αυτά τα projects θεωρείται ότι λαμβάνουν υπόψη τις περιοχές ύπαρξης οικοσυστημάτων για την δημιουργία του αγωγού, οπότε, δεν επηρεάζεται η τελική επιλογή.

Πίνακας 24. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C2β

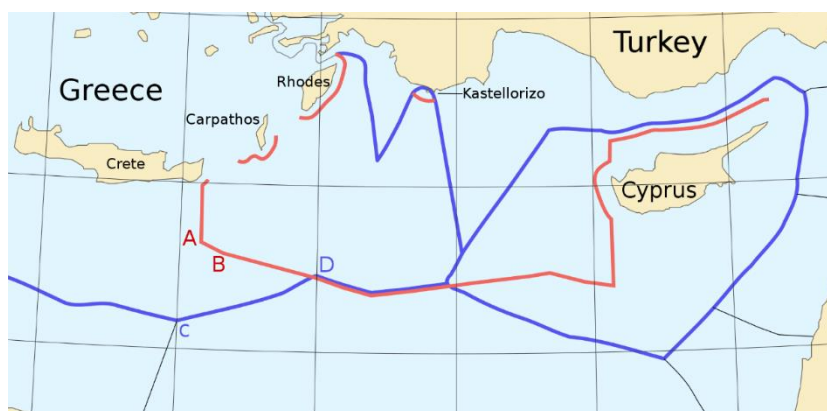
Οικοσυστήματα, C2β	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	1	1	0.333
A2	1	1	1	0.333
A3	1	1	1	0.333

Ζ. Δυαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για περιορισμούς διέλευσης έργων λόγω αμφισβήτησης κυριαρχικών δικαιωμάτων, C2γ

Δεδομένων των παραπάνω, σε συνδυασμό με την Εικόνα 15, η ομάδα απόφασης θεωρεί την όδευση A1 ως την πιο σημαντική, καθώς απέχει γεωγραφικά από τις περισσότερες διαμάχες. Μεταξύ A2 και A3, δεδομένου ότι η Λιβύη πρόσφατα έλαβε

¹⁷ <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets>

το μέρος της Τουρκίας όσον αφορά τις διεκδικήσεις υδάτων, η ομάδα απόφασης θεωρεί ότι η όδευση A3 υπερέρχει.



Εικόνα 15. Ισχυρισμοί χωρών για όρια ΕΕΖ. (Μπλε: Ελλάδα – Κύπρος, Κόκκινο - Τουρκία).
Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Aegean_dispute

Πίνακας 25. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C2γ

Περιορισμοί διέλευσης έργων λόγω αμφισβήτησης κυριαρχικών δικαιωμάτων, C2γ	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	5	7	0.74
A2	1/5	1	2	0.167
A3	1/7	1/2	1	0.094

Η. Δυαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, C3α

Μελετώντας τα δεδομένα του ENTSO-E¹⁸, η ομάδα απόφασης καταλήγει στο κάτωθι πίνακα (Πίνακας 26), για τα τρία σενάρια όδευσης.

Πίνακας 26. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C3α

¹⁸ Ο ευρωπαϊκός σύνδεσμος 'European Network of Transmission System Operators for Electricity', (ENTSO-E) αντιπροσωπεύει 35 χώρες της ΕΕ και αποστολή του αποτελούν η ολοκλήρωση της ευρωπαϊκής εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η βέλτιστη λειτουργία της.

Σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, C3α	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	2	3	0.54
A2	1/2	1	2	0.297
A3	1/3	1/2	1	0.163

Θ. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για ROI, C3β

Κάποιοι από του παράγοντες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τιμή του δείκτη ROI (Return on Investment) θα μπορούσαν να είναι η στρατηγική τιμολόγησης, η αποτελεσματικότητα μάρκετινγκ, η ποιότητα προϊόντων και υπηρεσιών, το μέγεθος της ευκαιρίας στην αγορά, το κόστος απόκτησης και διατήρησης πελατών, το κόστος εργασίας και πολλά άλλα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα δεδομένα για τις τρεις οδεύσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 27.

