Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διπλωματική εργασία

Ανάλυση δικτύου ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG και διερεύνηση ασφάλειας εφοδιασμού

Κωνσταντίνος Ι. Σαββάκης

Επιβλέπουσα: **Τ. Π. Μοσχόβου, ΕΔΙΠ ΕΜΠ**

ΙΟΥΛΙΟΣ 2024

ΑΘΗΝΑ

Τίτλος Ανάλυση δικτύου ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG και διερεύνηση ασφάλειας εφοδιασμού

Συγγραφέας Κωνσταντίνος Ι. Σαββάκης
Επιβλέπουσα Τατιάνα Π. Μοσχόβου

Σύνοψη

Η στροφή των ευρωπαϊκών κρατών σε πιο περιβαλλοντικά καθαρές πηγές ενέργειας οδηγεί στην αύξηση του μεριδίου του φυσικού αερίου στο ενεργειακό μίγμα. Παράλληλα, η ευελιξία και το χαμηλό κόστος των θαλάσσιων μεταφορών καθιστούν το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) όλο και πιο ανταγωνιστικό σε σχέση με τις παραδοσιακές μορφές φυσικού αερίου, παρότι οι πρόσφατες γεωπολιτικές, υγειονομικές και οικονομικές εξελίξεις απειλούν ευθέως την εφοδιαστική του αλυσίδα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση του δικτύου ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG με τη χρήση δεικτών της Θεωρίας Δικτύων, ο εντοπισμός των εμπορικών κοινοτήτων στο δίκτυο, καθώς και η διερεύνηση της ασφάλειας εφοδιασμού μέσω προσομοίωσης αστοχιών στο δίκτυο. Το δικτυακό μοντέλο αναπτύχθηκε με τη βοήθεια προγραμματιστικού κώδικα μέσω του λογισμικού MATLAB. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται ως εξής: α) μετατόπιση του κέντρου βάρους του εμπορίου LNG από τις ακτές της Μεσογείου σε αυτές του Ατλαντικού, β) σταδιακή ενοποίηση του δικτύου εισαγωγών της Ευρώπης, γ) αυξανόμενη εξάρτηση της Ευρώπης από περιορισμένο αριθμό χωρών και δ) μέσω της προσομοίωσης, εντοπίζονται οι κρισιμότεροι κόμβοι για την ανθεκτικότητα του δικτύου. Με βάση τα συμπεράσματα, διατυπώνονται κατευθυντήριες προτάσεις για την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και αυτονομίας της Ευρώπης.

Λέξεις κλειδιά δίκτυο εμπορίου LNG, εμπορικές κοινότητες, ανθεκτικότητα δικτύου, ασφάλεια εφοδιασμού

Title European LNG import network analysis and security of supply investigation

Author Konstantinos I. Savvakis
Supervisor Tatiana P. Moschovou

Abstract

The shift of European countries to more environmentally clean sources of energy leads to an increase in the share of natural gas in the energy mix. At the same time, the flexibility and low cost of maritime transport make Liquefied Natural Gas (LNG) increasingly competitive with traditional forms of natural gas, even as recent geopolitical, health and economic events directly threaten its supply chain. The aim of this study is to analyze the European LNG import network using Network Theory indicators, identify trading communities in the network, and investigate security of supply through network failure simulation. The network model was developed using programming code through MATLAB software. The results of the analysis are summarized as follows: a) shift of the gravity center of the LNG trade from the Mediterranean to the Atlantic shores; b) gradual consolidation of Europe's import network; c) increasing dependence of Europe on a limited number of countries; and d) through simulation, the most critical nodes for network resilience are identified. Based on the conclusions, guiding proposals are formulated to strengthen Europe's energy security and autonomy.

Key words LNG trade network, trading communities, network resilience, supply security

Περίληψη

Το όραμα για πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας και ενεργειακή αυτονομία στρέφει τα ευρωπαϊκά κράτη σε αναζήτηση λιγότερο επιβλαβών για το περιβάλλον καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο. Επιπλέον, η αντίθεση μεταξύ της αποκεντρωμένης ζήτησης και της γεωγραφικής συγκέντρωσης των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου σε περιορισμένα σημεία του πλανήτη, σε συνδυασμό με την αναζήτηση εναλλακτικών εμπορικών εταίρων, καθιστά το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) όλο και πιο ανταγωνιστική πηγή ενέργειας, λόγω της ευελιξίας και του χαμηλού κόστους των θαλάσσιων μεταφορών. Παράλληλα, οι ραγδαίες γεωπολιτικές, υγειονομικές και οικονομικές εξελίξεις απειλούν την εφοδιαστική αλυσίδα, και κατ' επέκταση την ενεργειακή ασφάλεια, τη συνοχή και τη σταθερότητα της Ευρώπης. Για τους λόγους αυτούς, η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση του δικτύου ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG της περιόδου 2018-2022, και στη διερεύνηση της ασφάλειας του εφοδιασμού της ηπείρου.

Μέσω της ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε αναδείχθηκε η χρησιμότητα της ανάλυσης δικτύων εμπορευματικών ροών, ως εργαλείο για την ευρύτερη αποτύπωση των τάσεων της αγοράς. Επίσης, καταγράφηκε η εφαρμοσμένη μεθοδολογία που αξιοποιείται στη διεθνή βιβλιογραφία για την εξέταση της ανθεκτικότητας δικτύου. Ωστόσο, διαπιστώθηκε η ιδιαίτερη έμφαση της υπάρχουσας έρευνας στο εμπόριο LNG στην περιοχή της ανατολικής Ασίας και, συνεπώς, η απουσία αντίστοιχων αναλύσεων που να εστιάζουν στην Ευρώπη, παρότι εξακολουθεί να αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο εισαγωγέα παγκοσμίως. Ακόμα, παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των μελετών διεξάγονται σε επίπεδο κρατών, και όχι σε επίπεδο λιμένων.

Για αυτό το λόγο, στα πλαίσια της ανάλυσης που εκπονήθηκε, αναζητήθηκαν δεδομένα σε επίπεδο λιμένων για τους εισαγωγείς του δικτύου, και σε επίπεδο κρατών για τους εξαγωγείς LNG. Αξιοποιήθηκαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων της Eurostat, που αφορούν τη διακίνηση των ευρωπαϊκών λιμένων για την

περίοδο μελέτης, από τις ετήσιες εκθέσεις του Διεθνούς Οργανισμού Εισαγωγέων LNG (GIIGNL), αναφορικά με το ετήσιο διακρατικό εμπόριο LNG, και από τη βάση δεδομένων του οργανισμού Gas Infrastructure Europe, σχετικά με την ημερήσια πληρότητα των τερματικών σταθμών εισαγωγής LNG στην Ευρώπη. Ακολούθησε η σύνθεση των δεδομένων που συλλέχθηκαν, ώστε να προκύψουν οι πίνακες των ετήσιων δικτύων ευρωπαϊκών εισαγωγών. Η εμπλοκή του στοιχείου των λιμένων στην ανάλυση χωρίς τη χρήση δεδομένων τύπου AIS (Automated Identification System) την καθιστά ιδιαίτερα πρωτοπόρο.

Ακολούθησε η δόμηση κατευθυνόμενου δικτύου, στο οποίο, εκτός των λιμένων εισαγωγής και των κρατών-εξαγωγέων, συμπεριλήφθηκαν σημεία συμφόρησης (chokepoints) των θαλάσσιων διαδρομών, που παρά την αποδεδειγμένα εξαιρετική σημασία τους για το θαλάσσιο εμπόριο, χρησιμοποιούνται ελάχιστα στην έως τώρα έρευνα του εμπορίου LNG. Επιλέχθηκαν δείκτες από τη Θεωρία Δικτύων, και συγκεκριμένα το μέγεθος δικτύου, η συνδεσιμότητα, η πυκνότητα, ο σταθμισμένος ή μη εσωτερικός και εξωτερικός βαθμός συνδεσιμότητας, η εσωτερική και εξωτερική κεντρικότητα, το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής, ο συντελεστής ομαδοποίησης και η ανθεκτικότητα του δικτύου. Αφού ορίστηκαν, τεκμηριώθηκε η χρήση τους και επεξηγήθηκε η φυσική τους σημασία, οι δείκτες υπολογίστηκαν μέσω προγραμματιστικού κώδικα που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB. Με τη χρήση του ίδιου κώδικα, εφαρμόστηκε ο επιλεγμένος αλγόριθμος διαχωρισμού εμπορικών κοινοτήτων στο δίκτυο, και διερευνήθηκε η ανθεκτικότητα του δικτύου και η ασφάλεια του εφοδιασμού της Ευρώπης με LNG. Η διερεύνηση αυτή διεξάχθηκε με προσομοίωση μεμονωμένων και σωρευτικών αστοχιών κόμβων του δικτύου, και ταυτόχρονη παρατήρηση της εξέλιξης ορισμένων από τους δείκτες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Σημειώνεται ότι οι σωρευτικές αστοχίες διακρίνονται σε τυχαίες απώλειες κόμβων και σε στοχευμένες επιθέσεις, ανάλογα με την αλληλουχία των κόμβων που αστοχούν.

Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν ιδιαίτερα χρήσιμα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τα οποία οπτικοποιήθηκαν με τη

βοήθεια διαγραμμάτων, πινάκων και χαρτών. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα σχολιάστηκαν, επιχειρήθηκε να ερμηνευτούν και εξετάστηκε η ταύτιση τους με ευρήματα αντίστοιχων ερευνών. Με βάση αυτά, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα. Καταρχάς, προκύπτει εμφανής μετατόπιση του κέντρου βάρους του δικτύου των ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG, από τις ακτές τις Μεσογείου σε αυτές του Ατλαντικού. Προκύπτει, επίσης, ότι κατά την περίοδο μελέτης εντάθηκαν σημαντικά τα μονοπωλιακά χαρακτηριστικά της αγοράς εξαγωγών, λόγω της αύξησης της εξάρτησης της Ευρώπης από περιορισμένο αριθμό εξαγωγέων. Ο αριθμός των εμπορικών κοινοτήτων μειώθηκε μετά τη συγχώνευση ορισμένων από αυτές, ενώ διαφαίνεται η τάση ενοποίησης του δικτύου εισαγωγών, ως πιθανό αποτέλεσμα της υιοθέτησης ενιαίας ενεργειακής στρατηγικής από τα ευρωπαϊκά κράτη. Ακόμα, συμπεραίνεται η κατά πολύ δυσμενέστερη επίδραση στοχευμένων επιθέσεων σε κόμβους του δικτύου σε σχέση με την τυχαία αστοχία τους και αναδεικνύεται η ιδιαίτερη σημασία κομβικών λιμένων, όπως αυτών του Rotterdam, του Zeebrugge και του Milford Haven, ή θαλάσσιων σημείων, όπως του Στενού του Γιβραλτάρ.

Υπό το πρίσμα αυτών των συμπερασμάτων, διατυπώνονται κατευθυντήριες συστάσεις προς την ενίσχυση της ασφάλειας του εφοδιασμού της Ευρώπης με LNG. Βασικοί άξονες της διατύπωσης είναι η προσαρμογή του σχεδιασμού στη νέα γεωγραφική κατανομή των βασικών εξαγωγέων, η διαφοροποίηση του χαρτοφυλακίου εισαγωγών για την βέλτιστη διαχείριση του κινδύνου και η προστασία κρίσιμων υποδομών του δικτύου. Σε σύντομη ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε, αναφέρθηκαν δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, πιθανές αδυναμίες της και καινοτομίες που υιοθετήθηκαν. Τέλος, διαμορφώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, οι οποίες εστιάζουν στην συμπερίληψη στο δίκτυο κομβικών σημείων εισαγωγών φυσικού αερίου δια αγωγών, καθώς και στη χρήση μοντέλων πρόβλεψης της μελλοντικής δομής του δικτύου, ώστε να προκύψει πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ασφάλειας του εφοδιασμού και των τάσεων της αγοράς.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ **1**

1.1. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο και η προοπτική του **1**

1. 2. Ο ρόλος του LNG στην ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης **4**

1.3. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας **6**

1.4. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας **7**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ **9**

2.1. Εισαγωγή **9**

2.2. Ανάλυση βιβλιογραφίας **10**

2.2.1. Ανάλυση δικτύου εμπορικών ροών LNG 10

2.2.2. Ασφάλεια εφοδιασμού LNG 24

2.3. Συμπεράσματα βιβλιογραφίας **30**

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ **32**

3.1. Περιγραφή διαδικασίας **32**

3.2. Θεωρητικό υπόβαθρο **34**

3.2.1. Κατασκευή δικτύου 34

3.2.2. Δείκτες της Θεωρίας Δικτύων 36

3.2.3. Αλγόριθμος εντοπισμού κοινοτήτων 40

3.2.4. Προσομοίωση αστοχιών στο δίκτυο 41

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ **43**

4.1. Βάση δεδομένων **43**

4.1.1. GIIGNL Annual Reports: ετήσιο διακρατικό εμπόριο 43

4.1.2. Eurostat: ετήσια διακίνηση λιμένων 46

4.1.3. ALSI: ημερήσια πληρότητα τερματικών σταθμών 48

4.1.4. Σύνθεση δεδομένων 51

4.2. Ανάπτυξη κώδικα **53**

4.3. Αποτελέσματα **56**

4.3.1. Εξέλιξη χωρικής δομής δικτύου 57

4.3.2. Εξέλιξη εμπορικών κοινοτήτων 67

4.3.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης 70

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ **76**

5.1. Ανασκόπηση διαδικασίας **76**

5.2. Συμπεράσματα και προτάσεις προς υιοθέτηση **77**

5.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα **78**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **80**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α **85**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β **95**

Ευρετήριο σχημάτων

Αριθμός	Σχήμα	Σελίδα
1.1	Εφοδιαστική αλυσίδα LNG	1
1.2	Συγκριτική εξέλιξη εμπορίου LNG και PNG	2
1.3	Περιθώρια ανταγωνισμού μέσων μεταφοράς φυσικού αερίου	2
1.4	Συγκέντρωση αποδεδειγμένων κοιτασμάτων το 2019	3
1.5	Εξαγόμενες ποσότητες και μερίδιο αγοράς το 2022	3
1.6	Εισαγόμενες ποσότητες και μερίδιο αγοράς το 2022	4
1.7	Πηγές εισαγωγών το 2019	5
1.8	Πηγή εισαγωγών LNG για το 2022 σε εκατομμύρια τόνους	6
2.1	Εξέλιξη χαρακτηριστικών δικτύου εμπορίου LNG	13
2.2	Πυκνότητα εμπορικού δικτύου LNG κατά τα έτη 2000, 2010 και 2021	14
2.3	Εξέλιξη μέσου ελάχιστου μήκος διαδρομής (L) και μέσου συντελεστή ομαδοποίησης (C)	15
2.4	Χωρική διάταξη λιμένων και κοινοτήτων εμπορίου LNG το 2017	17
2.5	Εμπόριο LNG μεταξύ λιμένων και κοινοτήτων το 2017	18
2.6	Πυκνότητα δικτύου εμπορίου LNG το 2022	19
2.7	Δίκτυο εισαγωγών LNG της Ευρώπης το 2018 και το 2020	20
2.8	Εμπορικές κοινότητες του δικτύου εισαγωγών LNG της Ευρώπης το 2018	21
2.9	Μέσος βαθμός του δικτύου και μέσος σταθμισμένος βαθμός του δικτύου εξαγωγών περιόδου 2005-2014	22
2.10	Ένταση διεθνών ανταγωνιστικών σχέσεων το 2000 και το 2020	24
2.11	Σχηματική παράθεση των εννοιών της αξιοπιστίας, της στιβαρότητας, της τρωτότητας και της ανθεκτικότητας του δικτύου	27
2.12	Σταθερότητα (NMI) δικτύου φυσικού αερίου, πετρελαίου και άνθρακα διαχρονικά	28
2.13	Μεταβολή ανθεκτικότητας και ανακαμψιμότητας κατά την προσομοίωση αστοχιών	29
2.14	Μεταβολή χαρακτηριστικών δικτύου εισαγωγών LNG στην Ευρώπη για το 2018 και το 2020 κατά την προσομοίωση αστοχιών	30
3.1	Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας της ανάλυσης	33

Αριθμός	Σχήμα	Σελίδα
3.2	Κατασκευή δικτύου ετήσιου εμπορίου LNG	34
3.3	Chokepoints που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των Meza et al. (2022)	35
3.4	Συμπληρωματικές πληροφορίες σχετικά με τα chokepoints που περιλαμβάνονται στο δίκτυο	36
4.1	Στοιχεία διακρατικού εμπορίου LNG για το 2020	44
4.2	Υπάρχοντες τερματικοί σταθμοί εισαγωγής LNG στην Ευρώπη στο τέλος του 2022	45
4.3	Εύρεση πακέτου δεδομένων mar_go_qm_delt	46
4.4	Διάταξη εξαγωγής δεδομένων από τη βάση της Eurostat	47
4.5	Εύρεση πακέτου δεδομένων port0499	48
4.6	Διάταξη εξαγωγής δεδομένων από τη βάση ALSI του GIE	50
4.7	Απεικόνιση χρήσης απλών συναρτήσεων για την σύνθεση περίπλοκων συναρτήσεων	56
4.8	Ενδεικτική παράθεση της σύνθεσης της συνάρτησης nwanalysis.m σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB	56
4.9	Χρονική εξέλιξη αριθμού κόμβων και συνδέσμων στο δίκτυο	58
4.10	Πηγές ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG (2018-2022) (αθροιστικά)	59
4.11	Πηγές ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG (2018-2022) (μεμονωμένα)	60
4.12	Διασπορά εισαγόμενου όγκου LNG στους ευρωπαϊκούς λιμένες το 2018	62
4.13	Διασπορά εισαγόμενου όγκου LNG στους ευρωπαϊκούς λιμένες το 2022	62
4.14	Χρονική εξέλιξη εξωτερικού και εσωτερικού βαθμού κεντρικότητας δικτύου	64
4.15	Χρονική εξέλιξη του μέσου ελάχιστου μήκους διαδρομής και του συντελεστή ομαδοποίησης του δικτύου	64
4.16	Γραφική απεικόνιση δικτύου ευρωπαϊκού εφοδιασμού LNG το 2018	66
4.17	Γραφική απεικόνιση δικτύου ευρωπαϊκού εφοδιασμού LNG το 2022	66
4.18	Χρονική εξέλιξη του δείκτη ανθεκτικότητας του δικτύου	67
4.19	Χρονική εξέλιξη σπονδυλότητας και αριθμού εμπορικών κοινοτήτων στο δίκτυο	68
4.20	Γεωγραφική διασπορά μελών εμπορικών κοινοτήτων το 2018	69
4.21	Γεωγραφική διασπορά μελών εμπορικών κοινοτήτων το 2022	69
4.22	Ποσοστιαία μεταβολή επίδοσης δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών	71
4.23	Ποσοστιαία μεταβολή LCC δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών	72

Αριθμός	Σχήμα	Σελίδα
4.24	Ποσοστιαία μεταβολή ανθεκτικότητας δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών	72
4.25	Ποσοστιαία μεταβολή συντελεστή ομαδοποίησης δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών	73
4.26	Μεταβολή ποσοστού μεγέθους LCC επί του συνολικού μεγέθους του δικτύου υπό την επίδραση σωρευτικών αστοχιών	74
4.27	Μεταβολή ανθεκτικότητας του δικτύου υπό την επίδραση σωρευτικών αστοχιών	75
4.28	Μεταβολή συντελεστή ομαδοποίησης του δικτύου υπό την επίδραση σωρευτικών αστοχιών	75

Ευρετήριο πινάκων

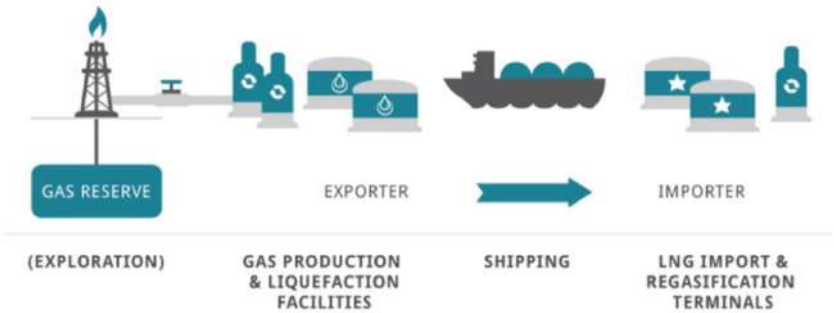
Αριθμός	Πίνακας	Σελίδα
2.1	Σχετική έρευνα αναφορικά με το εμπόριο LNG	9
4.1	Στοιχεία λιμένων και terminals εισαγωγής LNG του εξεταζόμενου δικτύου	53
4.2	Συναρτήσεις κώδικα με τα inputs και τα outputs κάθε μίας	55
4.3	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δεικτών ανάλυσης	57
4.4	Φθίνουσα κατάταξη των 15 πρώτων κόμβων ως προς τον μέγιστο εκ του εσωτερικού και του εξωτερικού σταθμισμένου βαθμού συνδεσιμότητας τους (2018, 2020 και 2022)	61

Εισαγωγή

1.1. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο και η προοπτική του

Από την πρώτη θαλάσσια μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) το 1958 από το Lake Charles των ΗΠΑ προς το Ηνωμένο Βασίλειο μέχρι σήμερα, το εμπόριο φυσικού αερίου έχει γνωρίσει αλματώδη ανάπτυξη (Kumar et al. 2011). Ενδεικτικά, η παγκόσμια κατανάλωση αυξήθηκε ραγδαία κατά την περίοδο 2000-2016, από τα 2404.6 στα 3670.4 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως, σημειώνοντας μέση ετήσια αύξηση 2.50% (Li et al. 2021). Βασικοί παράγοντες που συντέλεσαν προς αυτή την κατεύθυνση είναι τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το φυσικό αέριο έναντι των υπόλοιπων υγρών καυσίμων, και ιδιαίτερα του πετρελαίου. Σε σχέση με αυτό, το φυσικό αέριο πλεονεκτεί τόσο ως προς το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, όσο και ως προς το κόστος παραγωγής του (Hafezi et al. 2021). Μάλιστα, σύμφωνα με μελέτες, αποδεικνύεται ότι το φυσικό αέριο προκαλεί εκπομπές άνθρακα μικρότερες κατά 55% σε σχέση με τον άνθρακα και 17% σε σχέση με το αργό πετρέλαιο (Xiao et al. 2024). Τα χαρακτηριστικά αυτά, αποδίδουν στο φυσικό αέριο τη δυνατότητα να πρωταγωνιστήσει στην προσπάθεια του πλανήτη για πιο περιβαλλοντικά καθαρές πηγές ενέργειας.

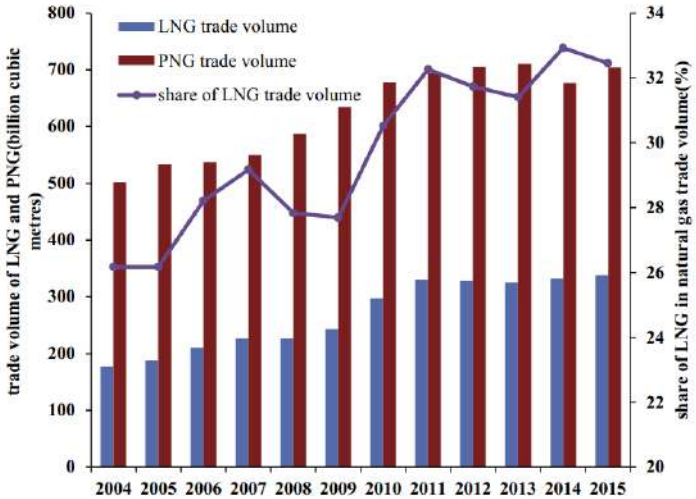
Κατά κύριο λόγο, η μεταφορά -και άρα και το εμπόριο- φυσικού αερίου διεξάγεται είτε μέσω αγωγών (PNG), είτε μέσω της υγροποίησης και της δια θαλάσσης μεταφοράς του (LNG). Σε αντίθεση με τον πρώτο τρόπο μεταφοράς, η εφοδιαστική αλυσίδα LNG αποτελεί πιο πολύπλοκο σύστημα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, αυτή αποτελείται από τη διαδοχή των σταδίων της παραγωγής, της υγροποίησης, της θαλάσσιας μεταφοράς στους -161ºC με τη βοήθεια ειδικού τύπου πλοίων, και τέλος τη διάθεσή τους προς επαναεριοποίηση στους τερματικούς σταθμούς.



Σχήμα 1.1 Εφοδιαστική αλυσίδα LNG (M. Xia, 2017)

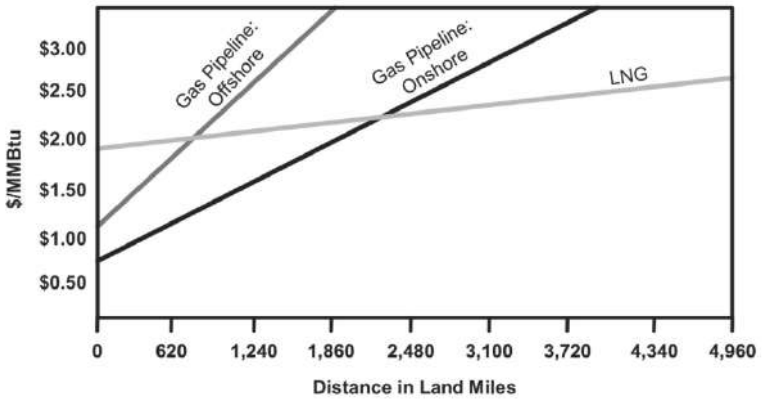
Παρά τη σαφώς πολυπλοκότερη διαδικασία που συνοδεύει το εμπόριο LNG σε σχέση με τη μεταφορά μέσω αγωγών, το πρώτο κερδίσει σταθερά έδαφος, όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 1.2, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη του όγκου

εμπορίου PNG και LNG, καθώς και το μερίδιο του δεύτερου στο σύνολο του εμπορίου φυσικού αερίου.



Σχήμα 1.2 Συγκριτική εξέλιξη εμπορίου LNG και PNG (Zhang et al. 2018)

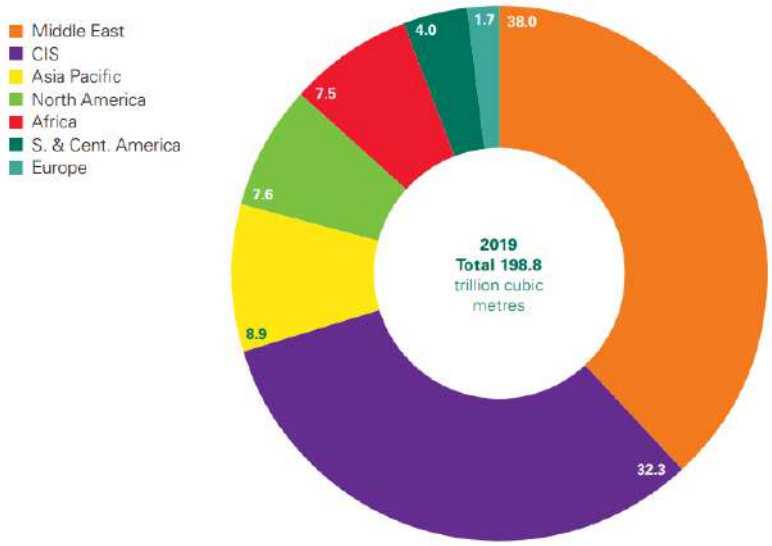
Μάλιστα, ενώ το 2015 το μερίδιο του LNG στο εμπόριο φυσικού αερίου ήταν 32%, σύμφωνα με προβλέψεις αυτό αναμένεται να αυξηθεί στο 48% το 2040 (Chen et al. 2016), ή ακόμα και να ξεπεράσει το μερίδιο του PNG το 2050 (Hou et al. 2024). Το φαινόμενο αυτό μοιάζει να έχει σαφή εξήγηση: η σημαντική γεωγραφική αποκέντρωση της ζήτησης φυσικού αερίου έρχεται σε αντίθεση με τη γεωγραφικά περιορισμένη, σχεδόν μονοπωλιακή, συγκέντρωση των κοιτασμάτων του, με αποτέλεσμα η ευελιξία των θαλάσσιων μεταφορών να μετατρέπεται σε όλο και πιο έντονο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Έτσι, η ανάγκη διεξαγωγής εμπορίου με γεωγραφικά απομακρυσμένους εταίρους καθιστά όλο και πιο συμφέρουσα τη στροφή στο LNG, όπως αποδεικνύεται μέσω του Σχήματος 1.3 παρακάτω.



Σχήμα 1.3 Περιθώρια ανταγωνισμού μέσων μεταφοράς φυσικού αερίου (Nikhalat-Jahromi et al. 2016)

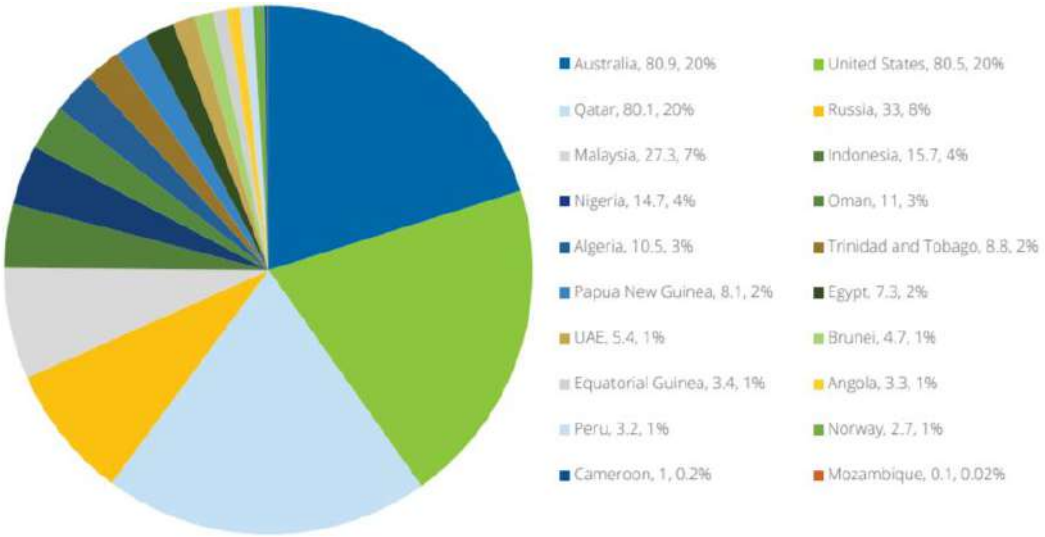
Η γεωγραφική συγκέντρωση των αποδεδειγμένων κοιτασμάτων φυσικού αερίου αποδεικνύεται ευκολότερα μέσω της εικόνας του Σχήματος 1.4, όπου σύμφωνα με

την BP, η συντριπτική πλειοψηφία τους συγκεντρώνεται στις περιοχές της συνεργασίας Commonwealth of Independent States (CIS) και στη Μέση Ανατολή.

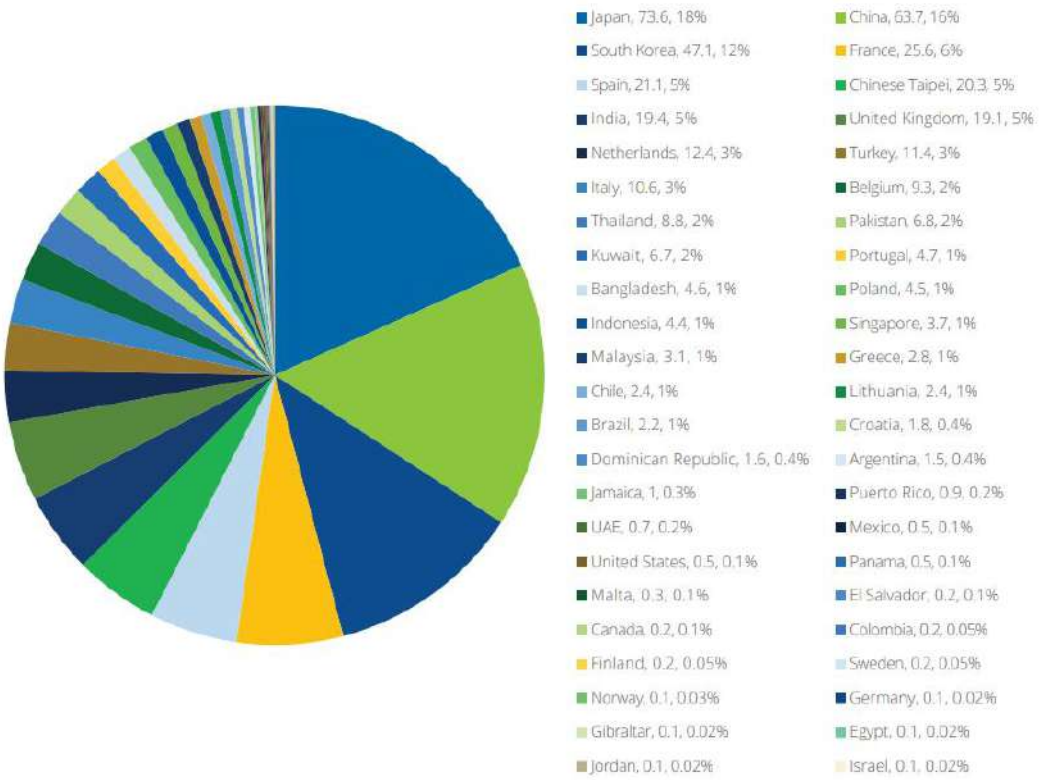


Σχήμα 1.4 Συγκέντρωση αποδεδειγμένων κοιτασμάτων το 2019 (BP Statistical Review of World Energy 2020)

Η έντονη αυτή ανισομέρεια που αποτυπώνεται, επομένως, αντισταθμίζεται μέσω των διηπειρωτικών συναλλαγών LNG. Στα Σχήματα 1.5 και 1.6 που ακολουθούν, παρατίθενται οι ποσότητες και τα μερίδια των εξαγωγών και των εισαγωγών αντίστοιχα για το 2022, σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αερίου (International Gas Union, IGU).



Σχήμα 1.5 Εξαγόμενες ποσότητες και μερίδιο αγοράς το 2022 (IGU 2023 World LNG Report)



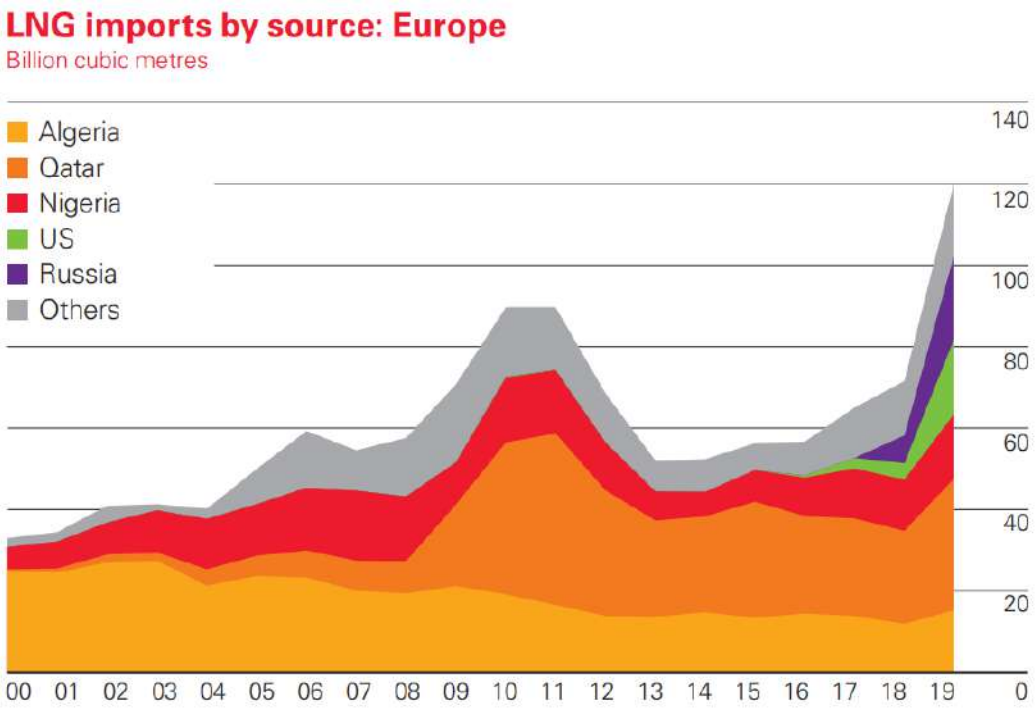
Σχήμα 1.6 Εισαγόμενες ποσότητες και μερίδιο αγοράς το 2022 (IGU 2023 World LNG Report)

Όπως είναι προφανές, περίπου το 75% των παγκόσμιων εξαγωγών προέρχονται από πέντε χώρες: την Αυστραλία, το Κατάρ, τις ΗΠΑ, τη Ρωσία και τη Μαλαισία. Αντίθετα, τα μερίδια εισαγωγών LNG εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη διασπορά και ομοιομορφία, με τις χώρες της ανατολικής Ασίας, που καλύπτουν τις ανάγκες των έντονα βιομηχανοποιημένων οικονομιών τους, και τις φτωχές σε φυσικούς πόρους ευρωπαϊκές χώρες να απορροφούν το 65% και 31% της παγκοσμίως διακινούμενης ποσότητας, αντιστοίχως.

1. 2. Ο ρόλος του LNG στην ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης

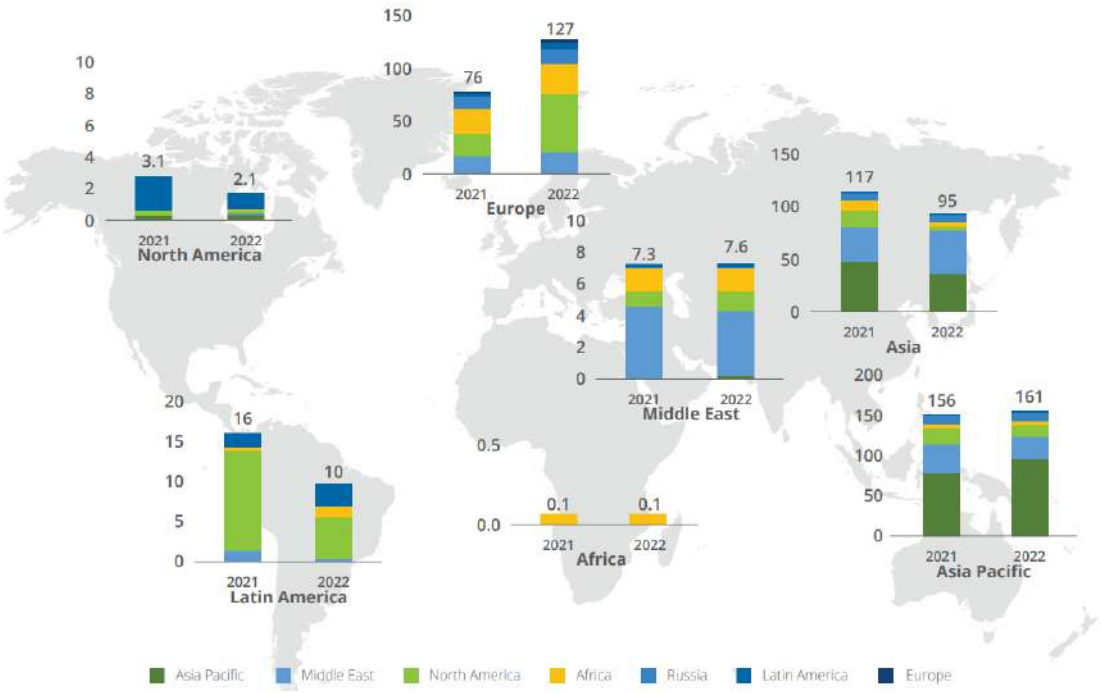
Η στροφή των ευρωπαϊκών κρατών στην αναζήτηση πιο βιώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την ένταση και την αστάθεια που διαρκώς αυξάνονται στο διεθνές τοπίο θέτουν σε κίνδυνο την ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης. Προκειμένου το φυσικό αέριο να αποτελέσει ‘καύσιμο-γέφυρα’ προς την πράσινη μετάβαση και να δώσει τη δυνατότητα στις χώρες της ηπείρου να προσαρμοστούν, είναι κρίσιμο να διασφαλιστεί η αδιάκοπη προμήθεια της ηπείρου στο σύγχρονο ασταθές διεθνές περιβάλλον. Οι ευρύτερες γεωπολιτικές, οικονομικές και υγειονομικές αλλαγές των τελευταίων ετών έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο χαρτοφυλάκιο εισαγωγών υγροποιημένου φυσικού της Ευρώπης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7 σύμφωνα με τη BP (BP Statistical Review of World Energy 2020),

το 2019 Ρωσία και ΗΠΑ κατείχαν σχεδόν ίσο μερίδιο στην προμήθεια της Ευρώπης. Παράλληλα, πάνω από το 50% της εισαγόμενης ποσότητας προερχόταν από Κατάρ, Αλγερία και Νιγηρία.



Σχήμα 1.7 Πηγές εισαγωγών το 2019 (BP Statistical Review of World Energy 2020)

Έκτοτε, η αύξηση του κόστους μεταφοράς λόγω της αναδυόμενης τρομοκρατίας, αναταράξεις της εφοδιαστικής αλυσίδας λόγω της πανδημίας COVID-19 και, κυρίως, οι κυρώσεις που επέφερε η Ρωσο-Ουκρανική σύρραξη απείλησαν την ασφάλεια του εφοδιασμού και προκάλεσαν ραγδαία αύξηση των τιμών του φυσικού αερίου, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ευμάρεια και τη συνοχή των ευρωπαϊκών κοινωνιών (Mei et al. 2024). Ενδεικτικά, η International Energy Agency (IEA) ανακοίνωσε ότι το πρώτο μισό του 2022, οι εισαγωγές ρωσικού αερίου στην Ευρώπη είχαν μειωθεί κατά 40%. Όλα τα παραπάνω συντέλεσαν στη ριζική αλλαγή του ενεργειακού τοπίου στην Ευρώπη όσον αφορά το φυσικό αέριο. Παρά την αλματώδη αύξηση των εισαγωγών της σε LNG από 86 το 2019 σε 127 εκατομμύρια τόνους (MT) το 2022, σύμφωνα με την IGU και το Σχήμα 1.8, η Ευρώπη κατάφερε να διατηρήσει σταθερό το μερίδιο της Ρωσίας στην αγορά και να διαφοροποιήσει το χαρτοφυλάκιο εισαγωγών της, με τις ΗΠΑ να αυξάνουν σημαντικά το μερίδιο τους στην ευρωπαϊκή αγορά, το οποίο ανέρχεται στο 43%, την ώρα που το επόμενο μεγαλύτερο, που αφορά το Κατάρ, ισούται με 16%.



Σχήμα 1.8 Πηγή εισαγωγών LNG για το 2022 σε εκατομμύρια τόνους (MT) (IGU 2023 World LNG Report)

1.3. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη μοντελοποίηση του δικτύου εισαγωγών LNG της Ευρώπης, στην ανάλυσή του και στη διερεύνηση της ασφάλειας του εφοδιασμού της ηπείρου. Ως περίοδος μελέτης θεωρείται η πενταετία 2018-2022. Αρχικά το δίκτυο δομείται σε επίπεδο κρατών για τους εξαγωγείς και σε επίπεδο λιμένων για τους εισαγωγείς, επιδιώκοντας την ευκρινή αποτύπωση των τοπολογικών χαρακτηριστικών του και της χρονικής εξέλιξής τους κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης μέσω δεικτών της Θεωρίας Σύνθετων Δικτύων (Complex Network Theory), καθώς και τον διαχωρισμό των βασικότερων εμπορικών κοινοτήτων (trading communities) που σχηματίστηκαν κατά την ίδια περίοδο. Στη συνέχεια, μέσω προσομοίωσης, επιχειρείται να διαπιστωθεί κατά πόσο ο εφοδιασμός της Ευρώπης με LNG είναι ασφαλής έναντι πιθανών αστοχιών του δικτύου.

Παρότι είναι σαφές ότι οι έννοιες που αφορούν το εμπόριο LNG συνδέονται ολοένα και περισσότερο με την ομαλή συνέχιση της καθημερινότητας των ευρωπαίων πολιτών, οι περισσότερες από αυτές αγνοούνται από σημαντική μερίδα τους. Πέρα, λοιπόν, από την εξοικείωση του κοινού με τις έννοιες αυτές, η παρούσα εργασία επιδιώκει να δώσει απάντηση στα εξής ερωτήματα:

- Πώς διαμορφώνεται σήμερα το τοπίο στην αγορά των ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG;
- Ποιες οι βασικότερες εμπορικές κοινότητες που συμμετέχουν σε αυτό;

- Είναι το δίκτυο εφοδιασμού της Ευρώπης με LNG σε θέση να αντιμετωπίσει αναταράξεις στην εφοδιαστική αλυσίδα που θα θέσουν σε κίνδυνο την ευημερία των ευρωπαϊκών εθνών;

Μιλώντας γενικότερα, τέτοιου είδους αναλύσεις ενισχύουν την ευρύτερη προσπάθεια διαμόρφωσης μίας **βιώσιμης προοπτικής ανάπτυξης** και μίας **ασφαλέστερης ενεργειακής πορείας** της Ευρώπης. Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα εργασία επιδιώκει να συνδράμει, μέσω χρήσιμων συμπερασμάτων και τεκμηριωμένων προτάσεων, στην προσπάθεια αυτή.

1.4. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Προκειμένου να διευκολυνθεί η ανάγνωση της διπλωματικής εργασίας, αλλά και να προσανατολιστούν οι αναγνώστες που ενδιαφέρονται για συγκεκριμένα στοιχεία της, ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της διάρθρωσής της.

Καταρχάς, στην **πρώτη ενότητα** ο αναγνώστης εισάγεται στο θέμα της εργασίας. Επιχειρείται η παρουσίαση δύο διαφορετικών οπτικών της θεματολογίας. Η πρώτη αφορά την παρουσίαση του φυσικού αερίου και της ισχυρής δυναμικής που αποκτά στη σύγχρονη αγορά ενέργειας. Παράλληλα, γίνεται εισαγωγή σε θεμελιώδεις έννοιες που συνοδεύουν το LNG, ενώ αναλύεται και εξηγείται η προοπτική του. Η δεύτερη αναδεικνύει τη σημασία της διασφάλισης της προμήθειας της Ευρώπης με LNG και γίνεται αναφορά στους κινδύνους που την απειλούν και περιγράφεται συνοπτικά η στρατηγική της Ευρώπης τα τελευταία έτη.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία παρατίθεται στη **δεύτερη ενότητα**. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα. Στο πρώτο, γίνεται μία παρουσίαση των εφαρμογών της Θεωρίας Δικτύων και των δεικτών που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση του εμπορικού δικτύου LNG, ενώ παρατίθενται σχετικά ευρήματα για το δίκτυο εφοδιασμού της Ευρώπης. Στο δεύτερο μέρος επιχειρείται να περιγραφούν οι προσεγγίσεις που αποσκοπούν στη διερεύνηση της ανθεκτικότητας των δικτύων. Τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα και εντοπίζονται ορισμένες ελλείψεις της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Στην **τρίτη ενότητα** τίθενται τα θεωρητικά θεμέλια του μοντέλου που αναπτύσσεται στη συνέχεια. Παρατίθενται οι δείκτες δικτύων που θα υπολογιστούν και επεξηγείται η φυσική τους σημασία, ο αλγόριθμος διαχωρισμού εμπορικών κοινοτήτων και το υπόβαθρο του και η μεθοδολογία των προσομοιώσεων.

Μέσω της **τέταρτης ενότητας**, γίνεται γνωστή η διαδικασία εύρεσης, συλλογής και επεξεργασίας των πρωτογενών στοιχείων μέχρι την τελική τους μορφή. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η ανάπτυξη του προγραμματιστικού κώδικα που

δημιουργήθηκε για τις ανάγκες τις ανάλυσης και αποτυπώνεται η δομή και η ευρύτητα των χρήσεων του. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τα οποία οπτικοποιούνται με τη βοήθεια πινάκων, χαρτών και διαγραμμάτων. Στη συνέχεια, τα ευρήματα σχολιάζονται, επιχειρείται να ερμηνευτούν και διαπιστώνεται κατά πόσο επιβεβαιώνονται παλαιότερες μελέτες.

Εν κατακλείδι, στην **πέμπτη ενότητα** γίνεται μία γενική αποτίμηση της διαδικασίας, των δυσκολιών και των αδυναμιών της, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα μέσω των αποτελεσμάτων, προτείνεται η εφαρμογή πολιτικών και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να μπουν οι βάσεις της ανάλυσης που πραγματοποιείται στην διπλωματική εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκε **βιβλιογραφική ανασκόπηση επί των μελετών** που αφορούν είτε το θέμα, είτε τη μεθοδολογία της ανάλυσης. Αυτό κατέστη εφικτό με τη βοήθεια επιστημονικών βάσεων δεδομένων (Science Direct και Scopus) και μέσω επιστημονικών άρθρων έγκυρων εκδόσεων (Elsevier κ.α.). Μέσω της ανάλυσης της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται, για κάθε σχετική έρευνα που εντοπίστηκε, τα στοιχεία εκείνα που κρίνονται χρήσιμα στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Τα στοιχεία αυτά αναλύονται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι αφιερωμένο στην **ανάλυση δικτύων εμπορικών ροών ως εργαλείο** και γίνεται μία σύντομη αναφορά στις ποικίλες χρήσεις του. Επίσης παρουσιάζονται δείκτες της Θεωρίας Σύνθετων Δικτύων που χρησιμοποιούνται συχνά για την ανάλυση εμπορικών ροών, ενώ, έπειτα, αναφέρονται τα ευρήματα τέτοιων αναλύσεων που αφορούν το εμπόριο LNG. Στο δεύτερο μέρος γίνεται μία περίληψη της εφαρμοσμένης **μεθοδολογίας διερεύνησης της ανθεκτικότητας** των δικτύων. Το σύνολο των μελετών που διερευνήθηκαν και αφορούν αποκλειστικά το LNG παρατίθενται στον Πίνακα 2.1 ακολούθως.