Πίνακας 27. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C3β

ROI, C3β	A1	A2	A3	Τοπική προτεραιότητα
A1	1	1/2	3	0.32
A2	2	1	4	0.558
A3	1/3	1/4	1	0.122

Ι. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα, C3γ

Μελετώντας τους δείκτες του πίνακα 9 και πιο συγκεκριμένα τον δείκτη 19, εύκολα παρατηρείται ότι τα σενάρια όδευσης A1 και A3 υπερτερούν έναντι του A2. Για το μικρό προβάδισμα του A1 έναντι του A3, λήφθηκε υπόψη το μικρότερο μέγεθος της κατασκευής της όδευσης A1, συνεπώς λιγότερες συντηρήσεις κ.ο.κ..

Πίνακας 28. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C3γ

Μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα, C3γ	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	3	2	0.517
A2	1/3	1	1/4	0.124
A3	1/2	4	1	0.359

Κ. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για μακροχρόνια δημόσια υγεία και ασφάλεια, C4α

Η ομάδα απόφασης λαμβάνει υπόψη τις τιμές των δεικτών 7, 8, 9, 12, 16 και 17 του Πίνακα 9 και καταλήγει ότι οι οδεύσεις A1 και A3 είναι παρόμοιας σημασίας και είναι και οι δύο αρκετά πιο σημαντικές από την A2.

Πίνακας 29. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C4α

Δημόσια υγεία και ασφάλεια, C4α	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	5	1	0.455
A2	1/5	1	1/5	0.091
A3	1	5	1	0.455

Λ. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για μακροχρόνια δημιουργία θέσεων εργασίας, C4β

Σύμφωνα με τους δείκτες 13, 14, 19 του Πίνακα 9, παίρνουμε τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα για τις τρεις οδεύσεις.

Πίνακας 30. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C4β

Δημιουργία θέσεων εργασίας, C4β	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	5	1/2	0.352
A2	1/5	1	1/5	0.089
A3	2	5	1	0.559

Μ. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για θρησκευτικές/εθνοτικές/πολιτιστικές αντιπαραθέσεις, C4γ

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των δεικτών 9 και 10 του Πίνακα 19, θεωρούμε την A3 την πιο σημαντική όδευση, ακολουθούμενη από την A1 κι έπειτα την A2.

Πίνακας 31. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C4γ

Εθνοτικές/πολιτιστικές/θρησκευτικές αντιπαραθέσεις, C4γ	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	3	1/5	0.188
A2	1/3	1	1/7	0.081
A3	5	7	1	0.731

Ν. Διαδικές συγκρίσεις οδεύσεων για την επεκτασιμότητα, C5α

Η επεκτασιμότητα συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη υποδομών, αλλά και την οικονομική κατάσταση των εμπλεκόμενων κρατών. Συνεπώς, η όδευση του σεναρίου A1 υπερτερεί έναντι του σεναρίου A3 αλλά ταυτόχρονα βρίσκεται κάτω από το σενάριο A3.

Πίνακας 32. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C5α

Επεκτασιμότητα, C5α	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	1/2	3	0.32
A2	2	1	4	0.558
A3	1/3	1/4	1	0.122

Ξ. Δυναμικές συγκρίσεις οδεύσεων για την καταλληλότητα υποδομών, C5β

Βάσει το στατιστικό δείκτη 13, εύκολα παρατηρείται ότι η επάρκεια των υποδομών των οδεύσεων A1 και A3 είναι ισχυρότερη από του A2 και στο μεταξύ τους υπερέρχει κατά λίγο η όδευση A1, όπως δείχνει και ο Πίνακας 33.