Πίνακας 2.1 Σχετική έρευνα αναφορικά με το εμπόριο LNG

Εργασία	Προσέγγιση	Μεθοδολογία	Πηγή δεδομένων	Περίοδος
Peng et al. (2021)	Χωρική δομή εμπορίου LNG και εμπορικές κοινότητες	Ανάλυση δικτύων και αλγόριθμος εντοπισμού κοινοτήτων	AIS Data (HiFleet)	2013-2017
Hou et al. (2023)	Χωρική δομή εμπορίου LNG	Ανάλυση δικτύων και αλγόριθμος πυρήνα-περιφέρειας	UN Comtrade Database	2000-2021
Geng et al. (2014)	Χωρική δομή εμπορίου και αποκέντρωση αγοράς PNG και LNG	Ανάλυση δικτύων και Minimum Spanning Tree model	BP Statistical Review	2000-2011
Li et al. (2021)	Χωρική δομή εμπορίου LNG και πρόβλεψη χωρών BRI	Ανάλυση δικτύων και αλγόριθμος πρόβλεψης	UN Comtrade Database	1992-2016
Filimonova et al. (2022)	Χωρική δομή εμπορίου LNG και πρόβλεψη	Ανάλυση δικτύων και αλγόριθμος πρόβλεψης	UN Comtrade Database	2019
Chen et al. (2016)	Ανάλυση ανταγωνισμού εξαγωγέων LNG	Ανάλυση δικτύων και αλγόριθμος εντοπισμού κοινοτήτων	UN Comtrade Database	2005-2014

Feng et al. (2017)	Χωρική δομή εμπορίου LNG και πρόβλεψη	Ανάλυση δικτύων και αλγόριθμος πρόβλεψης	UN Comtrade Database	2015
Zhu et al. (2023)	Ανάλυση ανταγωνισμού εισαγωγέων LNG και παράγοντες που τον επηρεάζουν	Ανάλυση δικτύων και μοντέλο βαρύτητας	UN Comtrade Database	2000-2020
Xiao et al. (2024)	Ανθεκτικότητα εμπορίου LNG κατά τη Ρωσο-ουκρανική σύγκρουση και εμπορικές κοινότητες	Ανάλυση δικτύων, αλγόριθμος εντοπισμού κοινοτήτων και προσομοίωση αναταράξεων	AIS Data (Shipxy)	2021-2022
Ding et al. (2020)	Ασφάλεια εφοδιασμού LNG Κίνας	Ανάλυση δικτύων και προσομοίωση αναταράξεων	AIS Data (HiFleet)	2011-2017
Sun et al. (2022)	Ανθεκτικότητα εμπορίου LNG και πετρελαίου	Ανάλυση δικτύων και προσομοίωση αναταράξεων	BP Statistical Review και UN Comtrade Database	2010, 2015 και 2020
Mei et al. (2024)	Χωρική δομή, εμπορικές κοινότητες και ανθεκτικότητα εμπορίου LNG	Ανάλυση δικτύων, αλγόριθμος εντοπισμού κοινοτήτων και προσομοίωση αναταράξεων	AIS Data (HiFleet)	2018-2020

2.2. Ανάλυση βιβλιογραφίας

2.2.1. Ανάλυση δικτύου εμπορικών ροών LNG

Τα τελευταία έτη η **ανάλυση δικτύων** κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος ως εργαλείο για τη διερεύνηση των εμπορικών σχέσεων, όπως θα αποδειχθεί παρακάτω με την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας. Μάλιστα, όσον αφορά το δίκτυο του **εμπορίου ενέργειας και ορυκτών πόρων**, η ανάλυση δικτύων φαίνεται να τυγχάνει ευρείας αποδοχής και να έχει αξιοποιηθεί για πολλούς διαφορετικούς σκοπούς:

- **Διερεύνηση χωρικής δομής και εξέλιξης του εμπορίου**: Το εμπόριο αργού πετρελαίου αποτελεί το συνηθέστερο πεδίο τέτοιου είδους έρευνας. Οι Yang et al. (2015) χρησιμοποίησαν δείκτες της Θεωρίας Δικτύων και δεδομένα από τη βάση δεδομένων των Ηνωμένων Εθνών για την περίοδο 1988-2013, με σκοπό να αναλύσουν το εμπόριο πετρελαίου και να παραθέσουν τη μεταβολή του κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Παρόμοιο σκοπό είχαν και οι έρευνες των Du et al. (2016) και Niu et al. (2023), οι οποίοι αξιοποίησαν την ίδια βάση δεδομένων για τις περιόδους 2001-2013 και 2000-2020 αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι Peng et al. (2019) έλαβαν μαζικά δεδομένα τροχιών πλοίων μεταφοράς πετρελαίου μέσω του Automatic Identification System (AIS) για το 2016, με τα οποία διερεύνησαν το δίκτυο μεταφορών πετρελαίου σε επίπεδο λιμένων, προκειμένου να εντοπίσουν του κομβικούς για το εμπόριο λιμένες (hub ports). Εκτός του

αργού πετρελαίου, οι Wang et al. (2019a) ανέλυσαν το δίκτυο εμπορίου άνθρακα για την περίοδο 1996-2015, ενώ οι Chen et al. (2023) εστίασαν στο εμπόριο ενέργειας μεταξύ των χωρών της ζώνης Belt and Road. Τέλος, οι Gao et al. (2015) και Zhong et al (2016) ανέλυσαν το εμπόριο ορυκτών καυσίμων για τις περιόδους 2002-2013 και 2000-2008 αντίστοιχα.

- **Εντοπισμός εμπορικών κοινοτήτων**: Η διαδικασία του διαχωρισμού κοινοτήτων συνήθως έπεται της διερεύνησης της χωρικής δομής του δικτύου και συμπληρώνει τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματά της. Οι εμπορικές κοινότητες απαρτίζονται από κόμβους του δικτύου, χώρες ή λιμένες, που παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες. Οι Xu et al. (2024) επιχείρησαν να εντοπίσουν τις κοινότητες του δικτύου εμπορίου σπάνιων γαιών, οι Yang et al. (2015) έκαναν το ίδιο για την περίπτωση του αργού πετρελαίου, ενώ οι Gao et al. (2015) διερεύνησαν τις εμπορικές κοινότητες ορυκτών καυσίμων. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως όλοι οι αλγόριθμοι διαχωρισμού κοινοτήτων που συναντήθηκαν βασίζονται στην έννοια και τον υπολογισμό της τμηματικότητας (modularity). Ένας από τους ευρέως διαδεδομένους αλγορίθμους προτάθηκε από τους Blondel et al. (2008) και έχει χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό κοινοτήτων από τους Ji et al. (2014) για το εμπόριο πετρελαίου, τους Zhong et al. (2017) για το εμπόριο ορυκτών καυσίμων και τους Peng et al. (2020) για το εμπόριο υγροποιημένου αερίου πετρελαίου.
- **Εξέταση εμπορικών εξαρτήσεων**: Οι Wang et al. (2022), αφού δημιούργησαν το δίκτυα εμπορίου ορυκτών καυσίμων, χρησιμοποίησαν τη μέθοδο PMI προκειμένου να σταθμίσουν τους συνδέσμους του δικτύου και να εντοπίσουν τις σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των χωρών. Την ίδια μέθοδο αξιοποίησαν και οι An et al. (2018), με σκοπό να διερευνήσουν τις εμπορικές εξαρτήσεις πετρελαίου που προέκυψαν από την πτώση της τιμής του πετρελαίου κατά την περίοδο 2014-2017. Επίσης, οι Xu et al. (2024), αναλύοντας το εμπόριο σπάνιων γαιών, χρησιμοποίησαν τον δείκτη εξάρτησης (dependency index) ως έναν από τους δείκτες αξιολόγησης του δικτύου.
- **Βελτιστοποίηση της δομής εμπορίου**: Οι Dong et al. (2020) επιστράτευσαν τον αλγόριθμο Simulated Annealing Algorithm και άντλησαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων των Ηνωμένων Εθνών για τη διακίνηση πετρελαίου κατά την περίοδο 2010-2016, σε μία προσπάθεια να βελτιστοποιήσουν το δίκτυο των αντίστοιχων μεταφορών.
- **Διερεύνηση ανταγωνιστικών σχέσεων:** Η διερεύνηση των εμπορικών σχέσεων δεν περιορίζεται μόνο στην ανάλυση των εμπορικών συναλλαγών, αλλά επεκτείνεται και σε αυτή των ανταγωνιστικών σχέσεων. Οι Zhang et al. (2014) διεξήγαγαν εκτεταμένη έρευνα αναφορικά με τις ανταγωνιστικές σχέσεις των εισαγωγέων στο διεθνές εμπόριο αργού πετρελαίου επαναφέροντας τον δείκτη ανταγωνισμού που εισήγαγαν οι Glick & Rose (1999). Με τη βοήθεια του δείκτη αυτού ακολούθησε εκτεταμένη έρευνα του

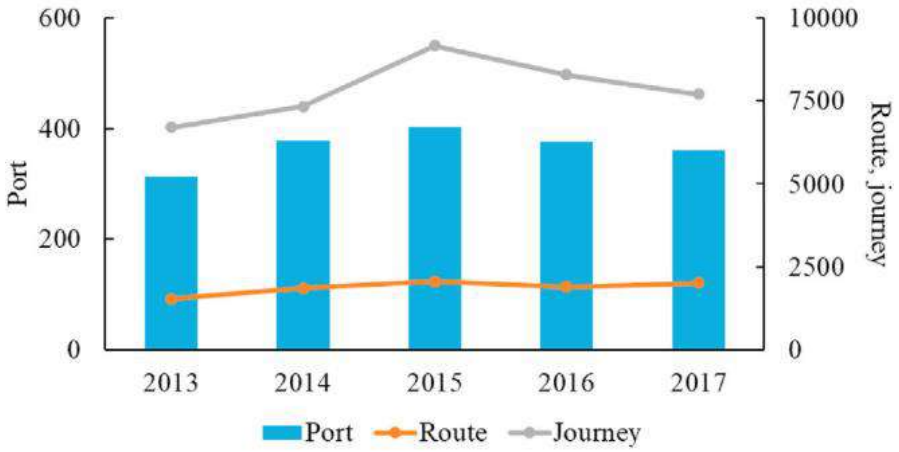
ανταγωνισμού του εμπορίου ορυκτών πόρων. Πρώτοι οι Hao et al. (2018) εστίασαν στο εμπόριο σιδηρομεταλλευμάτων, ενώ ακολούθησαν οι Wang et al. (2019b) με τη διερεύνηση παγκόσμιων εισαγωγών γραφίτη. Οι Wang et al. (2021) αξιολόγησαν τις ανταγωνιστικές σχέσεις μεταξύ των εισαγωγέων άνθρακα, ενώ το ίδιο έκαναν οι Huang et al. (2021) και Shao et al. (2021) για τις εισαγωγές βολφραμίου και λίθου αντίστοιχα. Τέλος, το εμπόριο σπάνιων γαιών εξετάστηκε όσον αφορά τον ανταγωνισμό των εισαγωγέων από τους Xu et al. (2024) και από αυτόν των εξαγωγέων από τους Zhang et al. (2022).

Παρά την, όπως φαίνεται, ιδιαίτερα ευρεία εφαρμογή της ανάλυσης εμπορικών δικτύων ενέργειας και ορυκτών πόρων, η βιβλιογραφία δεν μοιάζει εξίσου εκτεταμένη στης περίπτωση του **Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG)**.

Όπως φαίνεται από τη βιβλιογραφία που παρατίθεται στη συνέχεια, ο συνηθέστερος σκοπός ανάλυσης του δικτύου του παγκοσμίου εμπορίου φυσικού αερίου είναι ο **προσδιορισμός της τοπολογικής δομής του και της χωρικής εξέλιξής** του. Οι Geng et al. (2014) διεξήγαγαν μία πρωτότυπη έρευνα, κατασκευάζοντας το παγκόσμιο δίκτυο φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας δεδομένα αναφορών της BP για την περίοδο 2000-2011. Ως σκοπό είχαν την ανάλυση του εμπορίου με τη χρήση δεικτών της Θεωρίας Δικτύων προκειμένου να διαπιστωθεί αν επρόκειτο για δίκτυο ελεύθερης κλίμακας (free-scale network), ενώ διερεύνησαν το βαθμό ενοποίησης της παγκόσμιας αγοράς με τη βοήθεια αλγορίθμου Minimum Spanning Tree. Οι Li et al. (2021) βασίστηκαν σε ένα δείγμα 66 χωρών της εμπορικής ζώνης Belt and Road για την περίοδο 1992-2016, για το οποίο έλαβαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων των Ηνωμένων Εθνών, θέλοντας να πραγματοποιήσουν μία συγκριτική ανάλυση των δικτύων εμπορίου LNG και φυσικού αερίου δια αγωγών (PNG). Ακόμη, την ίδια βάση δεδομένων χρησιμοποίησαν οι Hou et al. (2023) για να διευρύνουν την ανάλυση του εμπορίου LNG σε 215 χώρες για την περίοδο 2000-2021, εξετάζοντας με τον τρόπο αυτό για πρώτη φορά την επιρροή της πανδημίας του COVID-19. Η μοναδική έρευνα σε επίπεδο λιμένων αναφορικά με το παγκόσμιο εμπόριο LNG διεξήχθη από τους Peng et al. (2020), οι οποία αξιοποίησε μαζικά δεδομένα τροχιών πλοίων της περιόδου 2013-2017.

Στις τρεις πρώτες μελέτες (Geng et al. (2014), Li et al (2021), Hou et al. (2023)) μοντελοποιείται δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις χώρες-εταίρους, οι σύνδεσμοι τις μεταξύ τους εμπορικές σχέσεις και ως στάθμιση των συνδέσμων χρησιμοποιείται ο εμπορικός όγκος του συναλλασσόμενου LNG. Οι Peng et al. (2020) χρησιμοποίησαν ως κόμβους του δικτύου τους εμπλεκόμενους λιμένες και ως στάθμιση των συνδέσμων τον αριθμό των ταξιδιών που διενεργήθηκαν κατά την περίοδο μελέτης. Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε το γράφημα του Σχήματος 2.1 που παρουσιάζει τον αριθμό των κόμβων και των συνδέσμων του

δικτύου, δηλαδή των λιμένων και των εμπορικών διαδρομών αντίστοιχα, για την περίοδο αυτή.

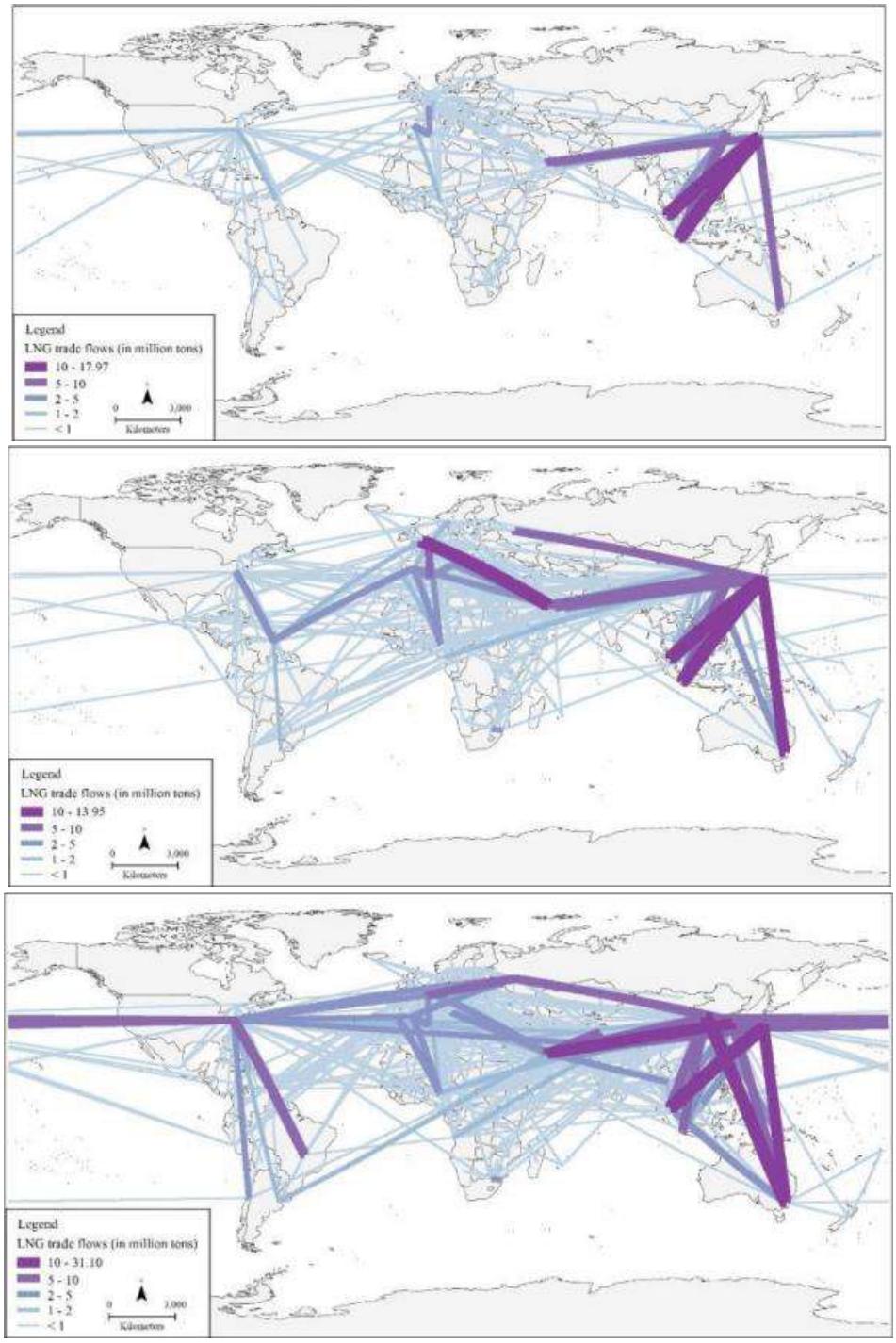


Σχήμα 2.1 Εξέλιξη χαρακτηριστικών δικτύου εμπορίου LNG (Peng et al. 2020)

Η περίοδος έρευνας μπορεί να χωριστεί σε δύο περιόδους: σε αυτή μεταξύ των 2013 και 2015 και αυτή μεταξύ των 2015-2017. Στην πρώτη ο αριθμός λιμένων, διαδρομών και ταξιδιών αυξάνεται με ρυθμούς 14,4%, 17,7% και 18,4% αντίστοιχα. Στη δεύτερη ο αριθμός λιμένων και ταξιδιών μειώθηκε, παραμένοντας πάντως σε υψηλότερα επίπεδα από αυτά του 2013.

Για την ανάλυση των δικτύων αυτών επιστρατεύτηκαν πολλοί διαφορετικοί δείκτες από τη Θεωρία Δικτύων, με τους βασικότερους να είναι οι εξής:

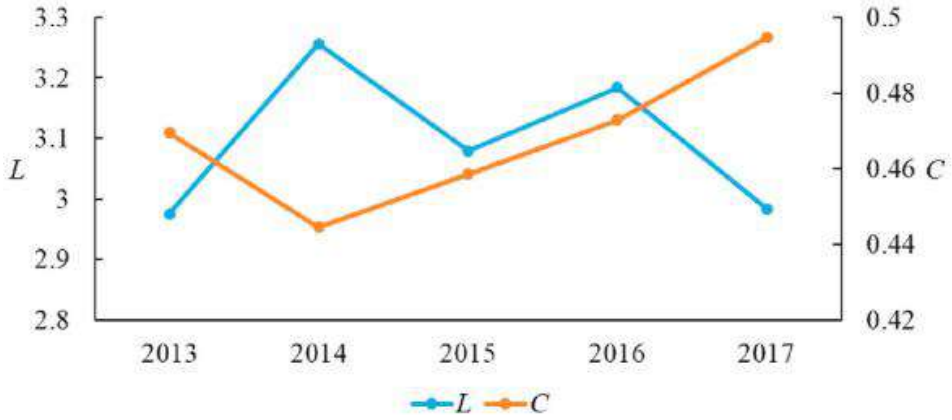
- **Πυκνότητα δικτύου:** Η πυκνότητα του δικτύου (network density) χρησιμοποιήθηκε από την πλειοψηφία των παραπάνω ερευνών (Geng et al. (2014), Li et al. (2021), Hou et al. (2023)). Εξαρτάται από τη σχέση του πλήθους των κόμβων και των συνδέσμων του δικτύου και εκφράζει τη στενότητα των εμπορικών σχέσεων του. Σύμφωνα με τους Geng et al. (2014), η πυκνότητα των δικτύων LNG και PNG παραμένει χαμηλή λόγω του γεγονότος ότι οι συναλλασσόμενες ώρες συνδέονται απευθείας μεταξύ τους. Οι Hou et al. (2023) συμπεραίνουν ότι η πυκνότητα του δικτύου LNG αυξάνεται σταθερά, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2 για τα έτη 2000, 2010 και 2021, ενώ οι Li et al. (2021) διαπιστώνουν ότι το ίδιο συμβαίνει και για το εμπόριο PNG. Αντίθετα, οι Geng et al. (2014) θεωρούν ότι οι διακυμάνσεις της πυκνότητας του εμπορίου PNG, αλλά και η χαμηλότερη τιμής της σε σχέση με αυτή του εμπορίου LNG οφείλονται στην αυξημένη ευελιξία και ανθεκτικότητα του τελευταίου.



Σχήμα 2.2 Πυκνότητα εμπορικού δικτύου LNG κατά τα έτη 2000, 2010 και 2021 (από πάνω προς τα κάτω) (Hou et al. 2023)

- **Συντελεστής ομαδοποίησης:** Ο συντελεστής ομαδοποίησης (clustering coefficient ή transitivity) χρησιμοποιήθηκε από το σύνολο των τεσσάρων ερευνών με σκοπό να αποτυπωθεί η στενότητα της σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων που διατηρούν έναν κοινό εμπορικό εταίρο. Οι Hou et al. (2023) παρατήρησαν τη σταθερή ανοδική τάση του συντελεστή ομαδοποίησης κατά την περίοδο, η οποία επιταχύνθηκε την περίοδο 2010-2015. Παρομοίως, οι Peng et al. (2020) δημιούργησαν το διάγραμμα του Σχήματος

2.3, οπού καταγράφεται η μικρή κάμψη του συντελεστή το 2014. Οι Geng et al. (2014) και οι Li et al. (2021), αφότου διαπίστωσαν την αύξηση της τιμής του δείκτη τόσο στο δίκτυο LNG όσο και σε αυτό του PNG, σχολίασαν ότι η αύξηση του πρώτου είναι σημαντικά ταχύτερη λόγω της ευελιξίας των θαλάσσιων μεταφορών έναντι αυτών με αγωγό.



Σχήμα 2.3 Εξέλιξη μέσου ελάχιστου μήκος διαδρομής (L) και μέσου συντελεστή ομαδοποίησης (C) (Peng et al. 2020)

- **Μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής:** Ο συγκεκριμένος δείκτης (average path length) ή ο συντελεστής παγκόσμιας αποδοτικότητας (global efficiency), που προτάθηκε από τους Latora & Marchiori (2001) και επιτελεί τον ίδιο ρόλο, χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό στη σχετική βιβλιογραφία (Geng et al. (2014), Peng et al. (2020), Hou et al. (2023)). Το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής εκφράζει την τοπολογική εγγύτητα μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Τόσο οι Hou et al. (2023) όσο και οι Peng et al. (2020), όπως επίσης φαίνεται στο Σχήμα 2.3 παραπάνω, συμπεραίνουν ότι ο δείκτης εμφανίζει συνολικά μικρή μείωση που όμως παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, γεγονός που δείχνει ότι το δίκτυο του εμπορίου LNG βρίσκεται ακόμα υπό διαμόρφωση
- **Κεντρικότητα βαθμού σύνδεσης:** Ο δείκτης χρησιμοποιήθηκε τόσο από τους Geng et al. (2014) όσο και από τους Li et al. (2021) με σκοπό να αναδείξουν τη συγκέντρωση των βαθμών συνδεσιμότητας και συνεπώς την ένταση του μονοπωλίου της αγοράς, η οποία υποδηλώνει την προνομιακή προσκόλληση νεοεισελθέντων εισαγωγέων προς τους κυρίαρχους εξαγωγείς (Freeman 1979). Και στις δύο έρευνες διαπιστώθηκε η σταθερή αύξηση του βαθμού του μονοπωλίου στις εξαγωγές LNG. Μάλιστα, οι Geng et al. (2014) εξηγούν ότι η συγκέντρωση των αποθεμάτων φυσικού αερίου σε περιορισμένες περιοχές του πλανήτη οδηγεί στη διατήρηση μεγάλου μεριδίου της αγοράς από τις κυρίαρχες χώρες-εξαγωγείς, όπως ενδεικτικά το Κατάρ, το οποίο από το 10,25% του παγκόσμιου μεριδίου αγοράς το 2000, έφτασε το 2011 να κατέχει το 31,01%. Οι Li et al. (2021) με τη σειρά

τους προσθέτουν ότι ο αντίστοιχος δείκτης στην αγορά PNG παραμένει σταθερός.

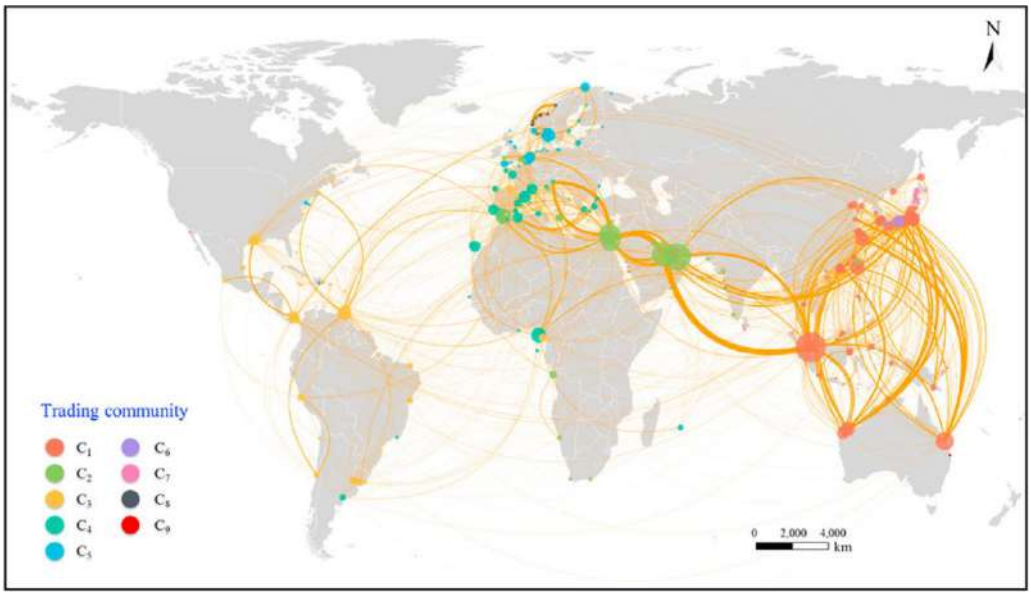
- **Κατανομή βαθμού σύνδεσης:** Οι Geng et al. (2014) χρησιμοποίησαν την κατανομή με σκοπό να διερευνήσουν κατά πόσο το δίκτυο εμπορίου LNG αποτελεί δίκτυο ελεύθερης κλίμακας (scale-free network). Η δομή τέτοιων δικτύων αποτελείται από μία ομάδα κόμβων με εξέχοντα ρόλο στη δομή του δικτύου και μία ομάδα κόμβων με χαμηλή συνδεσιμότητα στο δίκτυο και υψηλή εξάρτηση. Τα δίκτυα εμπορίου φυσικού αερίου παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τέτοια δομή, με το φαινόμενο να παρατηρείται εντονότερο στο εμπόριο PNG.Οι Peng et al. (2020) συμπληρώνουν ότι το ποσοστό των κόμβων με πάνω από 30 συνδέσεις αυξήθηκε από 8,9% το 2023 σε 10,8% το 2017.

Εκτός των παραπάνω βασικών δεικτών, αξίζει να σημειωθεί ότι οι Hou et al. (2023) χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο που πρότειναν οι Della Rosa et al. (2013) προκειμένου να διαμορφώσουν το προφίλ πυρήνα-περιφέρειας (core-periphery profile) του δικτύου, δηλαδή να διαχωρίσουντο δίκτυο σε μία περιοχή πυκνότερων και μία περιοχή αραιότερων συναλλαγών. Για τον ίδιο σκοπό, οι Li et al. (2021) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο αποσύνθεσης k-core.

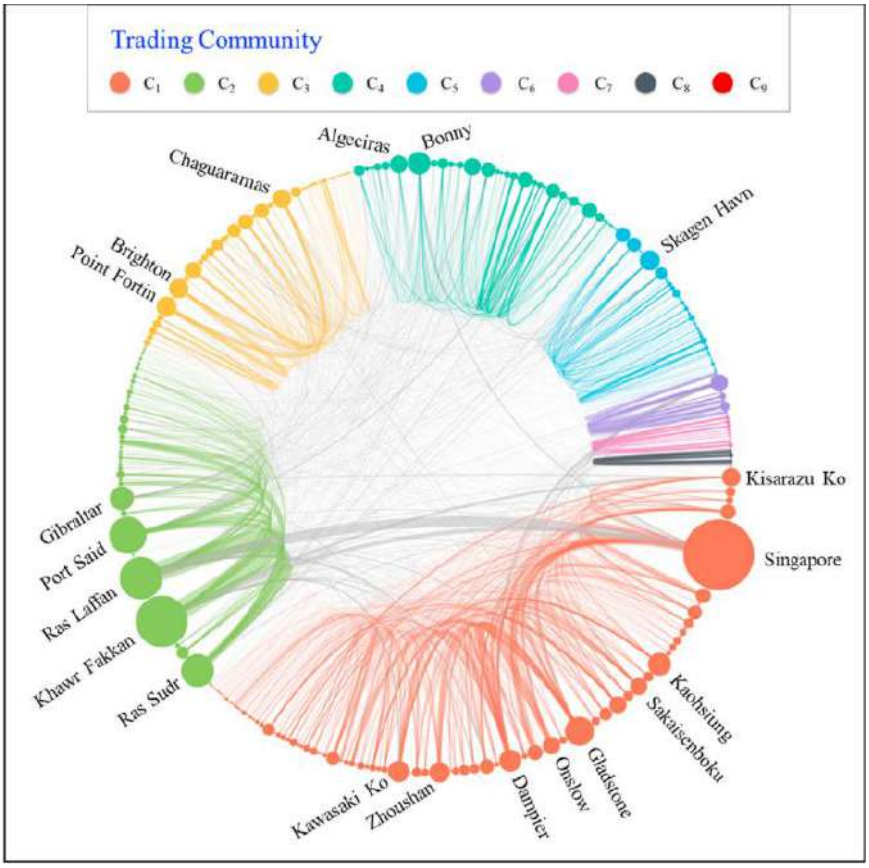
Σε επίπεδο λιμένων, οι Peng et al. (2020) επιχείρησαν να εντοπίσουν τους λιμένες που συμμετέχουν σε σημαντικά πολλές διαδρομές και διατηρούν ζωτικό ρόλο στο παγκόσμιο εμπόριο, τους οποίους χαρακτήρισαν **κομβικούς (hub ports)**. Καταγράφοντας και συγκρίνοντας τους 10 πιο καλά συνδεδεμένους στο δίκτυο λιμένες για το 2013 και το 2017, παρατηρείται εύκολα ότι οι 3 πρώτοι σε συνδεόμενες διαδρομές λιμένες παραμένουν ίδιοι. Ο λιμένας της Σιγκαπούρης διατηρεί σταθερά την πρώτη θέση, με τη χώρα να χαρακτηρίζεται ως ο σημαντικότερος παγκόσμιος κόμβος εμπορίου LNG. Σημειώνεται ότι η διακίνηση στον εν λόγω λιμένα δεν περιορίζεται στις μεταφορτώσεις LNG από μεγαλύτερα σε μικρότερα σκάφη με σκοπό να διανεμηθούν στην περιοχή της ανατολικής Ασίας, αλλά επεκτείνεται και στην τροφοδότηση αγωγών από τη Σιγκαπούρη προς γειτονικές χώρες-εισαγωγείς φυσικού αερίου, όπως η Μαλαισία και η Ινδονησία. Δεύτερος κατατάσσεται ο λιμένας Khawr Fakkan των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων (ΗΑΕ), που με τη γεωγραφικά προνομιακή του θέση στα Στενά του Ορμούζ, αποτελεί τόσο σημείο εισαγωγής LNG των ΗΑΕ, όσο και σημείο μεταφόρτωσης του εξαγόμενου φυσικού αερίου. Τρίτος εμφανίζεται ο λιμένας της Ras Laffan στο Κατάρ, ο οποίος, λόγω της εξέχουσας θέσης του Κατάρ στο μερίδιο των παγκόσμιων εξαγωγών LNG, αποτελεί αποκλειστικά σημείο εξαγωγών. Τέλος, η μείωση της διαφοράς των τριών πρώτων λιμένων από τους υπόλοιπους 7 που συμπληρώνουν την πρώτη δεκάδα με την πάροδο των χρόνων υποδεικνύει την ‘’ωρίμανση’’ του παγκόσμιου εμπορίου LNG, ενώ επίσης παρατηρείται ότι το 2017, οι υπόλοιποι 7 λιμένες, με εξαίρεση αυτόν του Γιβραλτάρ, αποτελούν σημεία εισαγωγής σημαντικών χωρών-καταναλωτών του δικτύου, κάτι που επιβεβαιώνει την αντίθεση μεταξύ της συγκέντρωσης των αποθεμάτων φυσικού αερίου σε

περιορισμένες περιοχές του πλανήτη και της υψηλής διασποράς των καταναλωτών.

Παράλληλα, στην ίδια έρευνα έγινε προσπάθεια να εντοπιστούν οι **εμπορικές κοινότητες** λιμένων και η εξέλιξή τους, με τη βοήθεια της έννοιας της τμηματικότητας(modularity) και του αλγόριθμου που πρότειναν οι Blondel et al. (2008). Συνάγεται το συμπέρασμα ότι, παρότι ο αριθμός των κοινοτήτων κυμαίνεται από 8 έως 11 κατά την περίοδο 2023-2017, η τμηματικότητας του δικτύου αυξάνεται σταθερά, κάτι που δείχνει ότι το διεθνές εμπόριο LNG αποκεντρώνεται όλο και περισσότερο. Η γεωγραφική διάταξη των κοινοτήτων το 2017 απεικονίζεται στο χάρτη του Σχήματος 2.4 και οι συνδέσεις μεταξύ των λιμένων ίδιας κοινότητας στο Σχήμα 2.5, όπου το μέγεθος του λιμένα αντιπροσωπεύει το πλήθος των συνδεόμενων διαδρομών, το πάχος της διαδρομής το πλήθος των διενεργούμενων ταξιδιών και το χρώμα την εμπορική κοινότητα.



Σχήμα 2.4 Χωρική διάταξη λιμένων και κοινοτήτων εμπορίου LNG το 2017 (Peng et al. 2020)



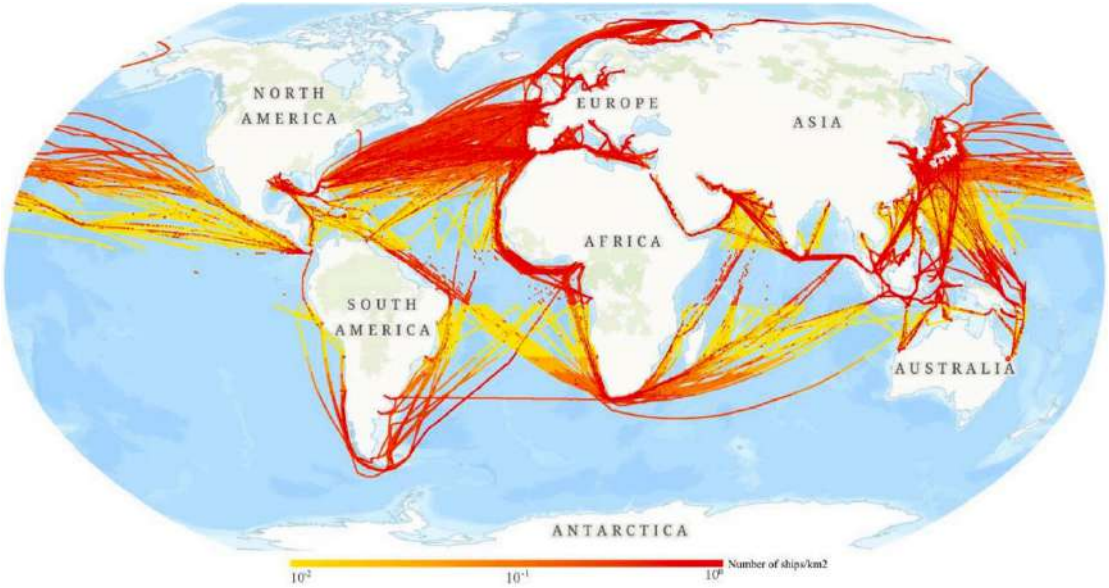
Σχήμα 2.5 Εμπόριο LNG μεταξύ λιμένων και κοινοτήτων το 2017 (Peng et al. 2020)

Από τις συνολικά 9 κοινότητες το 2017, θεωρείται ότι οι κοινότητες C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, όπως φαίνονται στα παραπάνω Σχήματα, είναι οι σημαντικότερες, κάτι που προκύπτει όχι μόνο από το πλήθος των λιμένων που αυτές περιλαμβάνουν, αλλά και από τη συμμετοχή των σημαντικότερων κομβικών λιμένων σε αυτές. Η πρώτη κοινότητα περιλαμβάνει 112 λιμένες σε 19 διαφορετικές χώρες, αποτελώντας έτσι την ευρύτερη εμπορική ομάδα, και αφορά κατά πλειοψηφία λιμένες της ανατολικής Ασίας. Η δεύτερη κοινότητα αντικατοπτρίζει κυρίως τις εκτεταμένες συναλλαγές μεταξύ χωρών εξαγωγέων της Μέσης Ανατολής και των σημαντικών εισαγωγέων της νότιας Ασίας και νότιας Ευρώπης. Τέλος, η τέταρτη και η πέμπτη κοινότητα αντανακλούν κυρίως το αυξημένο εμπόριο από την ανατολική Αφρική προς την Ευρώπη και το εμπόριο των χωρών του βορείου Ατλαντικού μεταξύ τους, αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω, είναι πλέον εφικτό να συναχθούν χρήσιμα συμπεράσματα **σε παγκόσμιο επίπεδο**. Συγκεκριμένα, το παγκόσμιο εμπόριο LNG μπορεί να χωριστεί σε τρεις διαφορετικές εμπορικές ζώνες: μία ζώνη λιμένων των χωρών της Μέσης Ανατολής και της Αυστραλίας που εξάγουν σε σημαντικές χώρες-εισαγωγείς της νοτιοανατολικής Ασίας, το εμπόριο μεταξύ των χωρών-εξαγωγέων της Μέσης Ανατολής και της Αφρικής και των χωρών-εισαγωγέων της Ευρώπης, και τέλος το σχετικά ανεξάρτητο εμπόριο LNG μεταξύ των χωρών της Αμερικανικής ηπείρου.

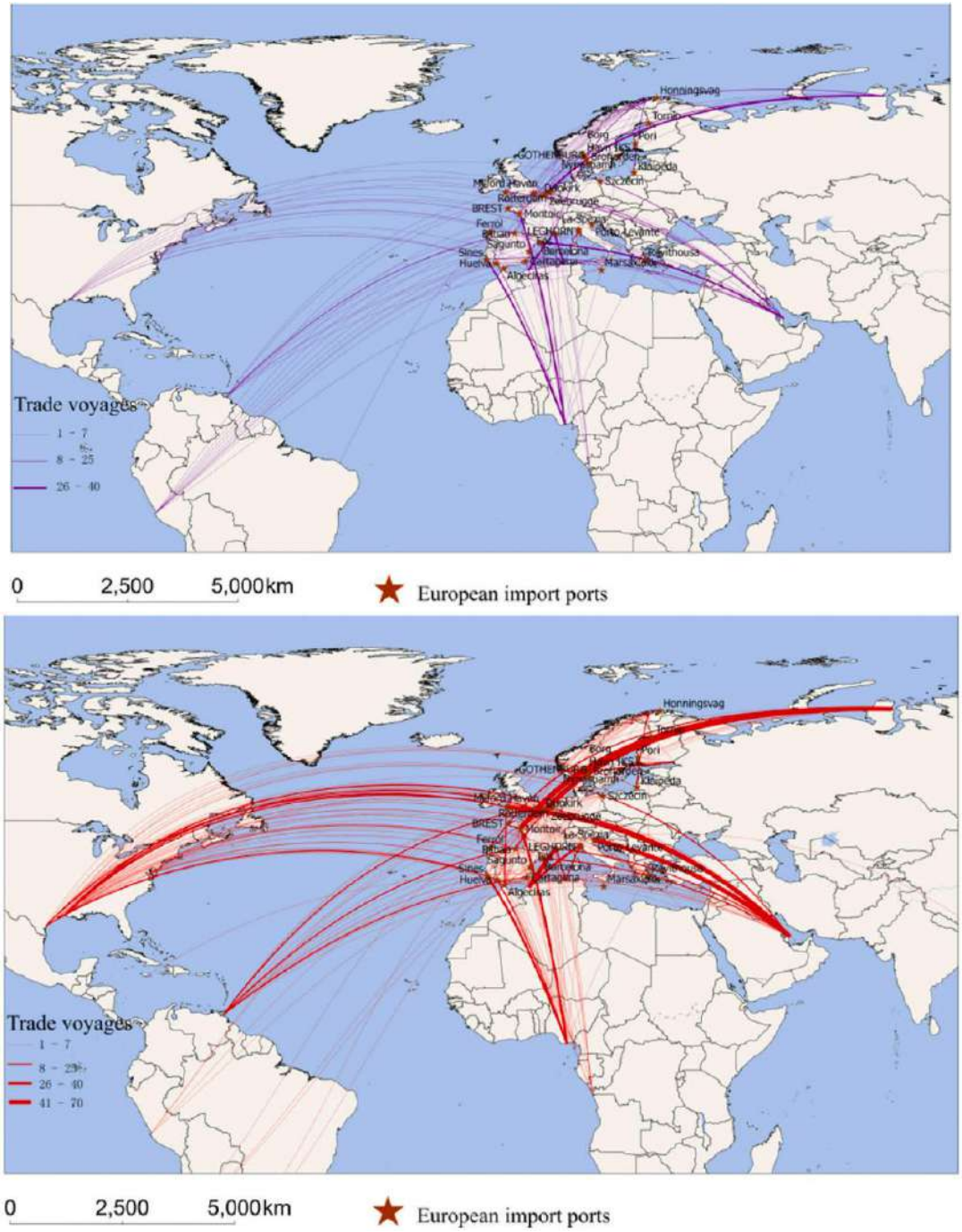
Η ανάδειξη του φυσικού αερίου ως μία από τις ανερχόμενες πηγές της παγκόσμιας ενέργειας ώθησε στην αξιοποίηση της ανάλυσης δικτύου για έναν ακόμη σκοπό: αυτόν της **πρόβλεψης μελλοντικών εμπορικών σχέσεων**. Οι Li et al. (2021), μετά την ανάλυση που περιγράφηκε λεπτομερώς παραπάνω, προχώρησαν στη χρήση αλγορίθμου πρόβλεψης δημιουργίας νέων συνδέσμων στο δίκτυο, με σκοπό να εντοπίσουν πιθανές συναλλαγές μεταξύ των χωρών της ζώνης Belt and Road. Παρομοίως, οι Filimonova et al. (2022) και οι Feng et al. (2017) κατασκεύασαν το δίκτυο του παγκόσμιου εμπορίου LNG, το οποίο αποτέλεσε τη βάση του αλγορίθμου πρόβλεψης που χρησιμοποίησαν.

Μία ακόμα προσέγγιση που έχει αξιοποιήσει την ανάλυση του εμπορικού δικτύου LNG αποτελεί αυτή που αποσκοπεί στη **διερεύνηση της σταθερότητάς** του. Οι Sun et al. (2022) χρησιμοποίησαν τέσσερα χαρακτηριστικά των δικτύων διακίνησης φυσικού αερίου και αργού πετρελαίου, μέσω των οποίων έπειτα εκτίμησαν την ανθεκτικότητά τους: την πυκνότητα, την κεντρικότητα, τη συνδεσιμότητα και το μέγεθος. Τους ίδιους τέσσερεις παράγοντες αξιοποίησαν και οι Xiao et al. (2024) με σκοπό να διερευνήσουν την επίδραση της Ρωσο-Ουκρανικής σύρραξης στο παγκόσμιο εμπόριο LNG. Μέσω του χάρτη του Σχήματος 2.6 που ακολουθεί, διαπίστωσαν ότι η εντονότερη πυκνότητα του δικτύου το 2022 παρατηρείται στις διαδρομές μεταξύ Αμερικής και Ευρώπης, μεταξύ Μέσης Ανατολής και Ευρώπης και μεταξύ των χωρών της ανατολικής Ασίας.



Σχήμα 2.6 Πυκνότητα δικτύου εμπορίου LNG το 2022 (Xiao et al. 2024)

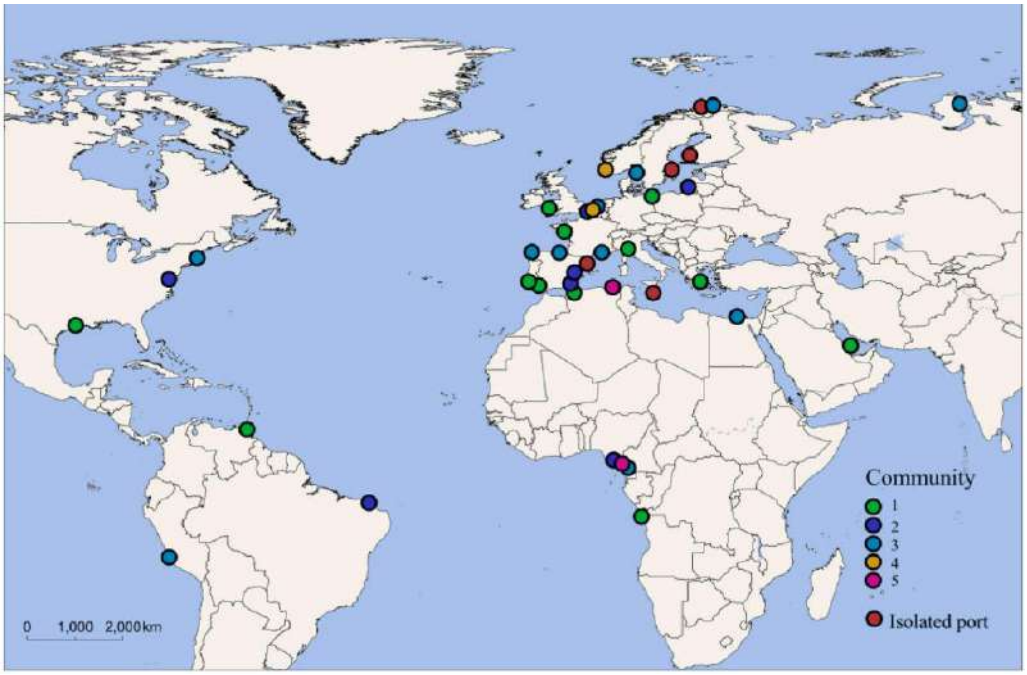
Διερευνώντας το **δίκτυο εισαγωγών LNG της Ευρώπης σε επίπεδο λιμένων**, οι Mei et al. (2024) κατασκεύασαν το αντίστοιχο δίκτυο για τα έτη 2018 και 2020 με τη χρήση δεδομένων AIS, το οποίο αναπαρίσταται στους χάρτες του Σχήματος 2.7.



Σχήμα 2.7 Δίκτυο εισαγωγών LNG της Ευρώπης το 2018 (άνω) και το 2020 (κάτω) (Mei et al. 2024)

Σύμφωνα με την έρευνα, τα ταξίδια αυξήθηκαν από 695 σε 1.337 και ο εμπορικός όγκος από 40.101.000 σε 87.129.740 τόνους από το 2018 έως το 2020. Την ίδια περίοδο, η πλειοψηφία των προμηθευτών της Ευρώπης βρίσκονταν στη δυτική όχθη της Αφρικής, ενώ οι λιμένες με τη μεγαλύτερη εξαγωγική διακίνηση ήταν οι Ras Laffan στην Ασία, Bonny στην Αφρική και Sebetta στη Ρωσία. Από την άλλη, βασικοί εισαγωγείς αποτελούσαν οι Ολλανδία, η Γαλλία και η Ισπανία με τους λιμένες Zeebrugge στο Βέλγιο, Milford Haven στο Ηνωμένο Βασίλειο και Montoir στη Γαλλία να σημειώνουν τη μεγαλύτερη ποσότητα εισαγωγών, έχοντας ως

βασικούς εισαγωγείς το Κατάρ, τη Νιγηρία και τη Ρωσία. Το δίκτυο επεκτάθηκε σημαντικά, αφού οι κόμβοι και οι σύνδεσμοί του αυξήθηκαν ραγδαία, από 39 σε 56 και από 142 σε 285, αντίστοιχα. Παρομοίως, σημαντική ήταν η αύξηση και του συντελεστή ομαδοποίησης, της μεταφορικότητας και της συνδεσιμότητας, που επελέγησαν για την εξέταση του δικτύου. Αντιθέτως, σημειώθηκε ελαφρά μείωση στην πυκνότητα, κάτι που εξηγείται από τη μεγάλη επέκτασή του. Εξίσου εντυπωσιακά, όμως, ήταν και τα αποτελέσματα του εντοπισμού εμπορικών κοινοτήτων. Ενώ το 2018 οι λιμένες του δικτύου μπορούσαν να διαχωριστούν σε πέντε διαφορετικές εμπορικές κοινότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, το 2020 προέκυψε μία ενιαία εμπορική κοινότητα. Αυτό οφείλεται στην διαμόρφωση ενιαίας ενεργειακής στρατηγικής από τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τη στενή συνεργασία τους σε ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας.