Πίνακας 33. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C5β

Καταλληλότητα υποδομών, C5β	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	5	2	0.57
A2	1/5	1	11/4	0.097
A3	1/2	4	1	0.333

Ο. Δυναμικές συγκρίσεις οδεύσεων για το μέγεθος κατασκευής/χρονικό περιθώριο, C5γ

Μελετώντας τα δεδομένα για τα τρία projects στην ιστοσελίδα του ENTSO-E¹⁹, καταλήγουμε ότι το σενάριο A2 είναι 4 φορές προτιμότερο από το A1 και 3 από το A3, ενώ το A1 είναι ελάχιστα προτιμότερο του A3. Το μέγεθος του αγωγού του σεναρίου A3 είναι το μεγαλύτερο (περίπου 1200 km), ενώ ο χρόνος έναρξης λειτουργίας του project που περιγράφεται στο σενάριο A1 είναι ο μεγαλύτερος αντίστοιχα (2028).

Πίνακας 34. Σύγκριση εναλλακτικών οδεύσεων ως προς το υπό-κριτήριο C5γ

Μέγεθος κατασκευής/χρονικό περιθώριο, C5γ	A1	A2	A3	Προτεραιότητα
A1	1	1/4	2	0.218
A2	4	1	3	0.63
A3	1/2	1/3	1	0.151

4.6 - Υπολογισμός ολικών προτεραιοτήτων - ταξινόμηση εναλλακτικών

Κάνοντας χρήση του λογισμικού Spicelogic υπολογίζονται οι προτεραιότητες για κάθε Βέλτιστη είναι εκείνη με την μεγαλύτερη τιμή προτεραιότητας.

Από τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων και υπό-κριτηρίων, των Πινάκων 17 και 18 και των τιμών των τοπικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών

¹⁹ <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission>

για κάθε υπό-κριτήριο, υπολογίζουμε τις ολικές προτεραιότητες για την κάθε όδευση (Εξ. (3)).

Κάνοντας λοιπόν χρήση του λογισμικού, παίρνουμε τις τιμές προτεραιοτήτων που παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 35: Αποτελέσματα μεθόδου ΑΗΡ: Τελικές προτεραιότητες σεναρίων όδευσης

Σενάριο	Προτεραιότητα
A1	54.3%
A2	23.7%
A3	22.2%

Βέλτιστη θεωρείται η όδευση με την μεγαλύτερη τιμή προτεραιότητας. Στην δικιά μας περίπτωση, βέλτιστη όδευση είναι αυτή του σεναρίου A1, δηλαδή η όδευση Αίγυπτος – Κρήτη – Ευρώπη.

4.7 - Έλεγχος ευαισθησίας

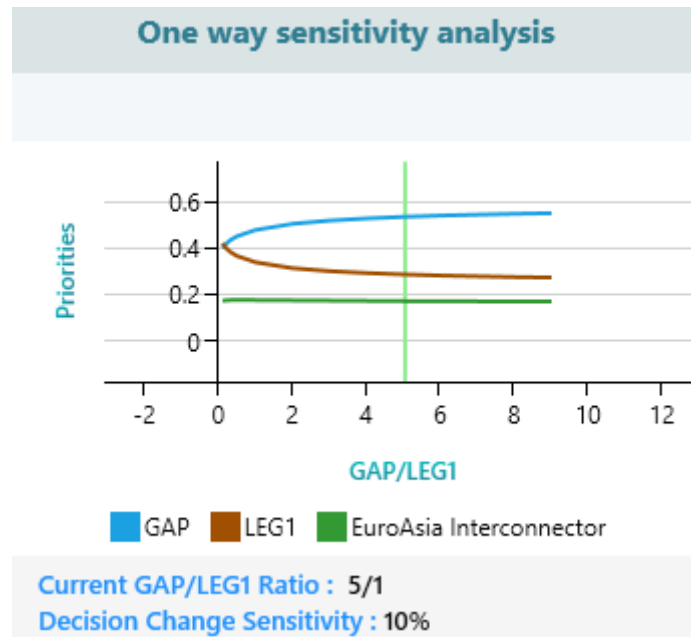
Έγινε έλεγχος ευαισθησίας της βέλτιστης όδευσης, με τη χρήση του λογισμικού Spicelogic ως προς το κριτήριο με το μεγαλύτερο βάρος. Στην προκειμένη περίπτωση το κριτήριο αυτό είναι η Πολιτική Σταθερότητα.

Στην ανάλυση αυτή εξετάζουμε την σταθερότητά όταν μεταβάλλουμε τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων από ακραίες τιμές έως σχετικά μικρές αλλαγές.

Δηλαδή, το μόνο υπό-κριτήριο, που, αλλάζοντας την αξιολόγηση, θα μπορούσε να αλλάξει το τελικό αποτέλεσμα, είναι το υπό-κριτήριο Πολιτική Σταθερότητα.

Στο λογισμικό της Spicelogic²⁰ που χρησιμοποιήθηκε παρατηρήθηκε ότι το τελικό αποτέλεσμα παραμένει η όδευση A1, μέχρις ότου ο λόγος σεναρίων όδευσης A1 ως προς την A2 γίνει μικρότερος του 1, δηλαδή εικάσουμε ότι το σενάριο A2 υπερτερεί έναντι του A1 βάσει του κριτηρίου Πολιτική Σταθερότητα.

²⁰ <https://www.spicelogic.com/Products/ahp-software-30>



Εικόνα 16. Αποτελέσματα μεθόδου ΑΗΠ: Ανάλυση ευαισθησίας της βέλτιστης λύσης.

4.8 – Η Κρήτη ως ενεργειακός κόμβος μεταφοράς ισχύος στην Ευρώπη

Από τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των σεναρίων, δίνεται έμφαση στην διέλευση της ηλεκτρικής ισχύος μέσω της Κρήτης.

Η ήδη υπάρχουσα υποδομή, δηλαδή το ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης, δεν επηρεάζει τα κριτήρια επιλογής βέλτιστης όδευσης.

Έτσι, βέλτιστη κρίνεται μια πιθανή σύνδεση του αγωγού από την Αίγυπτο στο κοντινότερο γεωγραφικά σταθμό στην Αίγυπτο, στον Αθερινόλακκο.

Μία τέτοια πιθανή σύνδεση αποτυπώνεται στον παρακάτω χάρτη:



Εικόνα 17. Σενάριο πιθανής διασύνδεσης βέλτιστου μονοπατιού από Αίγυπτο σε Κρήτη.

Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα & Συμπεράσματα

5.1 – Σύνοψη

Η ενίσχυση των ροών ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ Βορρά – Νότου αξιολογείται ως ένας από τους σημαντικότερους άξονες για την ενεργειακή ασφάλεια και την ενεργειακή μετάβαση της Ευρώπης. Η ενεργειακή διασύνδεση εξυπηρετεί τόσο την όδευση Αφρική-Ευρώπη, με την Αφρική να εξάγει ΑΠΕ στην Ευρώπη, όσο και την όδευση Ευρώπη-Αφρική, έτσι ώστε η Αφρική να επωφεληθεί περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας ερχόμενα από την Ευρώπη, βοηθώντας έτσι στη σταθεροποίηση του δικτύου της.

Ειδικά για την Ελλάδα, η διασύνδεση θα καταστήσει ρεαλιστικούς και βιώσιμους τους στόχους και σχεδιασμούς για την ενεργειακή μετάβαση της χώρας, καθώς οι υφιστάμενες διασυνδέσεις δεν μπορούν να στηρίξουν την έξοδο της περίσσειας ενέργειας που θα παράγεται εντός της χώρας από ΑΠΕ και της ενέργειας που θα μπαίνει στο ελληνικό σύστημα από την Αίγυπτο μέσω της σχεδιαζόμενης διασύνδεσης. Η Ελλάδα αποκτά μεγαλύτερη γεωπολιτική αξία, καθώς πλέον θα έχει το ρόλο του ενεργειακού κόμβου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκαν και αναλύθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια όδευσης ηλεκτρικής διασύνδεσης των δικτύων της Αφρικής και της Ευρώπης, με όλες τις οδεύσεις να περνούν από την Κρήτη. Η σύγκριση για την προτεινόμενη διηπειρωτική διασύνδεση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές σημερινών γεωπολιτικών και άλλων ειδών δεικτών που συγκεντρώθηκαν βιβλιογραφικά.