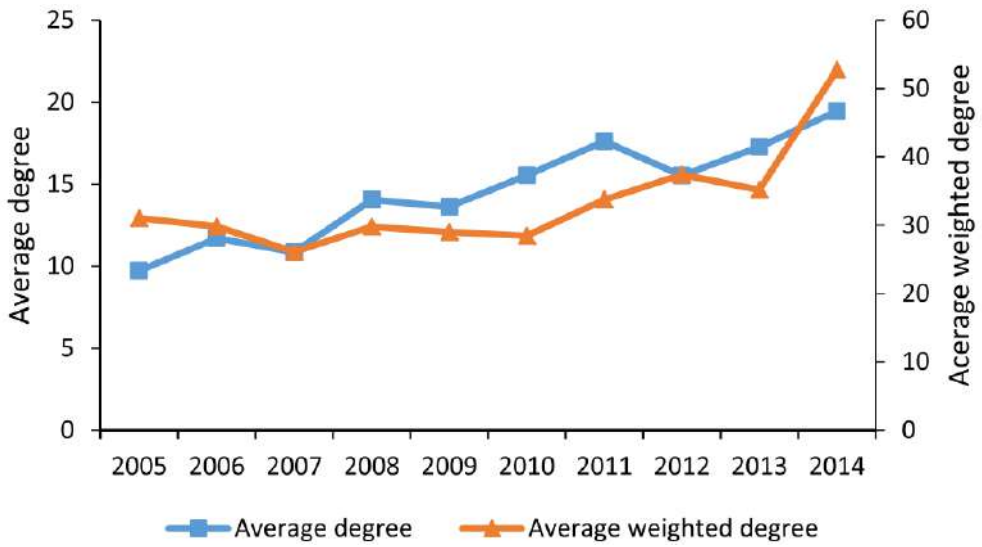


Σχήμα 2.8 Εμπορικές κοινότητες του δικτύου εισαγωγών LNG της Ευρώπης το 2018 (Mei et al. 2024)

Τα δίκτυα του παγκόσμιου εμπορίου LNG, όμως, έχουν αναλυθεί σημαντικά και για τη **διερεύνηση των ανταγωνιστικών σχέσεων** μεταξύ των χωρών. Πρώτοι οι Chen et al. (2016) άντλησαν δεδομένα από την αντίστοιχη βάση δεδομένων των Ηνωμένων Εθνών για την περίοδο 2005-2014 προκειμένου να αξιολογήσουν την ένταση του ανταγωνισμού μεταξύ των χωρών-εξαγωγέων LNG. Από την άλλη, οι Zhu et al. (2023) θεώρησαν ότι το κενό στη βιβλιογραφία σχετικά με τον ανταγωνισμό των εισαγωγέων LNG είναι σημαντικό, αν αναλογιστεί κανείς τη χρήση του φυσικού αερίου ως πηγή ενέργειας από όλο και περισσότερες χώρες σε αντίθεση με τον περιορισμένο αριθμό των εξαγωγέων. Για το λόγο αυτό ανέλυσαν το δίκτυο ανταγωνιστικών σχέσεων μεταξύ χωρών-εισαγωγέων LNG με περίοδο έρευνας τα έτη 2000-2020. Σε αντίθεση με τις μελέτες που αναφέρθηκαν παραπάνω και αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό της χωρικής δομής του

εμπορικού δικτύου, σε αυτή την περίπτωση στο δίκτυο που κατασκευάζεται ως κόμβοι χρησιμοποιούνται οι ανταγωνίστριες χώρες, ενώ οι σύνδεσμοι αντιπροσωπεύουν τις μεταξύ τους ανταγωνιστικές σχέσεις. Οι σύνδεσμοι σταθμίζονται με τον δείκτη έντασης του ανταγωνισμού που πρότειναν οι Glick & Rose (1999) και ορίζονται μερικοί βασικοί δείκτες της Θεωρία Δικτύου για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του δικτύου:

- **Σταθμισμένος και μη βαθμός συνδεσιμότητας:** Ο βαθμός συνδεσιμότητας υποδεικνύει το πλήθος των ανταγωνιστικών σχέσεων στις οποίες συμμετέχει ο κόμβους, ενώ με τη στάθμιση εξάγεται η συνολική του ανταγωνιστικότητα. Και στις δύο έρευνες διαπιστώνεται αύξηση των δύο δεικτών, κάτι που δείχνει ότι όχι απλά αυξάνονται οι ανταγωνιστικές σχέσεις παγκοσμίως, αλλά αυξάνεται επίσης και η ένταση του ανταγωνισμού, ενώ οι εμφανείς διακυμάνσεις αποδεικνύουν ότι το παγκόσμιο δίκτυο βρίσκεται ακόμα υπό διαμόρφωση. Ενδεικτικά, παρακάτω στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των δεικτών αναφορικά με το δίκτυο εξαγωγών, όπου ο μέσος βαθμός του δικτύου και ο μέσος σταθμισμένος βαθμός του δικτύου αυξήθηκαν κατά την περίοδο 2005-2014 κατά 8,00% και 6,06% αντίστοιχα.



Σχήμα 2.9 Μέσος βαθμός του δικτύου (μπλε γραμμή) και μέσος σταθμισμένος βαθμός του δικτύου (πορτοκαλί γραμμή) εξαγωγών περιόδου 2005-2014 (Chen et al. 2016)

- **Συντελεστής ομαδοποίησης και μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής:** Οι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός παγκοσμιοποίησης του ανταγωνισμού. Τόσο σχετικά με τις εισαγωγές, όσο και με τις εξαγωγές, η μείωση των δεικτών αποδεικνύει την ολοένα και στενότερη ανταγωνιστική σχέση μεταξύ των χωρών, ενώ η διακύμανση του δείκτη ομαδοποίησης πιθανώς οφείλεται στην εξάρτηση και αλληλεπίδραση του εμπορίου LNG με ανταγωνίστριες βιομηχανίες, όπως αυτή του πετρελαίου

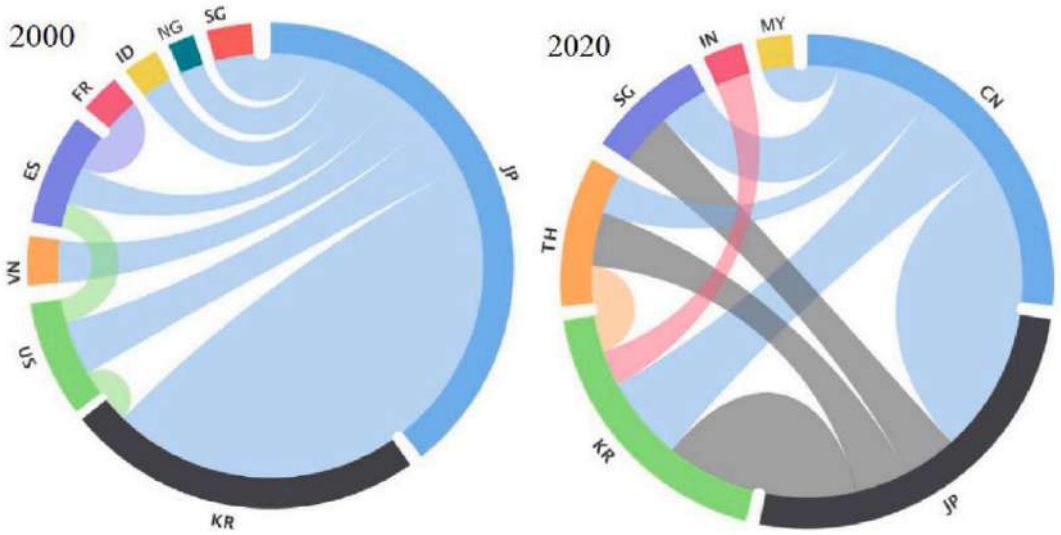
- **Τμηματικότητα:** Οι Chen et al. (2016) αξιοποίησαν τη τμηματικότητα (modularity) για να διερευνήσουν την ομαδοποίηση των εξαγωγών LNG. Η σταθερή μείωση της τιμής του δείκτη δείχνει τη σταθερή και αδιάκοπη τάση της μετατροπής του ανταγωνισμού από περιφερειακό σε παγκόσμιο.

Συνεχίζοντας, οι Chen et al. (2016) διαπίστωσαν ότι η **ένταση της ανταγωνιστικότητας των εξαγωγών** παραμένει συγκεντρωμένη σε ορισμένες χώρες, αφού από τη κατανομή της προκύπτει ότι το 70%-80% της ανταγωνιστικής έντασης προέρχεται μόλις από το 20% των σχέσεων. Το Κατάρ βρίσκεται διαχρονικά στην πρώτη θέση, ως ο πιο ανταγωνιστικός εξαγωγέας LNG, σταθερά στην πρώτη δεκάδα παραμένουν η Μαλαισία, η Αυστραλία και η Ινδονησία, ενώ αν σε αυτές προστεθούν η Αλγερία και η Νιγηρία διαμορφώνεται μία ομάδα χωρών η οποία εκπροσωπείται σε κάθε μία από τις δέκα πιο ανταγωνιστικές σχέσεις διαχρονικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εμφάνιση του Βελγίου και της Ισπανίας στη σχετική λίστα, παρότι δε διαθέτουν παραγωγή LNG, οφείλεται στα μακροπρόθεσμα συμβόλαια μεγάλων όγκων που σύναψαν τα προηγούμενα χρόνια οι χώρες αυτές, που σε συνδυασμό με την ύφεση της οικονομίας τους δημιούργησαν σημαντικά πλεονάσματα φυσικού αερίου και τις ώθησαν στην εξαγωγή σημαντικών ποσοτήτων.

Οι ανταγωνίστριες χώρες διακρίθηκαν επίσης σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την τάση, που αναπαριστούν τις διαφορετικές προοπτικές ανάπτυξης της ανταγωνιστικότητας τους στο εμπόριο LNG. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν ομάδες με σαφή τάση αύξησης της ανταγωνιστικότητάς τους, όπως η Μοζαμβίκη η οποία ανακάλυψε σημαντικά αποθέματα φυσικού αερίου στην επικράτειά της ή η Νορβηγία που συνδυάζει τους ορυκτούς πόρους με την έντονη ναυτική εμπορική δραστηριότητα. Στη δεύτερη ομάδα κατατάσσονται χώρες με ήδη υψηλή δραστηριότητα που όμως αναμένεται να διατηρήσουν σχετικά σταθερό το επίπεδο ανταγωνιστικότητας τους τα επόμενα χρόνια, όπως ενδεικτικά το Κατάρ, η Μαλαισία, η Αυστραλία και η Ινδονησία. Τέλος, στην τρίτη ομάδα παρατηρούνται χώρες όπως αυτές του OPEC (Οργανισμός Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών), οι οποίες θα κληθούν να μειώσουν την εξαγόμενη ποσότητα ορυκτών καυσίμων τα επόμενα χρόνια προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες της διαρκώς αυξανόμενης εγχώριας οικονομίας τους, ή όπως το Ιράν και η Λιβύη, των οποίων η ανταγωνιστικότητα αναμένεται μειούμενη υπό το βάρος των διεθνών κυρώσεων.

Αντίστοιχα, σχετικά με τον ανταγωνισμό των χωρών-εισαγωγέων σε εθνικό επίπεδο, οι Zhu et al. (2023) συμπέραναν ότι για πολλά χρόνια, σημαντικό μέρος των πιο έντονων ανταγωνιστικών σχέσεων αφορούσαν τον ανταγωνισμό μεταξύ Ιαπωνίας και άλλων χωρών της Ασίας και της Ευρώπης. Η Κίνα, που το 2010 κατέστη ο μεγαλύτερος εισαγωγέας LNG παγκοσμίως, αντικατέστησε το 2020 την Ν. Κορέα στην πιο ανταγωνιστική σχέση με την Ιαπωνία. Η ανάγκη για υιοθέτηση πιο βιώσιμων πολιτικών εκ μέρους της Κίνας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία αυξανόμενη οικονομική της δραστηριότητα και γενικότερα την έντονη αναπτυξιακή

πορεία των χωρών της νοτιοανατολικής Ασίας αναμένεται να μετακινήσουν το επίκεντρο του παγκόσμιου ανταγωνισμού προς την περιοχή. Αυτό ενισχύεται σε μεγάλο βαθμό από την υποχώρηση των ΗΠΑ στις εισαγωγές φυσικού αερίου, που μείωσαν τη θέση της στον παγκόσμιο ανταγωνισμό από τέταρτη το 2000 σε ένατη το 2010. Παράλληλα, παρόμοια πορεία ακολουθούν και οι Ευρωπαϊκές χώρες, όπως ενδεικτικά η Γαλλία η οποία έως το 2005 βρισκόταν στην πέμπτη θέση όσον αφορά την ανταγωνιστικότητά της που όμως, έκτοτε, μειώθηκε δραστικά. Κλείνοντας, ως βασικό συμπέρασμα εξάγεται η μεταβολή του παγκόσμιου τοπίου του ανταγωνισμού μεταξύ των εισαγωγέων LNG, από διηπειρωτικό μεταξύ Ασίας, Ευρώπης και Αμερικής σε περιφερειακό μεταξύ χωρών της νοτιοανατολικής Ασίας, όπως γίνεται ευκολότερα προφανές με τη βοήθεια του Σχήματος 2.10.



Σχήμα 2.10 Ένταση διεθνών ανταγωνιστικών σχέσεων το 2000 (αριστερά) και το 2020 (δεξιά) (Zhu et al. 2023)

2.2.2. Ασφάλεια εφοδιασμού LNG

Η ολοένα και αυξανόμενη χρήση του **Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG)** σε συνδυασμό με τα ευρύτερα παγκόσμια ζητήματα ασφαλείας που εγείρονται καθιστούν τη διερεύνηση της ασφάλειας του εφοδιασμού όλο και πιο επίκαιρη. Σύμφωνα με τους Shaikh et al. (2016), **ενδεχόμενες διαταραχές** της εφοδιαστικής αλυσίδας ενέργειας μπορεί να οφείλονται:

- Στην αύξηση της ζήτησης
- Στην αστάθεια των τιμών
- Στην πολιτική αστάθεια σημαντικών χωρών-εξαγωγέων
- Στις μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω της παγκοσμιοποίησης του εμπορίου
- Στον αυξανόμενο αριθμό πειρατείας σε κομβικά στενά του δικτύου
- Στις συγκρούσεις μεταξύ κρατών σε θέσεις κατά μήκος εμπορικών διαδρόμων.

Η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού μπορεί να εξετασθεί τόσο από τη σκοπιά της δυνατότητας των προμηθευτών να ανταπεξέλθουν στην ενεργειακή ζήτηση, όσο και από αυτήν της ικανότητας της μεταφορικής υποδομής να επιτελέσει το σκοπό της.

Για την πρώτη οπτική έχει διεξαχθεί σημαντική έρευνα: έχει διερευνηθεί η διαφοροποίηση εισαγωγών προκειμένου να αξιολογηθεί η εφοδιαστική τους ασφάλεια (Vivoda. 2014), έχει κατασκευαστεί και εφαρμοστεί πληθώρα δεικτών που την αντικατοπτρίζουν, λαμβάνοντας υπ΄όψιν παράγοντες όπως η παραγωγική ικανότητα, ο γεωπολιτικός κίνδυνος και η εξάρτηση (Gong et al. 2020, Biresselioglou et al. 2015), και έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί μέθοδοι βελτιστοποίησης του χαρτοφυλακίου εισαγωγών (Geng et al. 2017, Kong et al. 2019).

Όσο για την οπτική της ασφάλειας του εφοδιασμού που εστιάζει στη μεταφορική υποδομή, αυτή μπορεί να εξεταστεί με βάση δύο τρόπους (Bietal. 2023): προσεγγίζοντάς την ως σύστημα (system-based) ή ως δίκτυο (network-based). Μερικές βασικές συστημικές προσεγγίσεις αποτελούν αυτές οι οποίες εστιάζουν στους συμβαλλόμενους (agent-based), αυτές οι οποίες εστιάζουν στη διαχείριση αποφάσεων (MCDA-based) και η μοντελοποίηση δικτύων Bayes (Bayesian network modelling) (Bi et al. 2023). Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η εκτίμηση των επιπτώσεων πιθανής διατάραξης κρίσιμων γεωγραφικά σημείων του δικτύου, όπως η διώρυγα του Σουέζ, η διώρυγα του Παναμά και άλλες, η οποία πραγματοποιήθηκε από τους Meza et al. (2022) με τη χρήση Agent-Based Model (ABM).

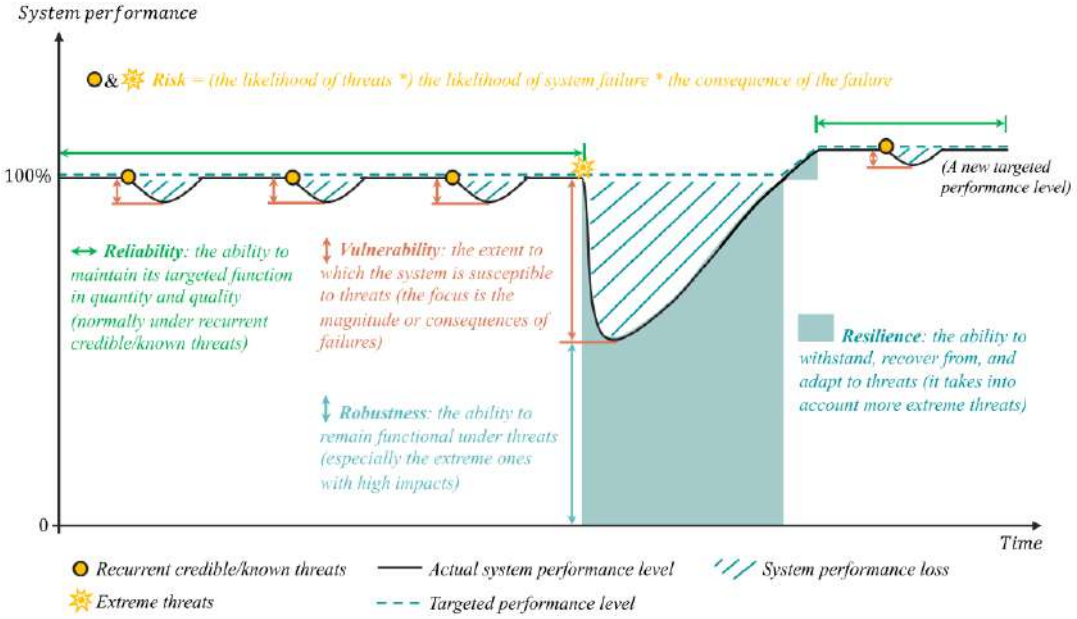
Στα πλαίσια της παρούσας ανασκόπησης θα δοθεί έμφαση στη διερεύνηση της εφοδιαστικής ασφάλειας μέσω της **δικτυακής θεώρησης του συστήματος** μεταφοράς LNG. Σύμφωνα με τους Bi et al. (2023), η διερεύνηση μπορεί να γίνει πηγάζοντας από τριών ειδών ανάγκες:

- **Μαθηματική βελτιστοποίηση** όπου το δίκτυο σχεδιάζεται με στόχο να αυξηθεί η ανθεκτικότητά του, χρησιμοποιώντας ως αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση δεικτών (Faturechi & Miller-Hooks, 2014) ή την ελαχιστοποίηση κόστους ή χρόνου μεταφοράς (Bhavathrathan & Patil 2015).
- **Χρήση παρελθοντικών δεδομένων** με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση συγκεκριμένων γεγονότων σε δείκτες που αντιπροσωπεύουν την ανθεκτικότητα του δικτύου. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των Li et al. (2024) που εξέτασαν την επίδραση της πανδημίας του COVID-19 στο παγκόσμιο ναυτιλιακό εμπόριο, αλλά και αυτή των Xiao et al. (2024), οι οποίοι εξέτασαν τη μεταβολή της δομής και της ανθεκτικότητας λόγω της Ρωσο-Ουκρανικής σύρραξης.

- **Προσομοίωση μοντέλου δικτύου** προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ανθεκτικότητα του δικτύου έναντι αναταράξεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αφού το δίκτυο έχει κατασκευαστεί, προσομοιώνονται ενδεχόμενες διαταραχές του μέσω απωλειών κόμβων ή συνδέσμων και υπολογίζεται το μέτρο των δεικτών που έχουν επιλεγεί. Οι αστοχίες των κόμβων μπορεί να προέρχονται είτε από τυχαίες διαταραχές, είτε από στοχευμένες επιθέσεις, ενώ ο αντίκτυπος στους επιλεγμένους δείκτες μπορεί να παρουσιάζεται για μεμονωμένες αστοχίες ή σωρευτικά (Liu et al. 2023). Ο συνηθέστερος τρόπος εκδήλωσης των στοχευμένων επιθέσεων αποτυπώνεται με την αφαίρεση κόμβων με φθίνουσα σειρά της σημασίας τους, η οποία μπορεί να εκτιμάται από το βαθμό συνδεσιμότητας τους (Sun et al. 2022, Mei et al. 2024), από το σταθμισμένο βαθμό συνδεσιμότητας τους (Xiao et al. 2024, Mou et al. 2020) ή ακόμα και από δείκτη που κατασκευάζεται για τον σκοπό αυτό (Ding et al. 2020).

Όπως είναι προφανές από τα παραπάνω, η επιλογή των δεικτών που θα εξεταστούν παίζει καθοριστικό ρόλο στην οπτική της ανάλυσης και τα αποτελέσματά της και συνεπώς εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα και τον σκοπό της έρευνας. Για την καλύτερη κατανόηση της παρουσιαζόμενης βιβλιογραφίας κρίνεται χρήσιμη η **διασαφήνιση ορισμένων εννοιών**, με τη βοήθεια και τους Σχήματος 2.11, που σχετίζονται με την απόδοση του δικτύου όταν αυτό διαταράσσεται (Bi et al. 2023):

- Ως **αξιοπιστία** (reliability) ορίζεται η ικανότητα του δικτύου να διατηρεί χαμηλή τη συχνότητα κατά την οποία δεν πληρούνται τα ποιοτικά και ποσοτικά του κριτήρια.
- **Στιβαρότητα** (robustness) του δικτύου είναι η ικανότητα του να παραμένει λειτουργικό υπό τις εξωτερικές απειλές που υφίσταται.
- **Τρωτότητα** (vulnerability) θεωρείται ο βαθμός κατά τον οποίο είναι ευάλωτο σε εξωτερικές απειλές.
- Η έννοια της **ανθεκτικότητας** (resilience) αφορά την ικανότητα του δικτύου να αντιστέκεται σε εξωτερικές απειλές, να ανακάμπτει από αυτές και να προσαρμόζεται στις μεταβολές που επιφέρουν.

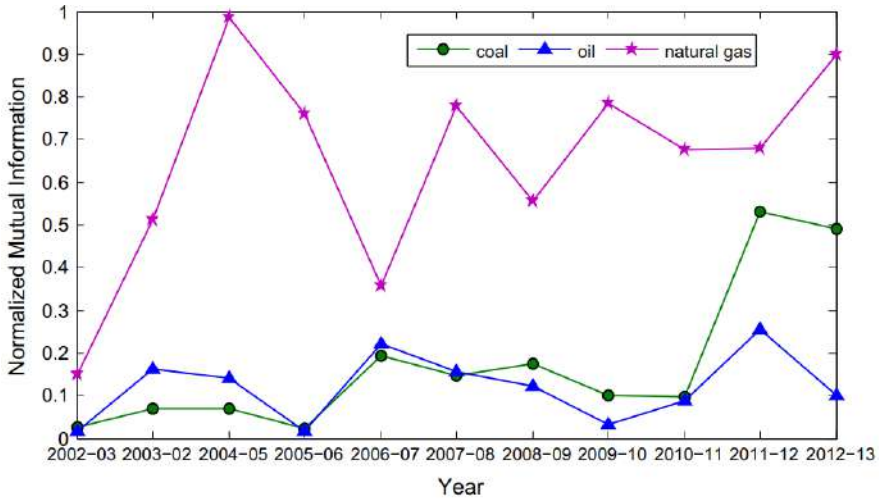


Σχήμα 2.11 Σχηματική παράθεση των εννοιών της αξιοπιστίας, της στιβαρότητας, της τρωτότητας και της ανθεκτικότητας του δικτύου (Bi et al. 2023)

Λόγω του ότι η διάκριση δεν είναι πάντοτε σαφής στη βιβλιογραφία μεταξύ των εννοιών αυτών, σε πολλές από τις έρευνες (Xiao et al. 2024, Sun et al. 2022) η ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας, της στιβαρότητας και της τρωτότητας θεωρείται μέρος της εκτίμησης της γενικότερης ανθεκτικότητας του συστήματος. Με βάση αυτό, οι Bi et al. (2023) **διέκριναν τους δείκτες** που χρησιμοποιήθηκαν στις σχετικές μελέτες σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Δείκτες που εστιάζουν στην **απόδοση** του συστήματος κατά την αστοχία. Για παράδειγμα, οι Liu et al. (2023) μελετώντας την ανθεκτικότητα του ευρωπαϊκού δικτύου λιμένων χρησιμοποίησαν τον αριθμό των διακινούμενων TEUs που θα μπορούσαν να παραδοθούν στον προορισμό τους καθώς οι κόμβοι του δικτύου αστοχούσαν. Μία παρόμοια προσέγγιση ακολουθήθηκε και από τους Dong et al. (2023), οι οποίοι χρησιμοποίησαν το επιπλέον κόστους που θα προκαλούταν σε κάθε κινεζική πόλη του δικτύου εφοδιασμού LNG, αυτό αστοχούσε.
- Δείκτες με έμφαση στα **χαρακτηριστικά** του συστήματος κατά την αστοχία. Τέτοιοι δείκτες μπορούν να εμπλέκουν λειτουργικά, επιχειρησιακά ή τοπολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος, ενώ συχνά η ανθεκτικότητα επιχειρείται να εκτιμηθεί με τη βοήθεια παρεμφερών εννοιών. Οι Shaikh et al. (2016), επιχείρησαν να αποτυπώσουν την ασφάλεια του εφοδιασμού LNG των χωρών της ανατολικής Ασίας με τη χρήση δύο δεικτών: του δείκτη σταθερότητας του συστήματος και το δείκτη αξιοπιστίας των προμηθευτών. Παρομοίως, οι Gao et al. (2015) χρησιμοποίησαν επίσης τον δείκτη σταθερότητας NMI του δικτύου προκειμένου να ερευνήσουν και να συγκρίνουν τη σταθερότητα του δικτύου εφοδιασμού φυσικού αερίου, αργού πετρελαίου και άνθρακα. Από τη διαχρονική εξέλιξη του δείκτη αυτού, η οποία παρατίθεται στο Σχήμα 2.12 παρακάτω, αποδεικνύεται ότι το δίκτυο

εμπορίου φυσικού αερίου παραμένει διαχρονικά σταθερότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο ορυκτά καύσιμα.



Σχήμα 2.12 Σταθερότητα (NMI) δικτύου φυσικού αερίου (μωβ γραμμή), πετρελαίου (μπλε γραμμή), και άνθρακα (πράσινη γραμμή), διαχρονικά (Gao e al. 2015)

- Δείκτες εστιασμένοι στη **χωρική δομή** του δικτύου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου που χρησιμοποιούνται είναι οι βαθμοί συνδεσιμότητας των κόμβων, το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής, ο συντελεστής ομαδοποίησης και άλλα στοιχεία δικτύων (Wan et al. 2023). Σε τέτοιες περιπτώσεις η διαδικασία της προσομοίωσης οδηγεί σε αποτελέσματα που παρουσιάζουν είτε τη γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τοπολογικών χαρακτηριστικών του δικτύου, είτε η ποσοστιαία μεταβολή τους ορίζεται ως ξεχωριστός δείκτης. Στην πρώτη περίπτωση εμπίπτει η έρευνα των Liu et al. (2023), όπου παρουσιάζεται η μείωση του μεγέθους του μεγαλύτερου συνδεόμενου υποδικτύου (LCC). Επιπρόσθετα, οι Wan et al. (2023) χρησιμοποίησαν μία πληθώρα χαρακτηριστικών, που περιλαμβάνουν τον βαθμό συνδεσιμότητας των κόμβων, το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής, το συντελεστή ομαδοποίησης και διάφορες μορφές κεντρικότητας, για να εξετάσουν τη μεταβολή τους στο παγκόσμιο δίκτυο ναυτιλίας κατά την αστοχία μεμονωμένων κόμβων ή κατά το κλείσιμο της διώρυγας του Σουέζ. Από την άλλη, οι Mei et al. (2024) όρισαν ως δείκτες τους ρυθμούς μεταβολής της πυκνότητας, της μεταβατικότητας, του συντελεστή ομαδοποίησης και της μέσης συνδεσιμότητας του δικτύου κατά την προσομοιωμένη αφαίρεση κόμβων από το δίκτυο εφοδιασμού LNG της Ευρώπης. Τους ίδιους δείκτες είχαν χρησιμοποιήσει και οι Guo et al. (2022) με σκοπό να αναλύσουν την αύξηση της ανθεκτικότητας των ναυτιλιακών μεταφορών σε περίπτωση νέων θαλασσίων διαδρόμων μέσω Αρκτικής.