Μεταξύ των σεναρίων, αυτό που χαρακτηρίστηκε ως το βέλτιστο είναι το σενάριο A1, δηλαδή η όδευση Αίγυπτος – Κρήτη – Ευρώπη. Αυτή λοιπόν η όδευση θεωρούμε ότι εξασφαλίζει ευκολότερα την ενεργειακή ασφάλεια της γύρω περιοχής.

Κατά την μελέτη επιλογής διηπειρωτικής/διακρατικής ενεργειακής όδευσης, τα γεωπολιτικά κριτήρια καθορίζουν την ενεργειακή ασφάλεια του έργου καθώς και την ενεργειακή διαφοροποίηση των αποδεκτών της ενέργειας.

Διαφορετική βαθμολόγηση στο υπό-κριτήριο της Πολιτικής σταθερότητας επιφέρει την επιλογή άλλου σεναρίου ως βέλτιστου.

5.2 – Περιορισμοί και βελτιώσεις και μελλοντικές μελέτες

Παρόλη την πολυπλοκότητα του προβλήματος που πραγματεύτηκε η συγκεκριμένη εργασία, δεν αντιμετωπίστηκε κάποιος περιορισμός στην εκπόνησή της.

Πιθανή επέκταση που θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη είναι η εφαρμογή της μεθοδολογίας της AHP για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής της ηλεκτρικής ισχύος μέσα στην Κρήτη. Δεδομένου ότι η Κρήτη αποτελεί ενεργειακό κόμβο μεταξύ Αφρικής – Ευρώπης, καθώς και το ήδη υπάρχον σύστημα γραμμών μεταφοράς λειτουργεί για πολλά χρόνια και μπορεί να θεωρηθεί μη βέλτιστο.

Εφαρμόζοντας μια αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν της παρούσας διπλωματικής, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση για την εύρεση βέλτιστης όδευσης της ηλεκτρικής ισχύος, ξεκινώντας από την Κρήτη με τελικό στόχο το διαμοιρασμό στις χώρες της ΕΕ.

Εκτός από την πολυκριτηριακή μέθοδο AHP, υπάρχουν κι άλλες πολυκριτηριακές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ανάλυση όπως αυτήν της παρούσας εργασίας, όπως οι μέθοδοι PROMETHEE ή TOPSIS. Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να επαληθεύσουμε την επιλογή όδευσης, χρησιμοποιώντας άλλη μέθοδο αξιολόγησης.

Κεφάλαιο 6 – Βιβλιογραφία

A. Βιβλιογραφικές Πηγές

1. Μάζης Ι. Θ.. (2012). Μεταθεωρητική κριτική διεθνών σχέσεων και Γεωπολιτικής: το νεοθετικιστικό πλαίσιο, Εκδόσεις Παπαζήση
2. Ρούσης, Μ. Ο. (2009). Θεωρητική μελέτη πολυκριτηριακού μεθόδων λήψης αποφάσεων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Πληροφορική και Διοίκηση.
3. Χαλκιάς, Χ., & Γκούσια, Μ. (2015). Γεωγραφική ανάλυση με την αξιοποίηση της γεωπληροφορικής [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. doi: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-569>
4. Alonso, J. and Lamata, M. (2006). Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14, 445-459.
5. Dedemen Y. (2013). A multi-criteria decision analysis approach to GIS- based route selection for overhead power transmission lines, Middle East Technical University
6. Donald G. Fink, H. Wayne Beaty. (2006). *Standard Handbook for Electrical Engineers*.
7. Imdadullah; Alamri, B.; Hossain, M.A.; Asghar, M.S.J. Electric Power Network Interconnection: A Review on Current Status, Future Prospects and Research Direction. *Electronics* 2021, 10, 2179. <https://doi.org/10.3390/electronics10172179>
8. Mazis I., Digkas A., Domatioti X. (2017). Application of simple and composite indicators of the four Geopolitical Pillars in the Methodology of Systemic Geopolitical Analysis: the case of Syria, *Civitas Gentium*.
9. Metin Dağdeviren, İhsan Yüksel. (2008). Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management, *Information Sciences*, Volume 178, Issue 6, 1717-1733, ISSN 0020-0255, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.10.016>.
10. Roy, (1990). Decision-Aid and Decision-Making. In: Bana e Costa, C.A. (eds) *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_2
11. Rudervall R., Charpeniter J.P, Sharma R. (2000). High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper, presented at Washington D.C., USA
12. Saaty, T.L., Vargas, L.G. (2012). The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. In: *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 175. Springer, Boston, MA. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6_2
13. Saaty, T.L., *Decision Making with AHP*, Scientia Iranica, Vol. 9, No 3, Pages 215-229.
14. Siskos, Y., & Spyridakos, A. (1999). Intelligent multicriteria decision support: Overview and perspectives. *European Journal of Operational Research*, Volume 113, Issue 2,, 236-246.
15. Thomaidis, F., & Mavrakakis, D. (2006). Optimum route of the south transcontinental gas pipeline in SE Europe using AHP. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 14, 77-88.

16. Verdini, William A. (1989). A Consistency Test for AHP Decision Makers. *Decision Sciences Volume 20*, 575-590.
17. Westphal, Kirsten & Pastukhova, Maria & Pepe, Jacopo Maria. (2022). "[Geopolitics of electricity: Grids, space and \(political\) power](#)," [SWP Research Papers](#), Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP), German Institute for International and Security Affairs

B. Ιστοσελίδες

1. Economics and Peace. Ανακτήθηκε από: <https://www.economicsandpeace.org/wp-content/uploads/2023/06/GPI-2023-Web.pdf>
2. EuroAsia Interconnector. Ανακτήθηκε από: <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/219>
3. European Commission - Electricity Interconnection Targets. Ανακτήθηκε από: https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/electricity-interconnection-targets_en
4. GAP Interconnector. Ανακτήθηκε από <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/1048>
5. Global Health Security Index. Ανακτήθηκε από: <https://www.ghsindex.org/>
6. GREGY Interconnector. Ανακτήθηκε από: <https://tyndp2022-project-platform.azurewebsites.net/projectsheets/transmission/1041>
7. KOF Globalization Index. Ανακτήθηκε από: <https://kof.ethz.ch/en/forecasts-and-indicators/indicators/kof-globalisation-index.html>
8. LEG1 Interconnector. Ανακτήθηκε από: <https://www.greenpower2020.net/>
9. Population and Urban percent. Ανακτήθηκε από: <https://www.worldometers.info/world-population/population-by-country/>
10. SpiceLogic tool. Ανακτήθηκε από: <https://www.spicelogic.com/Products/ahp-software-30>
11. The Heritage Foundation. Ανακτήθηκε από: <https://www.heritage.org/>
12. World Bank corruption index. Ανακτήθηκε από: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0038026>
13. Αναλύοντας το κόστος μετάδοσης υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC). Ανακτήθηκε από: <https://crushtymks.com/el/high-voltage/948-analysing-the-costs-of-high-voltage-direct-current-hvdc-transmission.html>
14. Ενεργειακός εφοδιασμός και Ενεργειακή Ασφάλεια. Ανακτήθηκε από: <https://what-europe-does-for-me.eu/el/portal/3/focus11>
15. Λιάγγου Χ. Προχωρεί το Σχέδιο ηλεκτρικής διασύνδεσης Ελλάδας – Κεντρικής Ευρώπης, «Η Καθημερινή». Ανακτήθηκε από: <https://news.b2green.gr/36976>