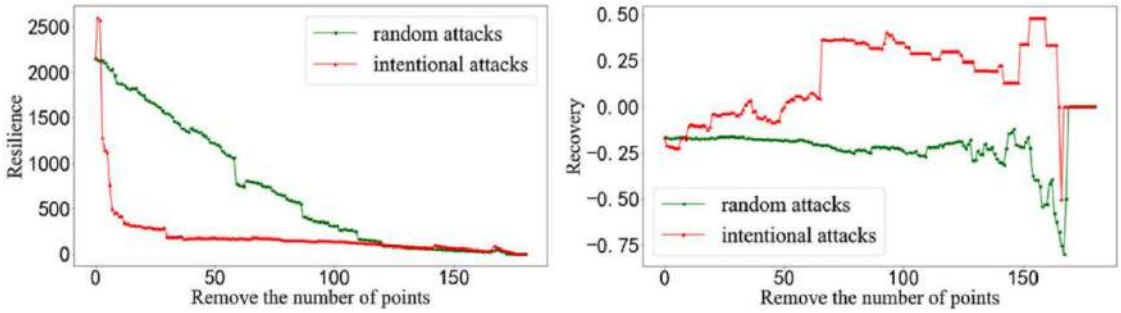
Τέλος, αξιοσημείωτο είναι ότι συνηθίζεται ο συνδυασμός διαφορετικών ειδών δεικτών (Xiao et al. 2024, Mou et al. 2020) ώστε να διαμορφώνεται πιο

ολοκληρωμένη εικόνα της ανθεκτικότητας του δικτύου, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους Ding et al. (2020), οι οποίοι για να ποσοτικοποιήσουν την ανθεκτικότητα του συστήματος εισαγωγών LNG της Κίνας χρησιμοποίησαν τον τοπολογικό δείκτη LCC, τον δείκτη χαρακτηριστικών που αφορά το ποσοστό κόμβων που παραμένουν συνδεδεμένοι μετά την απώλεια συνδέσμων και τον δείκτη απόδοσης που αφορά τη διαθεσιμότητα της προμήθειας.

Στο πλαίσιο αυτό, οι Mou et al. 2020 εδραίωσαν μία **τριάδα δεικτών** για τη διερεύνηση της ασφάλειας εφοδιασμού LNG, η οποία αποτελείται από:

- Την **ανακαμψιμότητα** του δικτύου
- Την **ατρωτότητα**, η οποία εκφράζεται από το συντελεστή Gini
- Την **ανθεκτικότητα**, για τον υπολογισμό της οποίας χρησιμοποιούνται τέσσερα τοπολογικά χαρακτηριστικά του δικτύου: η πυκνότητα του δικτύου, η κεντρικότητα, η συνδεσιμότητα και το μέγεθος.

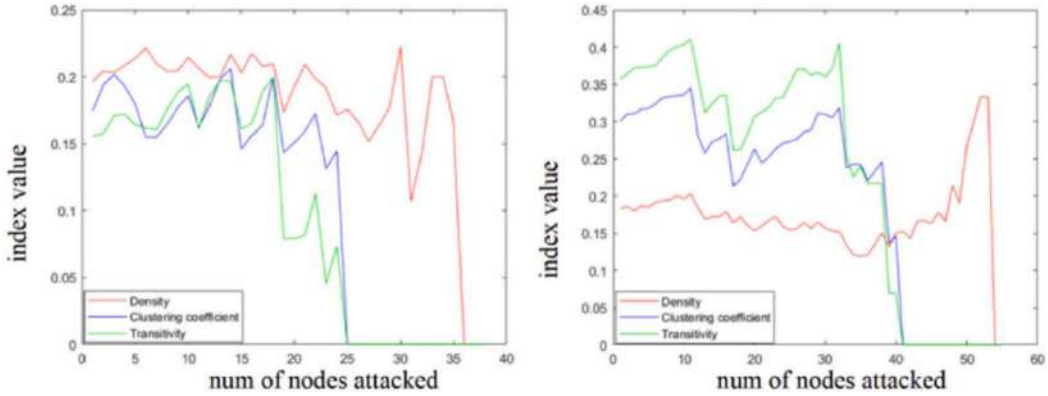
Με τη χρήση των δεικτών αυτών, οι Sun et al. (2022) διαπίστωσαν τη μείωση της ανθεκτικότητας του δικτύου κατά την περίοδο 2010-2020, την οποία απέδωσαν στη μείωση της παραγωγής που επέφερε η πανδημία του COVID-19. Παράλληλα, τονίστηκε η αύξηση της διασπορά του δικτύου κατά την ίδια περίοδο, ενώ οι ερευνητές δεν ήταν αισιόδοξοι για τη δυνατότητα ανάκαμψης του δικτύου σε περίπτωση έντονης διατάραξής του. Ακόμη, οι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να ερευνηθεί η μεταβολή τους υπό προσομοιούμενες αστοχίες κόμβων, κατά τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ του εμπορίου φυσικού αερίου και πετρελαίου απέδειξε την ανθεκτικότητα του δικτύου φυσικού αερίου, η οποία υπολογίστηκε μικρότερη από αυτή του δικτύου πετρελαίου, επιβεβαιώνοντας έτσι τα συμπεράσματα των Gao e al. (2015) που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 2.15. Οι δείκτες αυτοί αξιοποιήθηκαν και για την προσομοίωση των Xiao et al. (2024), όπου παρουσιάστηκε η επίδραση τόσο τυχαίων αστοχιών, όσο και στοχευμένων επιθέσεων. Εκτός των τριών δεικτών, προστέθηκαν και τοπολογικά χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως η αποτελεσματικότητα και ο συντελεστής ομαδοποίησης. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζονται ενδεικτικά η μεταβολή της ανθεκτικότητας και της ανακαμψιμότητας του δικτύου κατά την σωρευτική αστοχία πολλαπλών κόμβων.



Σχήμα 2.13 Μεταβολή ανθεκτικότητας (αριστερά) και ανακαμψιμότητας (δεξιά) κατά την προσομοίωση τυχαίων (πράσινη γραμμή) και στοχευμένων (κόκκινη γραμμή) αστοχιών (Xiao et al. 2024)

Είναι εμφανές ότι μόνο η αστοχία συγκεκριμένων κρίσιμων κόμβων, όπως των στενών του Ορμούζ ή της Μαλάκα, μπορεί να μειώσει την ανθεκτικότητα του δικτύου κατά 42%. Αντίθετα, οι διακυμάνσεις που παρουσιάζει η ανακαμψιμότητα δείχνουν ότι, λόγω της δομής του δικτύου που απαρτίζεται από έναν πυρήνα εξαγωγέων που τροφοδοτεί περιφερειακούς εισαγωγείς, αυτό μένει ανεπηρέαστο ως ένα βαθμό. Σε γενικές γραμμές, είναι προφανές ότι η αστοχία ενός μικρού αριθμού κρίσιμων κόμβων μπορεί να επιφέρει σημαντικό πλήγμα στο δίκτυο και επομένως η περιφρούρηση τους καθίσταται προτεραιότητα. Ακόμα, τονίζεται ότι οι στοχευμένες επιθέσεις επιτυγχάνουν πολύ σημαντικότερες απώλειες σε σχέση με τυχαίες αστοχίες, όπως προκύπτει από την κατά πολύ ταχύτερη επιδείνωση των δεικτών.

Στο ίδιο συμπέρασμα, σχετικά με τη διαφορά τυχαίων και στοχευμένων αστοχιών κατέληξαν και οι Mei et al. (2024), οι οποίοι όρισαν ως τοπολογικούς δείκτες την ποσοστιαία μεταβολή τεσσάρων τοπολογικών χαρακτηριστικών του δικτύου: της πυκνότητας, της μεταβατικότητας, του συντελεστή ομαδοποίησης και της μέσης συνδεσιμότητας. Στην περίπτωση του δικτύου Ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG του 2018, παρατηρήθηκε ότι όλοι οι εναπομείναντες κόμβοι έμειναν απομονωμένοι με την τυχαία αστοχία του 92,9% των κόμβων, ενώ το ίδιο αποτέλεσμα προκλήθηκε με μόλις το 71,4% των στοχευμένων επιθέσεων. Τέλος, όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 2.14, διαπιστώθηκε ότι η ανθεκτικότητα του δικτύου του 2020 έχει αυξηθεί σε σχέση με αυτή του 2018, κάτι που αποδεικνύεται από την διατήρηση των χαρακτηριστικών του για μεγαλύτερες απώλειες κόμβων.



Σχήμα 2.14 Μεταβολή χαρακτηριστικών δικτύου εισαγωγών LNG στην Ευρώπη για το 2018 (αριστερά) και το 2020 (δεξιά) κατά την προσομοίωση αστοχιών (Mei et al. 2024)

2.3. Συμπεράσματα βιβλιογραφίας

Από την έρευνα που παρουσιάστηκε παραπάνω γίνεται εύκολα σαφές ότι η ανάλυση δικτύων αποτελεί συχνό εργαλείο για τη διερεύνηση εμπορικών δικτύων με πολλές εφαρμογές σε αυτά. Μία από τις κυριότερες είναι αυτή του

προσδιορισμού της χωρικής δομής και χρονικής εξέλιξης τους. Για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται δείκτες της Θεωρίας Σύνθετων Δικτύων, όπως ο σταθμισμένος ή μη βαθμός συνδεσιμότητας, το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής, ο συντελεστής ομαδοποίησης, η πυκνότητα, η κεντρικότητα και άλλοι, ενώ η τμηματικότητα φαίνεται να είναι ένα κοινά αποδεκτό μέσο για το διαχωρισμό των κοινοτήτων.

Με τη χρήση αυτών των εργαλείων διαπιστώνεται ότι το διεθνές εμπόριο, αλλά και η ευρωπαϊκή αγορά συγκεκριμένα, απομακρύνεται ολοένα και περισσότερο από την παλαιά αποκεντρωμένη μορφή του, και ενοποιείται. Το γεωγραφικά περιορισμένο, έως και μονοπωλιακό, προνόμιο παραγωγής φυσικού αερίου, σε αντίθεση με την ευρεία και διεσπαρμένη ζήτηση για κατανάλωση του, καθιστά τις σχέσεις μεταξύ των εισαγωγέων ολοένα και πιο ανταγωνιστικές. Αντίθετα, η στενή συνεργασία και η διαμόρφωση ενιαίας ενεργειακής πολιτικής των κρατών της Ευρώπης έχει συσφίξει τις εμπορικές σχέσεις τους, μετατρέποντάς τις από αμιγώς ανταγωνιστικές σε συνεργατικές.

Η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων στην περίπτωση του θαλάσσιου εμπορίου LNG υλοποιείται κυρίως σε επίπεδο χωρών (country-to-country) με τη βοήθεια δεδομένων από την αντίστοιχη βάση του OHE ή τις ετήσιες αναφορές της BP. Οι λιγοστές περιπτώσεις διερεύνησης σε επίπεδο λιμένα (port-to-port) έρχονται σε πέρας αποκλειστικά με τη χρήση δεδομένων τύπου AIS, και επομένως μία μελέτη σε αυτό το επίπεδο, η οποία παράλληλα θα αξιοποιεί μία εναλλακτική πηγή δεδομένων **μοιάζει να λείπει από τη διεθνή βιβλιογραφία**.

Παράλληλα, από τις μελέτες που παρατέθηκαν προκύπτει ότι το κέντρο βάρους της παγκόσμιας αγοράς LNG είναι αναμφισβήτητα στην περιοχή της ανατολικής Ασίας. Συνεπώς, όπως είναι λογικό, η σημαντική πλειοψηφία της σχετικής έρευνας έχει επικεντρωθεί στην περιοχή αυτή. Η Ευρώπη, όμως, παρά τη φθίνουσα οικονομία της, παραμένει η δεύτερη σημαντικότερη εισαγωγέας παγκοσμίως. Μάλιστα, οι τελευταίες γεωπολιτικές εξελίξεις και οι αναταράξεις στο ευρύτερο ενεργειακό τοπίο δεν αποκλείεται να ανατρέψουν την στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να επαναφέρουν δυναμικά την εν λόγω ήπειρο στο προσκήνιο της ζήτησης. Για το λόγο αυτό, **η διερεύνηση της ευρωπαϊκής αγοράς κρίνεται επίκαιρη όσο ποτέ.**

Λόγω του ίδιου αυτού ασταθούς πλαισίου, όμως, **μοιάζει απαραίτητη**, όχι απλά η ανάλυση του εμπορίου, αλλά και του βαθμού στον οποίο η συνέχισή του είναι εξασφαλισμένη. **Η διεθνής βιβλιογραφία δεν φαίνεται να καλύπτει** ολιστικά το φλέγον ζήτημα της ασφάλειας εφοδιασμού, ενώ οι περιορισμένες μελέτες που το επιχειρούν αφοσιώνονται κυρίως στην ασιατική αγορά. Μία ευρέως διαδεδομένη προσέγγιση για τη διερεύνηση τέτοιων ζητημάτων είναι η δικτυακή (network-based approach). Η ανθεκτικότητα του δικτύου διαπιστώνεται με την παρατήρηση δεικτών κατά την προσομοίωση αστοχιών των κόμβων του δικτύου.

Μεθοδολογική προσέγγιση

3.1. Περιγραφή διαδικασίας

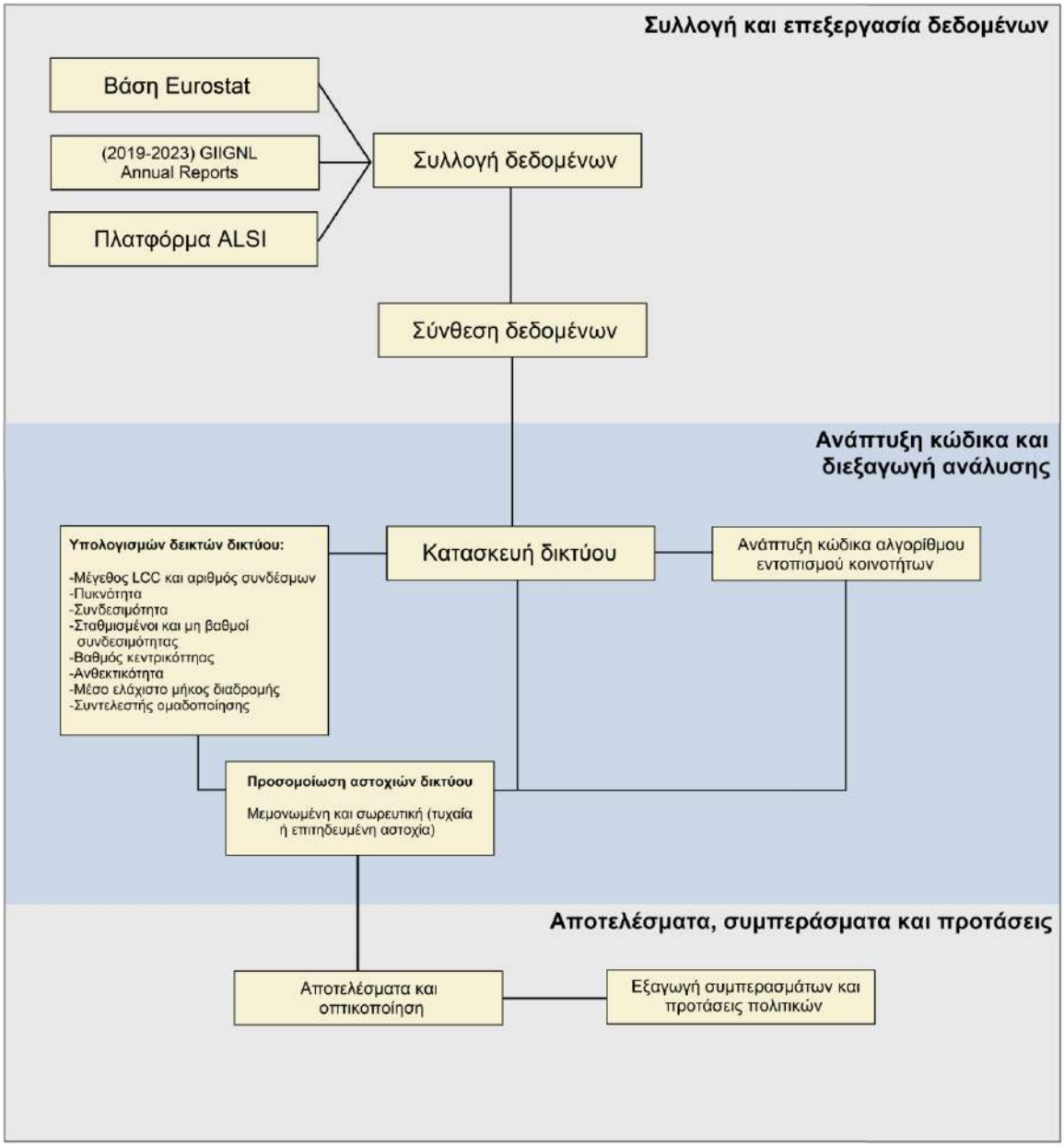
Για την υλοποίηση της ανάλυσης και προκειμένου τα αποτελέσματά της να είναι ασφαλή και τα συμπεράσματα αξιόπιστα, απαραίτητη κρίθηκε η συλλογή έγκυρων **δεδομένων εμπορικών ροών LNG** σε επίπεδο ‘’κράτος-προς-λιμένα’’. Χωρίς να είναι διαθέσιμα δεδομένα τύπου AIS (Automatic Identification System), αυτό αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολη και επίπονη διαδικασία λόγω της μεγάλης αποκέντρωσης και υψηλής πολυπλοκότητας του εμπορίου LNG, αλλά και της διαρκώς αυξανόμενης τάσης για άμεσο (spot) εμπόριο, το οποίο αντικαθιστά την παραδοσιακή μορφή εμπορίου που βασιζόταν στα μακροπρόθεσμα συμβόλαια προμήθειας.

Έτσι, επιστρατεύτηκαν δεδομένα για τα έτη 2018-2022 από τη βάση της Eurostat σχετικά με την ετήσια θαλάσσια διακίνηση εμπορευμάτων, ετήσια δεδομένα εμπορικών ροών σε κρατικό επίπεδο από ετήσιες αναφορές της Διεθνούς Ένωσης Εισαγωγέων LNG (2019-2023 GIIGNL Annual Reports) και δεδομένα για τα ανωτέρω έτη σχετικά με την ημερήσια πληρότητα των εγκαταστάσεων εισαγωγής και αποθήκευσης LNG της Ευρώπης μέσω της πλατφόρμας Aggregated LNG Storage Inventory (ALSI). Ακολούθησε η σύνθεση των δεδομένων αυτών με σκοπό να προκύψει ένας τελικός πίνακας Προέλευσης-Προορισμού με τις εμπορευόμενες σε κάθε διαδρομή ποσότητες LNG για κάθε ένα από τα πέντε έτη της περιόδου ανάλυσης.

Έχοντας ως βάση τα παραπάνω στοιχεία, **δομήθηκε το εμπορικό δίκτυο** εισαγωγών της Ευρώπης για κάθε έτος. Στη συνέχεια ακολούθησε η **ανάπτυξη προγραμματιστικού κώδικα** μέσω του λογισμικού MATLAB της Mathworks. Στο πλαίσιο αυτό δημιουργήθηκε πληθώρα συναρτήσεων, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα. Ορισμένες από αυτές περιορίζονται στην εισαγωγή των δεδομένων στον πυρήνα του κώδικα, άλλες στον εντοπισμό των εμπορικών κοινοτήτων στο δίκτυο και άλλες στον υπολογισμό των επιλεγμένων δεικτών από τη Θεωρία Δικτύων. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνονται συναρτήσεις που καθιστούν εφικτή την προσομοίωση των αστοχιών των κόμβων του δικτύου. Οι αστοχίες αυτές εκδηλώνονται μεμονωμένα ή σωρευτικά. Στη δεύτερη περίπτωση, διακρίνονται σε στοχευμένες ή τυχαίες, ανάλογα με την αλληλουχία των κόμβων που αστοχούν. Έπειτα από κάθε προσομοιούμενη αστοχία, υπολογίζεται η τιμή κάθε δείκτη που επιλέχθηκε με τη βοήθεια των συναρτήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι ο κώδικας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας **δύναται να εφαρμοστεί σε**

οποιοδήποτε τύπο δικτύου εισαχθεί από το χρήστη του και, επομένως, μπορεί να καλύψει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν **αποτελέσματα που οπτικοποιούνται** με τη βοήθεια πινάκων, χαρτών και διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται και αναζητείται πιθανή εξήγησή τους. Επίσης, διαπιστώνεται πιθανή ταύτισή τους ή απόκλιση σε σχέση με ευρήματα της υπάρχουσας σχετικής βιβλιογραφίας. Τέλος, εξάγονται **συμπεράσματα** τα οποία οδηγούν σε **προτάσεις προς υιοθέτηση**, ενώ, ταυτόχρονα, αναφέρονται δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν και πιθανές αδυναμίες της μελέτης. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά μέσω του διαγράμματος ροής του Σχήματος 3.1 που ακολουθεί.

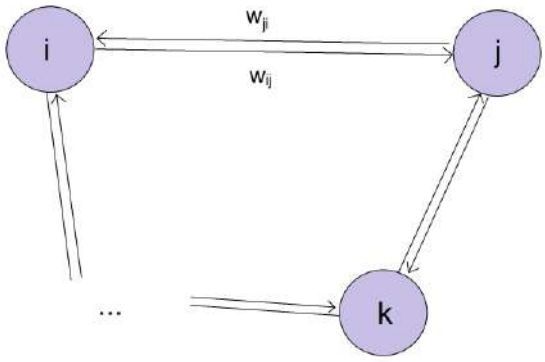


Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας της ανάλυσης

3.2. Θεωρητικό υπόβαθρο

3.2.1. Κατασκευή δικτύου

Η κατασκευή του δικτύου υλοποιείται όπως στις περισσότερες αντίστοιχες έρευνες ανάλυσης εμπορικού δικτύου (Peng et al. 2020, Li et al. 2021). Το **κατευθυνόμενο δίκτυο** G(V,E,W) αναπαριστά όλα τα ζεύγη εμπορικών σχέσεων μεταξύ χωρών ή λιμένων σε ετήσια βάση. Οι κόμβοι V= {v_1, v_2, v_3,…, v_n} είναι το σύνολο των *n* κόμβων του δικτύου G. Αυτοί αντιπροσωπεύουν τις χώρες-εξαγωγείς και τους λιμένες εισαγωγών ή μεταφορτώσεων και ορισμένα σημεία συμφόρησης (chokepoints) των θαλάσσιων εμπορικών διαδρομών. Το σύνολο E= {e_{ij}} εκφράζει τους συνδέσμους που αντικατοπτρίζουν τη σχέση μεταφορών LNG μεταξύ των κόμβων *i* και *j*, και κάθε στοιχείο λαμβάνει την τιμή 1 αν η σχέση υφίσταται ή 0 αν όχι. Το βάρος κάθε συνδέσμου του δικτύου W= {w_{ij}} εκφράζει τον μεταφερόμενο όγκο μεταξύ των δύο λιμένων *i* και *j*, όπως προέκυψε από τη σύνθεση των δεδομένων και εκπεφρασμένο σε εκατομμύρια τόνους (MT). Έτσι, το δίκτυο αναπαρίσταται με τη βοήθεια ενός γενικού πίνακα Προέλευσης-Προορισμού A= {a_{ij}}, διαστάσεις του οποίου αποτελούν οι κόμβοι του δικτύου (*i*,*j* από 1 έως *n*) και στοιχεία του το βάρος των μεταξύ τους συνδέσμων (a_{ij}= w_{ij}). Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί προς διευκόλυνση της κατανόησής τους.

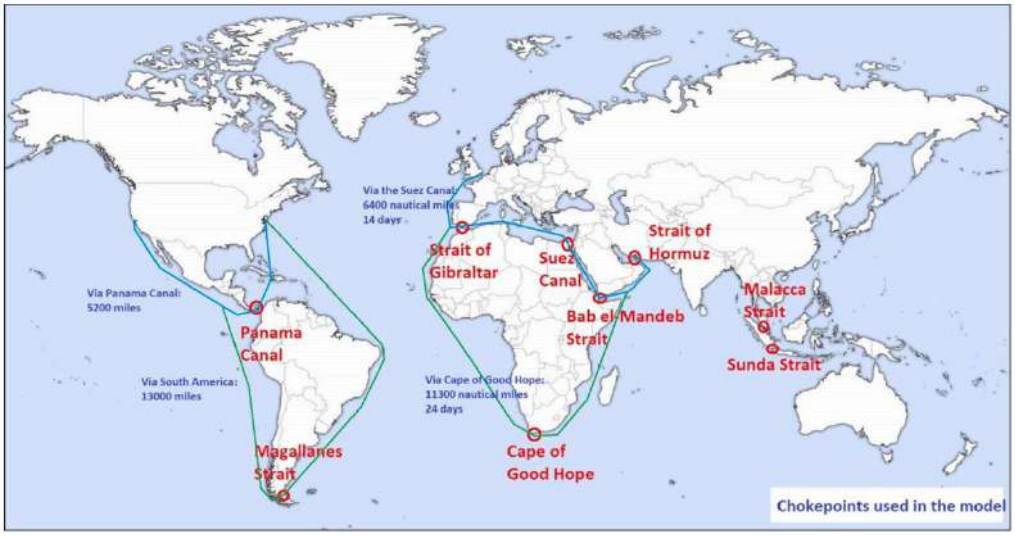


Σχήμα 3.2 Κατασκευή δικτύου ετήσιου εμπορίου LNG

Η παραπάνω μορφή του δικτύου επιδίδει σημαντικά πλεονεκτήματα και προσδίδει **καινοτομία** στην ανάλυση:

- Πρωτίστως, η σημαντική πλειοψηφία των σχετικών μελετών που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης χρησιμοποιεί μη κατευθυνόμενο δίκτυο προκειμένου να αναλύσει το εμπόριο. Όμως, η **υιοθέτηση κατευθυνόμενου δικτύου** συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της ροής και της κατεύθυνσης των εμπορικών ροών

- Παρατηρείται ότι η σημαντική πλειοψηφία του όγκου της υπάρχουσας έρευνας εστιάζει στην ανάλυση σε διακρατικό επίπεδο, ενώ οι λιγοστές έρευνες που διεξάγουν ανάλυση σε επίπεδο λιμένων (Peng et al. 2020, Mei et al. 2024, Xiao et al. 2024) χρησιμοποιούν στο σύνολό τους δεδομένα τύπου AIS. Έτσι, η παρούσα εργασία επιχειρεί πρωτοποριακά να διερευνήσει το εμπόριο LNG **εμπλέκοντας το στοιχείο των λιμένων** χωρίς τη χρήση τέτοιου τύπου δεδομένων.
- Παρότι η κρίσιμη σημασία των **σημείων συμφόρησης (chokepoints)** των θαλάσσιων διαδρομών έχει αναδειχθεί σε πληθώρα μελετών του θαλάσσιου εμπορίου (Rodrigue et al. 2004, Miah et al. 2017), η ένταξη τέτοιων σημείων στην έρευνα που σχετίζεται με το διεθνές εμπόριο LNG είναι περιορισμένη (Xiao et al. 2024, Sun et al, 2022). Σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency), ως σημεία συμφόρησης ορίζονται ‘’στενά κανάλια κατά μήκος ευρέως χρησιμοποιούμενων παγκόσμιων θαλάσσιων διαδρομών, μερικά από τα οποία είναι τόσο στενά που οι περιορισμοί ρυθμίζουν το μέγεθος των πλοίων που μπορούν να εξυπηρετηθούν’’. Ακολουθώντας το παράδειγμα των Sun et al. (2022), τα σημεία chokepoints που εμπλέκονται σε κάθε διαδρομή προέκυψαν με τη βοήθεια της εφαρμογής SeaRates. Τα σημεία που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης προέκυψαν από τη μελέτη της ασφάλειας του διεθνούς εμπορίου LNG των Meza et al. (2022). Από τα σημεία αυτά, που φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 3.3, χρησιμοποιήθηκαν τα πέντε που προέκυψε ότι σχετίζονται με τις διαδρομές εισαγωγών της Ευρώπης: **οι διώρυγες του Παναμά και του Σουέζ και τα στενά του Γιβραλτάρ, της Σούντα και του Ορμούζ**.



Σχήμα 3.3 Chokepoints που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των Meza et al. (2022)

Στο Σχήμα 3.4 δίνονται περισσότερες πληροφορίες για κάθε ένα από τα σημεία συμφόρησης που περιλαμβάνονται στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται

ο τύπος του, οι περιοχές που συνδέει, τα συνορεύοντα κράτη, το πλάτος του, και τέλος, παράγοντες που απειλούν τη λειτουργία τους και αιτιολογούν την ένταξη του στο δικτυακό μοντέλο.

Profile and major features of chokepoints.

Chokepoint	Connecting	Bordering Countries	Type	Width	Affected by	Incidents
Strait of Hormuz	The Persian Gulf, Gulf of Oman, and the Indian Ocean	Iran, United Arab Emirates (UAE), and Oman	Natural - Strait	48 km	War Piracy Threat of terrorism	Tanker War (1984 – 1987)
Suez Canal	The Mediterranean and the Red Sea	Egypt	Artificial –waterway	0.2 km	War Diplomatic disputes Operational incidents	Ever Given blockade (2021) Invasion of Sinai Peninsula Six Days War
Panama Canal	The Atlantic and the Pacific Oceans	Panama	Artificial - Canal	0.3 km	Infrastructure dimensions, weather and climate	Panama Canal closure due to heavy rains (2010)
Gibraltar Strait	The Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean	Spain, Gibraltar (UK), and Morocco	Natural - Strait	13 km	Weather and climate	Blockade by the Spanish Republican Navy (1936)

Σχήμα 3.4 Συμπληρωματικές πληροφορίες σχετικά με τα chokepoints που περιλαμβάνονται στο δίκτυο (Meza et al. 2022)

3.2.2. Δείκτες της Θεωρίας Δικτύων

Προκειμένου να αναλυθεί το δίκτυο που κατασκευάστηκε με τον τρόπο που περιγράφηκε νωρίτερα, αξιοποιήθηκαν ορισμένοι δείκτες της Θεωρίας Σύνθετων Δικτύων (Complex Network Theory). Ακολούθως, επιδιώκεται να οριστεί κάθε ένας από αυτούς, να παρουσιαστεί ο τρόπος υπολογισμού του, να τεκμηριωθεί η χρήση του και να επεξηγηθεί η φυσική σημασία του.

Μέγεθος δικτύου

Το μέγεθος του δικτύου δεν ορίζεται πάντοτε με τον ίδιο τρόπο. Για παράδειγμα, οι Xiao et al. (2024) το ορίζουν ως το σύνολο των κόμβων, ενώ οι Sun et al. (2022) ως το σύνολο κόμβων και συνδέσμων. Στην παρούσα έρευνα θεωρείται ότι ισούται με το σύνολο των κόμβων του Largest Connected Component (LCC), δηλαδή του μεγαλύτερου υποδικτύου στο οποίο είναι εφικτή η μετάβαση από οποιονδήποτε κόμβο σε διαφορετικό κόμβο του ίδιου υποδικτύου. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική λόγω των αστοχιών που θα προσομοιωθούν στα πλαίσια της ανάλυσης, οι οποίες ενδέχεται να κατακερματίσουν το δίκτυο σε μικρότερα, ασύνδετα μεταξύ τους, υποδίκτυα. Στην πράξη, το μέγεθος του δικτύου αναπαριστά το σύνολο των χωρών-εξαγωγέων και λιμένων-εισαγωγέων LNG.

Πυκνότητα δικτύου

Ως πυκνότητα ενός δικτύου ορίζεται το παρακάτω μέγεθος:

$$\Delta = \frac{m}{n(n-1)}$$

όπου *m* ο αριθμός των συνδέσμων στο δίκτυο και *n* των κόμβων. Η πυκνότητα λαμβάνει τιμές από 0 έως 0.50. Οι υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν καλύτερη σύνδεση των κόμβων του δικτύου μεταξύ τους (Hou et al. 2023, Geng et al. 2014).

Βαθμός συνδεσιμότητας

Ο εξωτερικός και ο εσωτερικός βαθμός συνδεσιμότητας ορίζονται αντίστοιχα ακολούθως:

$$k_i^{out} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}$$

$$k_i^{in} = \sum_{j=1}^{n} a_{ji}$$

όπου για τον κόμβο *i*, το a_{ij} ισούται με 1 αν υπάρχει ροή εμπορίου μεταξύ κόμβου *i* και *j* και *n* ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Ο εξωτερικός βαθμός συνδεσιμότητας ενός κράτους ή λιμένα εκφράζει τον αριθμό των λιμένων με τους οποίους διατηρεί σχέση εξαγωγής, ενώ ο εσωτερικός βαθμός συνδεσιμότητας ενός κράτους ή λιμένα εκφράζει τον αριθμό των κρατών με τα οποία διατηρεί σχέση εισαγωγής (Geng et al. 2014). Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, οι λιμένες που έχουν και σχέσεις εισαγωγής και σχέσεις εξαγωγής είναι όσοι λειτουργούν ως σημεία μεταφόρτωσης LNG.

Σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας

Ο σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας αντιμετωπίζει την αδυναμία του μη σταθμισμένου να εκφράσει, εκτός από τον αριθμό των εμπορικών σχέσεων ενός κόμβου, τον εμπορικό όγκο που εξάγεται ή εισάγεται μέσω αυτού. Έτσι, ο εξωτερικός και ο εσωτερικός σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας προκύπτουν από τον τύπο:

$$s_i^{out} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} w_{ij}$$

$$s_j^{in} = \sum_{j=1}^{n} a_{ji} w_{ji}$$

όπου για τον κόμβο *i*, το α_{ij} ισούται με 1 αν υπάρχει ροή εμπορίου μεταξύ κόμβου *i* και *j* και n ο αριθμός των κόμβων του δικτύου και w_{ij} είναι το βάρος του συνδέσμου e_{ij} (Geng et al. 2014), δηλαδή η ποσότητα που μεταφέρεται από τον κόμβο *i* προς τον κόμβο *j* σε εκατομμύρια τόνους ετησίως (MT). Επομένως, ο εξωτερικός και ο εσωτερικός σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας ενός κράτους ή λιμένα αντιπροσωπεύουν τον ετήσιο όγκο εξαγωγών και εισαγωγών του αντίστοιχα.

Συνδεσιμότητα δικτύου

Η συνδεσιμότητα του δικτύου είναι, επίσης, ένας δείκτης του οποίου ο τρόπος υπολογισμού δεν ορίζεται με έναν μοναδικό τρόπο. Στην εργασία αυτή, ο τρόπος υπολογισμού της συμβαδίζει με αυτόν των συναφών σε αντικείμενο μελετών (Xiao et al. 2024, Sun et al. 2022), όπου η συνδεσιμότητα ορίζεται ως το σύνολο των πιθανών διαδρομών που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο δίκτυο. Αυξημένη τιμή της συνδεσιμότητας φανερώνει καλή και ομοιόμορφη σύνδεση μεταξύ των κόμβων που παρέχει εναλλακτικές διαδρομές για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού.

Βαθμός κεντρικότητας δικτύου

Ο εξωτερικός και ο εσωτερικός βαθμός κεντρικότητας του δικτύου εκφράζουν το βαθμό του μονοπωλίου της αγοράς εξαγωγών και εισαγωγών, αντίστοιχα (Geng et al. 2014), και υπολογίζονται από τους τύπους:

$$C^{out} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(k_{\max}^{out} - k_i^{out} \right)}{(n-1)^2}$$

$$C^{in} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(k_{\max}^{in} - k_i^{in} \right)}{(n-1)^2}$$

όπου *n* ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, k_i^{in} και k_i^{out} ο εσωτερικός και εξωτερικός σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας του κόμβου *i*, αντίστοιχα, και k_i^{in} και k_i^{out} ο μέγιστος εσωτερικός και εξωτερικός σταθμισμένος βαθμός

συνδεσιμότητας του δικτύου, αντίστοιχα. Ο δείκτης αυτός αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση του εμπορίου LNG, όπου οι περιοχές του πλανήτη με σημαντικά αποδεδειγμένα κοιτάσματα φυσικού αερίου είναι γεωγραφικά περιορισμένες, όπως αποδείχθηκε στην πρώτη ενότητα της εργασίας αυτής.

Μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής

Το μέσο ελάχιστο μήκος εκφράζει τη μέση ελάχιστη απόσταση κάθε πιθανού ζεύγους διαδρομών υπό τη σκοπιά των μεταφορτώσεων (Peng et al. 2020). Αυτό σημαίνει ότι το μήκος κάθε συνδέσμου θεωρείται μοναδιαίο. Ο δείκτης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} d(v_i, v_j)$$

όπου N το πλήθος των κόμβων στο δίκτυο και $d(v_i,v_j)$ το ελάχιστο δυνατό πλήθος συνδέσμων που πρέπει να διανυθούν για τη μεταφορά από τον κόμβο v_i προς τον κόμβο v_j.

Συντελεστής ομαδοποίησης δικτύου

Ως συντελεστής ομαδοποίησης ενός κόμβου ορίζεται ο λόγος του αριθμού των υφιστάμενων συνδέσμων που συνδέουν τους γειτονικούς σε αυτόν κόμβους μεταξύ τους προς τον δυνητικά μέγιστο δυνατό αριθμό των κόμβων αυτών. Έτσι, εκφράζει το πόσο καλά συνδεδεμένοι είναι μεταξύ τους οι γειτονικοί κόμβοι του κόμβου αυτού, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα και η στιβαρότητα του δικτύου (Mei et al. 2024). Οι συντελεστές ομαδοποίησης κόμβου και δικτύου υπολογίζονται, αντίστοιχα, από τον τύπο:

$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)}$$

$$\overline{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} C_i$$

όπου N ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, C_i ο συντελεστής ομαδοποίησης του κόμβου i, e_i οι σύνδεσμοι μεταξύ των γειτονικών στον κόμβο i κόμβων και k_i ο βαθμός συνδεσιμότητας του κόμβου i.

Ανθεκτικότητα δικτύου

Σε αντίθεση με τους προηγούμενους δείκτες, η ανθεκτικότητα του δικτύου δεν εκφράζει τα αμιγώς τοπολογικά χαρακτηριστικά, ενώ αποτελεί μία περισσότερο ποιοτική απεικόνιση. Εντούτοις, ο δείκτης που ακολουθεί έχει καθιερωθεί ως ένας τρόπος μέτρησης της ανθεκτικότητας του δικτύου σε ενδεχόμενες αναταράξεις (Xiao et al. 2024, Sun et al. 2022) και ισούται με:

$$R_s = \frac{NV \times NS}{ND \times NC}$$

Με το συμβολισμό *NV* και *NS* ορίζεται η συνδεσιμότητα και το μέγεθος του δικτύου αντίστοιχα, όπως αυτά ορίστηκαν νωρίτερα, που, όπως είναι λογικό, είναι ευθέως ανάλογα με την ανθεκτικότητά του, αφού με την αύξηση της συνδεσιμότητας αυξάνονται και οι διαθέσιμες εναλλακτικές διαδρομές σε περίπτωση αστοχίας κόμβου. Αντίστροφα, τα μεγέθη *ND* και *NC*, δηλαδή η πυκνότητα και η κεντρικότητα του δικτύου αντίστοιχα, είναι αντιστρόφως ανάλογες της ανθεκτικότητάς του, αφού η υψηλή συγκέντρωση μεγάλου μεριδίου των συνδέσμων του δικτύου σε περιορισμένο αριθμό κόμβων καθιστά το δίκτυο ευάλωτο σε ενδεχόμενη αστοχία στην περιοχή αυτή (Xiao et al. 2024).

3.2.3. Αλγόριθμος εντοπισμού κοινοτήτων

Οι Girvan & Newman (2002) όρισαν τη δομή κοινότητας ως την περίπτωση όπου κόμβοι ενός δικτύου εντάσσονται σε μία ομάδα κόμβων με στενή μεταξύ τους σύνδεση. Αργότερα, ο Newman M. (2006) επιχείρησε να ποσοτικοποιήσει την ύπαρξη τέτοιων δομών στο δίκτυο, συνδέοντάς τις με την έννοια της **τμηματικότητας**. Η τμηματικότητα αποτελεί δείκτη που εκφράζει την ποιότητα του διαχωρισμού μεταξύ των διαφορετικών κοινοτήτων του δικτύου (Peng et al. 2020), λαμβάνει τιμές μεταξύ -1 και 1 και προκύπτει από τον τύπο:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j)$$

όπου $A_{ij}=w_{ij}$, k_i ο βαθμός συνδεσιμότητας του κόμβου *i*, *m* είναι το μισό του συνόλου των βαρών των συνδέσμων του δικτύου και η συνάρτηση $\delta(c_i,c_j)$ λαμβάνει την τιμή 1 αν οι κόμβοι i και j ανήκουν στην ίδια κοινότητα, αλλιώς την τιμή 0. Με βάση την ιδέα της μεγιστοποίησης της σπονδυλότητας στο δίκτυο, οι Jin et al (2014) εφάρμοσαν τον ακόλουθο αλγόριθμο διαχωρισμού κοινοτήτων:

1. **Βήμα 1.** Κάθε κόμβος θεωρείται ξεχωριστή κοινότητα

2. **Βήμα 2.** Κάθε ζεύγος γειτονικών κόμβων *i* και *j* συγχωνεύονται, σχηματίζοντας μία νέα κοινότητα. Υπολογίζεται η αλλαγή της τιμής της τμηματικότητας στο δίκτυο ΔQ_{ij}
3. **Βήμα 3.** Κάθε κόμβος μετακινείται στην κοινότητα στην οποία η μετακίνηση του επιφέρει τη μέγιστη δυνατή αύξηση της τμηματικότητας, εφόσον αυτή είναι θετική
4. **Βήμα 4.** Τα Βήματα 2 και 3 επαναλαμβάνονται έως ότου η τιμή ΔQ_{ij} να είναι μικρότερη ή ίση του μηδέν για κάθε ζεύγος γειτονικών κόμβων i και j.

Η τιμή της πρόσθετης διαφοράς στη τμηματικότητας του δικτύου ΔQ_{ij} υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$\Delta Q = \left[\frac{\sum_{\text{in}} + 2k_{i,\text{in}}}{2m} - \left(\frac{\sum_{\text{tot}} + k_i}{2m}\right)^2\right] - \left[\frac{\sum_{\text{in}}}{2m} - \left(\frac{\sum_{\text{tot}}}{2m}\right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m}\right)^2\right]$$

όπου Σ_{in} το σύνολο των βαρών των συνδέσμων εντός της κοινότητας *C* στην οποία εντάσσεται ο κόμβος *i*, Σ_{tot} το σύνολο των βαρών των συνδέσμων των κόμβων της κοινότητας *C*, k_i το σύνολο των βαρών των συνδέσμων του κόμβου *i*, k_i^{in} το σύνολο των βαρών των συνδέσμων του κόμβου *i* προς κόμβους της κοινότητας *C* και *m* το σύνολο των βαρών των συνδέσμων του δικτύου.

3.2.4. Προσομοίωση αστοχιών στο δίκτυο

Σύμφωνα με το διαχωρισμό που αποτύπωσαν οι Bi et al. (2023), η επιλεγμένη προσέγγιση αποτελεί μία δικτυακή προσέγγιση (network-based approach) του ζητήματος της ανθεκτικότητας μεταφορικών συστημάτων, και συγκεκριμένα μία προσέγγιση μέσω προσομοίωσης αστοχίας δικτύου. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται καθιερωμένη και τυγχάνει ευρείας εφαρμογής (Xiao et al. 2024, Sun et al. 2022, Mei et al. 2024). Περιλαμβάνει την προσομοίωση αστοχιών κόμβων του δικτύου και την παρατήρηση ορισμένων χαρακτηριστικών του δικτύου ή της μεταβολής αυτών. Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας προβλέπεται η προσομοίωση δύο τύπων αστοχιών:

- **Σωρευτικές αστοχίες**, όπου οι κόμβοι του δικτύου αστοχούν σωρευτικά. Αυτές χωρίζονται σε τυχαίες (random) αστοχίες ή στοχευμένες (intentional), ανάλογα με την αλληλουχία των κόμβων που αστοχούν. Στην πρώτη περίπτωση, οι κόμβοι που αστοχούν επιλέγονται τυχαία, ενώ στη δεύτερη οι κόμβοι αφαιρούνται κατά σειρά της σημασίας τους, η οποία ορίζεται με βάση τη σταθμισμένη συνδεσιμότητα που απομένει στους εναπομείναντες κόμβους (Xiao et al. 2024). Οι δείκτες που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των προσομοιούμενων αστοχιών είναι ο δείκτης ανθεκτικότητας του δικτύου, ο συντελεστής

ομαδοποίησης του δικτύου και το ποσοστό των κόμβων που παραμένουν στο Largest Connected Component (LCC) σε σχέση με τον αρχικό αριθμό των κόμβων του δικτύου (Liu et al. 2023). Η έννοια του LCC έχει επεξηγηθεί στα πλαίσια της υποενότητας 3.3.2 και του δείκτη του μεγέθους του δικτύου. Παρόλα αυτά, κρίνεται σημαντικό να προστεθεί ότι, σε περίπτωση που μετά από αστοχία κόμβου, προκύπτει ο μέγιστος αριθμός κόμβων σε παραπάνω από ένα υποδίκτυο, επιλέγεται αυτό που εμπεριέχει τον κόμβο με τον μεγαλύτερο σταθμισμένο βαθμό συνδεσιμότητας.

- **Μεμονωμένες αστοχίες,** όπου οι κόμβοι αστοχούν μεμονωμένα (Liu et al. 2023, Wan et al. 2023). Οι δείκτες που παρατηρούνται σε αυτή την περίπτωση είναι οι ίδιοι με αυτούς των σωρευτικών αστοχιών, προστιθέμενης της επίδοσης του δικτύου, η οποία θα οριστεί στην παρούσα εργασία ως το ποσοστό της συνολικής εισαγόμενης από την Ευρώπη ποσότητας που δύναται να παραδοθεί, παρά την αστοχία μεμονωμένου κόμβου.

Ανάλυση και αποτελέσματα

4.1. Βάση δεδομένων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σύνολο της συναφούς έρευνας που αφορά το εμπόριο LNG και διεξάγεται σε επίπεδο λιμένων αξιοποιεί δεδομένα τύπου AIS. Ως εκ τούτου, **η παρούσα ανάλυση αποτελεί μία εξαίρεση**, αφού επιχειρείται μία εξαίρεση στην τάση αυτή. Συνεπώς, όπως είναι αναμενόμενο, η εύρεση αξιόπιστων δεδομένων που θα αποτελούσαν τη βάση της ανάλυσης αποτέλεσε επίπονη και χρονοβόρο διαδικασία, και περιόρισε τη μελέτη σε επίπεδο ''από χώρα προς λιμένα''. Για το γεγονός αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η αποκέντρωση και η ευελιξία του διεθνούς εμπορίου LNG, αλλά και η διαρκή αύξηση του μεριδίου των άμεσων αγορών (spot market), οι οποίες αντικαθιστούν τα μακροχρόνια συμβόλαια προμήθειας. Για τη σύνθεση της τελικής μορφής δεδομένων αξιοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές πηγές δεδομένων, των οποίων η χρήση περιγράφεται παρακάτω.

4.1.1. GIIGNL Annual Reports: ετήσιο διακρατικό εμπόριο

Ο International Group of LNG Importers (GIIGNL), που ιδρύθηκε το 1971 ως μη κερδοσκοπικός φορέας με σκοπό τη διεθνή εκπροσώπηση του κλάδου της εμπορίας LNG, αριθμεί σήμερα 94 φορείς-μέλη, στους οποίους περιέχονται εκπρόσωποι από όλους τους τερματικούς σταθμούς εισαγωγής LNG παγκοσμίως. Έτσι, οι ετήσιες αναφορές του αποτελούν χρήσιμη πηγή πληροφοριών για το διεθνές τοπίο εμπορίου LNG. Για αυτό το λόγο **αξιοποιήθηκαν οι αναφορές για τα έτη 2018-2022** (2019-2023 GIIGNL Annual Reports) προκειμένου να εξαχθούν στοιχεία **εμπορευόμενων ποσοτήτων LNG σε διακρατικό επίπεδο**. Ενδεικτικά παρατίθεται ο αντίστοιχος πίνακας μέσω του Σχήματος 4.1 για το έτος 2020.

Quantities (in MT) received in 2020

Markets	Algeria	Angola	Argentina	Australia	Brunei	Cameroon	Egypt	Equatorial Guinea	Indonesia	Malaysia	Nigeria	Norway	Oman	Papua New Guinea	Peru	Qatar	Russia (Asia)	Russia (Europe)	Trinidad and Tobago	UAE	USA	Re-exports Received	Re-exports Loaded	2020 Net imports
Bangladesh	0.07							0.06			0.55					2.98		0.07			0.27	0.18		4.18
China	0.06	0.35		25.67	0.66	0.39	0.13	0.14	5.37	6.38	2.54		1.16	2.90	1.13	8.20	1.56	3.36	0.19	0.30	3.21	1.22		68.91
India	0.21	2.35		1.04	0.07	0.39	0.13	0.56			2.94		1.24			10.72		0.68	0.50	3.32	2.36	0.14		26.63
Indonesia									2.75															2.75
Japan				29.05	3.96		0.08		2.16	10.59	1.36		2.45	3.42	0.63	8.69	5.86	0.28		1.03	4.73	0.15		74.43
Malaysia				1.94	0.70						0.07												-0.14	2.57
Myanmar										0.12												0.06		0.18
Pakistan	0.27	0.07					0.32		0.13	0.06	0.46		0.20			4.64		0.13		0.33	0.79			7.42
Singapore		0.20		2.35	0.06		0.06	0.08	0.22				0.13			0.46	0.06		0.07		0.61	0.80	-1.08	3.19
South Korea		0.40		8.10	0.32	0.13	0.06	0.06	2.77	5.00	0.34		4.01	0.29	1.66	9.46	1.77	0.33	0.07	0.18	5.63	0.66	-0.03	40.81
Taiwan				4.73	0.25		0.12		1.14	0.71	0.39		0.08	1.62		4.96	1.59	0.41	0.12	0.18	1.01	0.07		17.76
Thailand				0.79	0.19	0.06	0.07	0.05	0.21	0.98	0.19		0.15	0.07		2.18			0.13		0.54			5.61
ASIA	0.61	3.37		77.63	6.22	0.57	0.95	0.95	14.74	23.85	8.03		9.41	8.30	3.42	52.29	11.25	5.26	1.08	5.34	19.34	3.88	-1.25	254.43
Belgium												0.02				1.84		0.64			0.88		-0.16	3.21
Finland												0.01						0.14						0.15
France	2.96	0.13									2.91	0.53			0.07	1.38		3.44	0.30		1.79	0.00	-0.46	13.06
Gibraltar																						0.05		0.05
Greece	0.19						0.05				0.16	0.06				0.54		0.07			1.05	0.07		2.20
Italy	2.14	0.06						0.06			0.14					5.05			0.06		1.57	0.00		9.07
Lithuania												0.75						0.21			0.48			1.44
Malta																			0.22		0.10			0.32
Netherlands	0.06	0.20						0.07			0.28	0.37			0.07	0.18		2.58	0.25		1.71	0.00	-0.44	5.33
Norway												0.10						0.01				0.01		0.12
Poland											0.06	0.25				1.64			0.05		0.78			2.78
Portugal	0.06	0.07						0.06			2.28	0.06				0.21		0.48	0.06		0.78			4.07
Spain	0.39	0.28	0.12				0.07	0.70			2.97	0.38			0.13	2.25		2.01	1.57		3.88	0.05	-0.02	15.37
Sweden												0.14						0.15				0.06		0.36
Turkey	3.96	0.07				0.07	0.07	0.13			1.32	0.07				2.26		0.16	0.39		2.23			10.22
United Kingdom	0.03						0.14				0.26	0.30				6.53		2.07	0.74		3.36			13.43
EUROPE	9.80	0.80	0.12			0.07	0.33	1.02			10.38	3.04			0.26	21.89		12.58	3.85		18.61	0.24	-1.18	61.99
Argentina	0.04		0.04													0.62		0.08	0.25		0.30	0.04		1.37
Brazil		0.08	0.05								0.03								0.26		1.98			2.39
Canada																			0.63					0.63
Chile				0.07				0.51											0.53		1.58			2.69
Colombia																			0.30		0.09			0.39
Dominican Republic	0.06											0.05							0.55		0.57		-0.06	1.17
Jamaica														0.03					0.34		0.43	0.07	-0.16	0.72
Mexico				0.07				0.07	0.24		0.15				0.07				0.45		0.76	0.06		1.88
Panama																					0.20	0.01		0.22
Puerto Rico												0.08							0.77			0.16		0.93
USA											0.15	0.06							0.72				-0.04	0.89
AMERICAS	0.10	0.08	0.09	0.14				0.08	0.24		0.33	0.11		0.03	0.07	0.62		0.08	4.79		3.03	0.34	-0.26	10.09
Israel																			0.24		0.33			0.57
Jordan											0.14					0.06		0.21	0.27		0.13			0.82
Kuwait	0.06	0.26				0.06	0.06	0.06			0.69		0.13			2.27					0.34	0.13		4.07
UAE		0.13									0.21		0.22					0.21	0.13	0.37	0.19			1.46
MIDDLE EAST & AFRICA	0.06	0.39				0.06	0.06	0.06			1.03		0.35			2.34		0.42	0.65	0.37	0.65	0.13	0.00	6.02
GLOBAL NET IMPORTS	10.58	4.64	0.21	77.77	6.22	1.10	1.34	2.61	14.99	23.85	20.55	3.15	9.76	8.33	3.76	77.13	11.25	18.35	10.08	5.71	44.76	2.59	-2.59	356.12

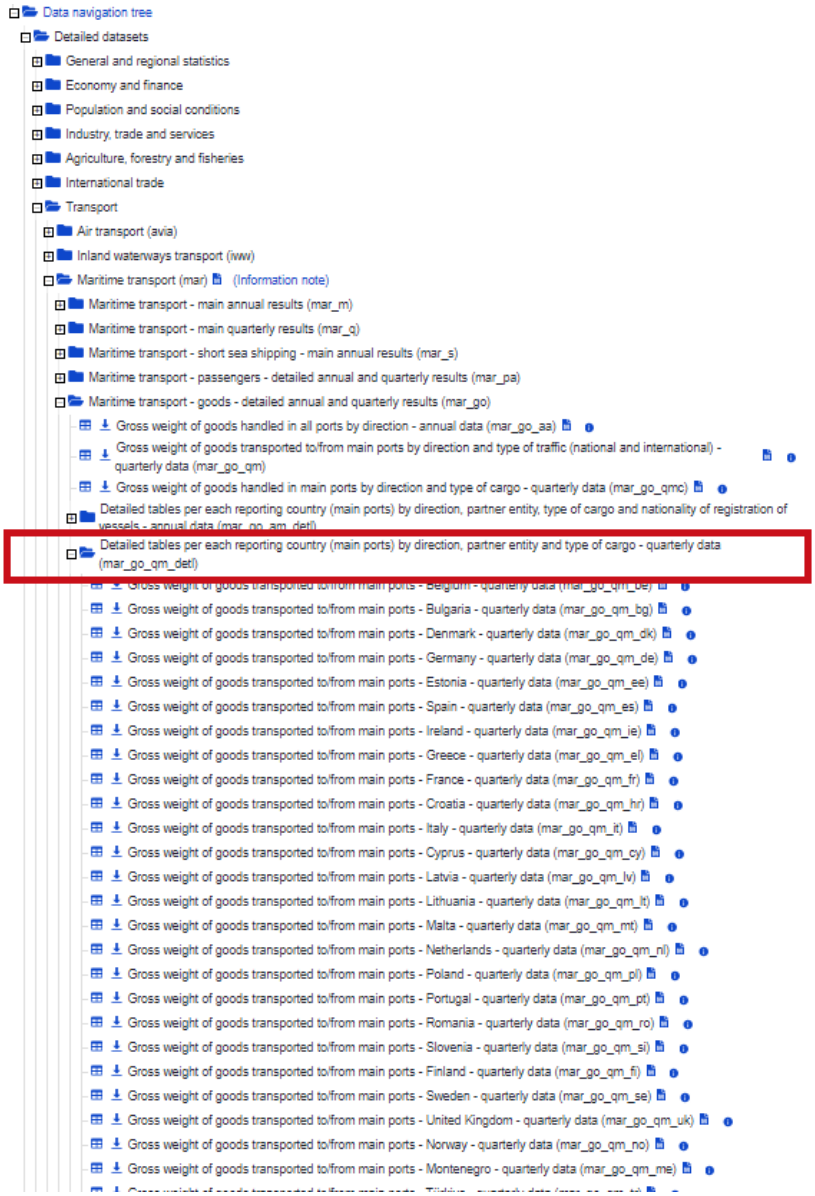
Σχήμα 4.1 Στοιχεία διακρατικού εμπορίου LNG για το 2020 (2021 GIIGNL Annual Report)

Παράλληλα, μέσω των ίδιων αναφορών εξάχθηκαν στοιχεία για τους υπό λειτουργία τερματικούς σταθμούς εισαγωγής LNG (import/regasification terminals) στην Ευρώπη. Στο τέλος του έτους 2022, τα υπάρχοντα terminals είναι αυτά τα οποία παρουσιάζονται στο χάρτη του Σχήματος 4.2, όπου περιέχονται παράκτια ή πλωτά terminals εισαγωγής και παράκτιοι ή πλωτοί σταθμοί υγροποίησης/εξαγωγής φυσικού αερίου (liquedification/export terminals).

Σχήμα 4.2 Υπάρχοντες τερματικοί σταθμοί εισαγωγής LNG στην Ευρώπη στο τέλος του 2022 (2023 GIIGNL Annual Report)

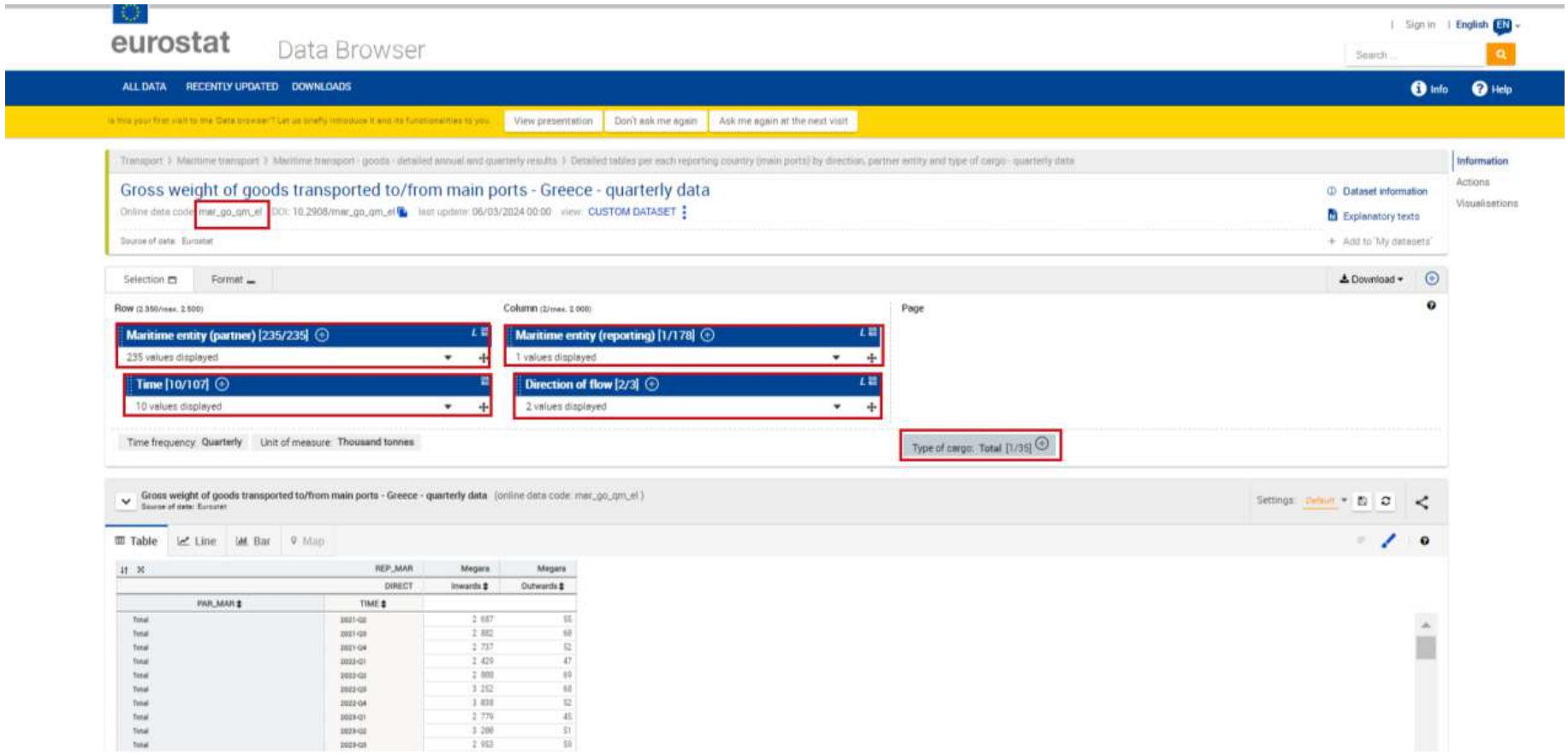
4.1.2. Eurostat: ετήσια διακίνηση λιμένων

Η βάση δεδομένων της Eurostat αποτελεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη στα πλαίσια της έρευνας πηγή δεδομένων υψηλής αξιοπιστίας όταν πρόκειται για στοιχεία που αφορούν κράτη-μέλη της ΕΕ και όχι μόνο. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε ο **πίνακας δεδομένων (dataset) mar_go_qm_delt**, η διαδικασία εύρεσης του οποίου απεικονίζεται στην εικόνα του Σχήματος 4.3 παρακάτω.



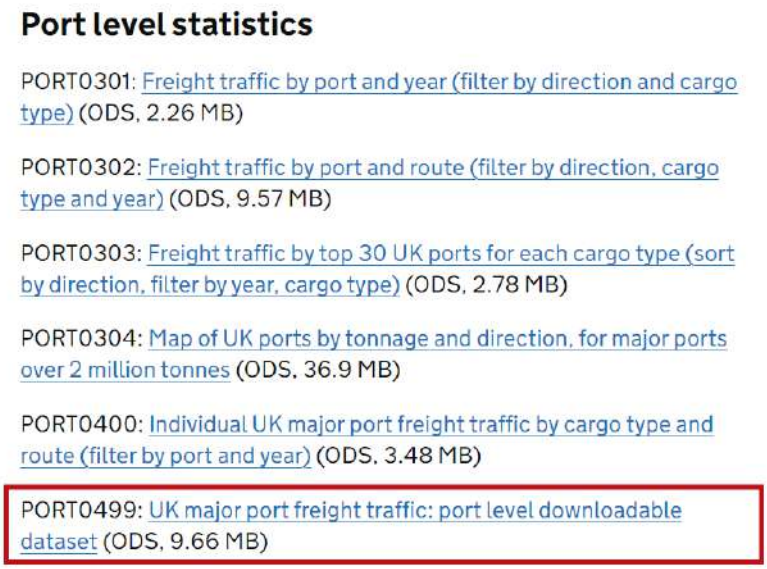
Σχήμα 4.3 Εύρεση πακέτου δεδομένων mar_go_qm_delt (Eurostat)

Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει για κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ τριμηνιαία **στοιχεία διακίνησης εμπορευμάτων** ανά τύπο εμπορεύματος, λιμένα του κράτους μέλους (reporting entity) και λιμένα προέλευσης ή προορισμού (partner entity). Εξάγονται δεδομένα για κάθε χώρα που διαθέτει εγκαταστάσεις εισαγωγής LNG, μέσω της διάταξης που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Διάταξη εξαγωγής δεδομένων από τη βάση της Eurostat (mar_go_qm_el dataset)

Ως λιμένες των κρατών-μελών (reporting entities) επιλέγονται οι λιμένες κάθε χώρας που φιλοξενούν υπάρχον τερματικό σταθμό εισαγωγής LNG, ως εμπορικός εταίρος (partner entity) όλοι οι πιθανοί εμπορικοί εταίροι και ως περίοδος (time) τα 20 τρίμηνα που αφορούν τα 5 έτη μελέτης (2018-2022). Επιλέγεται τόσο η ροή εισόδου όσο και η ροή εξόδου εμπορευμάτων (direction of flow) με σκοπό να εντοπιστούν πιθανές μεταφορτώσεις. Τέλος, επιλέγεται ως τύπος εμπορεύματος (type of cargo) το χύδην φορτίο, και συγκεκριμένα το υγροποιημένο αέριο (bulk-liquefied gas). Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία για τις στατιστικές αποδόσεις μεταφοράς αγαθών και επιβατών δια θαλάσσης (EC Directive 2009/42/EC), στην κατηγορία αγαθών που κωδικοποιείται ως ''liquefied gas'' με κωδικό αριθμό 11 περιλαμβάνονται το βουτάνιο, το προπάνιο και το LNG. Η συμπερίληψη των δύο επιπλέον εμπορευμάτων θα αντιμετωπιστεί κατά τη φάση της σύνθεσης που παρουσιάζεται αργότερα στην υποενότητα 4.1.4. Συμπληρώνεται ότι τα ίδια στοιχεία για την περίπτωση του Ηνωμένου Βασιλείου αντλήθηκαν από την κυβερνητική στατιστική υπηρεσία μέσω της ιστοσελίδας της (GOV.UK), και συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, μέσω του πακέτου δεδομένων (dataset) port0499.



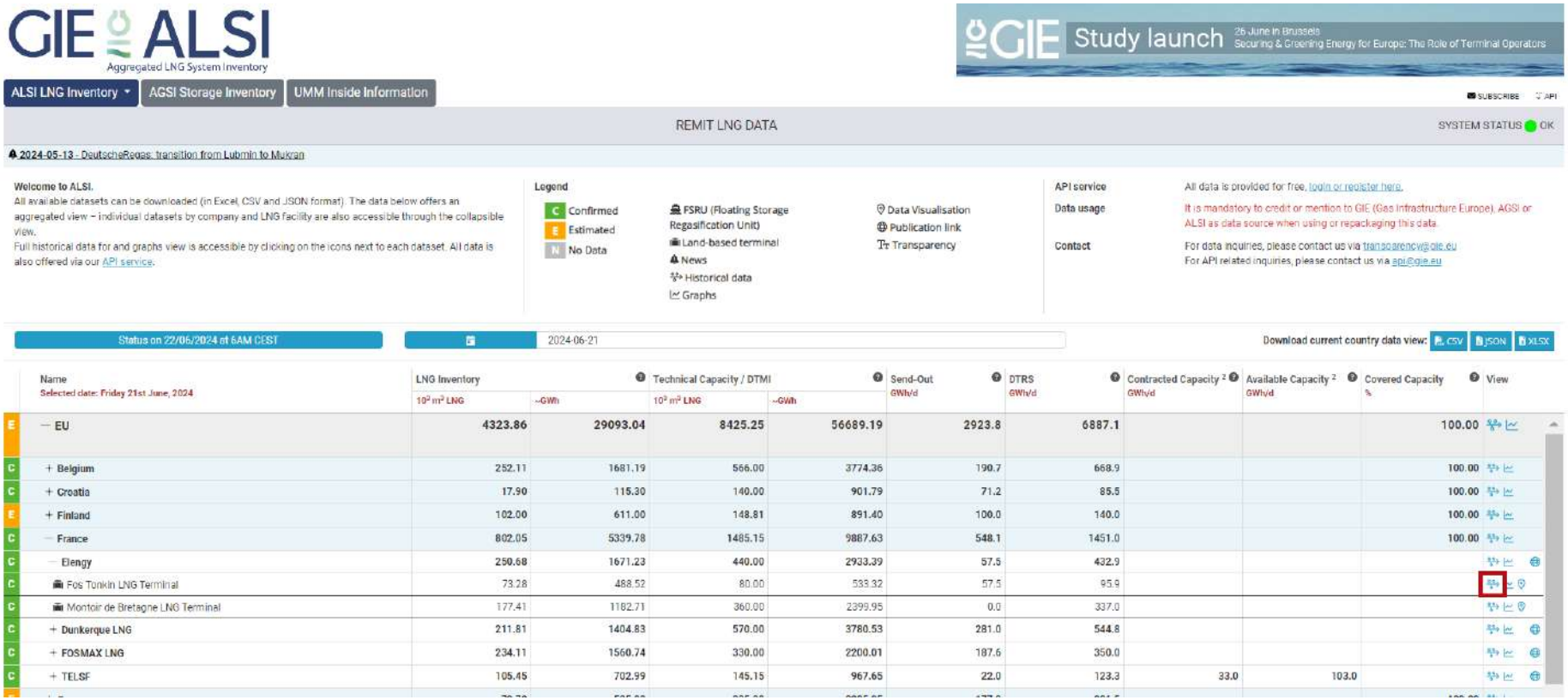
Σχήμα 4.5 Εύρεση πακέτου δεδομένων port0499 (GOV.UK)

4.1.3. ALSI: ημερήσια πληρότητα τερματικών σταθμών

Από το 2005, ο μη κερδοσκοπικός οργανισμός Gas Infrastructure Europe (GIE) αποσκοπεί στην εκπροσώπηση των διαχειριστών υποδομών φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Η ρύθμιση της ΕΕ για την ακεραιότητα και τη διαφάνεια της αγοράς ενέργειας (EU Regulation on Energy Market Integrity and Transparency, REMIT) επιβάλει την αναφορά στοιχείων χρήσης και πληρότητας εγκαταστάσεων αποθήκευσης αερίου ή επαναεριοποίησης LNG από τους διαχειριστές τους προς την Αρχή για τη Συνεργασία των Ρυθμιστών Ενέργειας της ΕΕ (Agency for the Cooperation of Energy Regulators, ACER).

Στα πλαίσια αυτά, ο οργανισμός GIE, ως εγγεγραμμένος μηχανισμός αναφοράς (Registered Reported Mechanism), συνεργάζεται στενά με την ACER ώστε να παρέχει έγκυρα στοιχεία λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων.

Για την εξαγωγή στοιχείων για τους σκοπούς της ανάλυσης εξήχθησαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων σχετικά με τους τερματικούς σταθμούς εισαγωγής LNG και **από τη βάση ALSI** (Aggregated LNG System Inventory) (https://alsi.gie.eu/). Σε αυτήν περιλαμβάνονται **στοιχεία σχετικά με την πληρότητα στο τέλος κάθε ημέρας και με τον όγκο αεριοποίησης της ημέρας αυτής** (sent-out volume) για τις περιεχόμενες εγκαταστάσεις εισαγωγής LNG. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η διάταξη εξαγωγής δεδομένων από τη βάση ALSI, όπου επιλέγεται η εμφάνιση παρελθοντικών δεδομένων (historical data) για τον επιθυμητό τερματικό σταθμό LNG και όλες οι ημερομηνίες των πέντε ετών μελέτης (2018-2022).



Σχήμα 4.6 Διάταξη εξαγωγής δεδομένων από τη βάση ALSI του GIE (https://alsi.gie.eu/)

Σημειώνεται ότι στη βάση δεν περιλαμβάνονται στοιχεία για το σύνολο των εγκαταστάσεων, αλλά μόνο για όσες ‘’κατά την άποψη της Αρχής’’, πληρούν τον σχετικό ορισμό που τίθεται στην Οδηγία 2009/73/EC (ACER).

4.1.4. Σύνθεση δεδομένων

Κατέχοντας τα παραπάνω στοιχεία, ακολούθησε η σύνθεσή τους με σκοπό την **κατάληξη σε τελικό τετραγωνικό πίνακα**, ο οποίος θα απεικονίζει το δίκτυο έχοντας ως διαστάσεις του τους κόμβους, ενώ οι μεταξύ τους εμπορικές ροές θα εκφράζονται από τις τιμές των κελιών του. Έπειτα, η σύνθεση των δεδομένων υλοποιείται με την αλληλουχία των ακόλουθων βημάτων:

- **Βήμα 1ο** Προστίθενται οι τριμηνιαίοι όγκοι διακίνησης των λιμένων, όπως αντλήθηκαν από τη βάση της Eurostat, ώστε τα στοιχεία να μετατραπούν σε ετήσιο επίπεδο
- **Βήμα 2ο** Προστίθενται οι ημερήσιες ποσότητες επαναεριοποίησης και εξαγωγής (sent out volume) που εξήχθησαν από τη βάση δεδομένων ALSI του GIE, ώστε να μετατραπούν σε ετήσιες ποσότητες. Έπειτα, για κάθε έτος και κάθε τερματικό σταθμό προστίθεται η διαφορά μεταξύ της αποθηκευμένης ποσότητας της πρώτης και της τελευταίας μέρας με τη συνολική ετήσια ποσότητα εξαγωγής. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η συνολική ετήσια εισροή στον τερματικό σταθμό. Στη συνέχεια, προστίθενται οι όγκοι εισροής των σταθμών που ανήκουν στον ίδιο λιμένα, ώστε οι όγκοι να μετατραπούν σε επίπεδο λιμένα. Παρατηρείται ότι τα δεδομένα που προκύπτουν εμφανίζουν αμελητέες αποκλίσεις σε σχέση με τα δεδομένα των διακρατικά εμπορευόμενων όγκων των εκθέσεων του GIIGNL.
- **Βήμα 3ο** Βάσει των στοιχείων των λιμένων που αντλήθηκαν με τη βοήθεια της Eurostat, και συγκεκριμένα με τις ροές εισαγωγής κάθε λιμένα (inwards flows), σε συνδυασμό με τα στοιχεία διακρατικού εμπορίου LNG των εκθέσεων του GIIGNL προκύπτουν οι απευθείας μεταξύ εξαγωγέα και εισαγωγέα εμπορικές ροές. Τονίζεται ότι από ενδεχόμενες ροές στη βάση της Eurostat με όγκο μεγαλύτερο του εμπορευόμενου, σύμφωνα με τον GIIGNL, αποκλειόταν ο περίσσιος όγκος, αφού θεωρούταν ότι αντιπροσωπεύει κάποιο από τα υπόλοιπα αγαθά της κατηγορίας (liquefied gas), όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.1.2
- **Βήμα 4ο** Οι υπολειπόμενες ροές, που φαίνονται στις εκθέσεις του GIIGNL αλλά δεν προέκυψαν ως απευθείας συνδέσεις από τα δεδομένα της Eurostat, συμπληρώνονται ακολουθώντας τις ροές εμπορίου από τις χώρες-εξαγωγείς προς άλλες συμμετέχουσες στο εμπόριο χώρες, στις οποίες θεωρείται ότι γίνονται μεταφορτώσεις, έως ότου να καταλήξουν στη χώρα εισαγωγέα, σύμφωνα με τις εκθέσεις του GIIGNL. Όταν το λιμάνι στο οποίο οι εμπορικοί όγκοι δεν είναι σαφείς μέσω των

δεδομένων της Eurostat, ο εμπορευόμενος όγκος τοποθετείται στον λιμένα εισαγωγής του κράτους ο οποίος εμφανίζεται να μη συμπληρώνει τον ετήσιο όγκο εισαγωγής του με τις μέχρι τότε συμπληρωμένες ροές, όπως αυτός προέκυψε από τη βάση δεδομένων ALSI του GIE.

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε και επαναλαμβάνοντας τα παραπάνω βήματα για κάθε ένα από τα πέντε έτη μελέτης, προκύπτει ο αντίστοιχος ετήσιος τελικός πίνακας των εμπορικών ροών, εκπεφρασμένων **σε εκατομμύρια τόνους LNG (MT)**. Μέσω του λογισμικού Microsoft Office Excel, εκτός των πέντε πινάκων που αναφέρθηκαν, δημιουργήθηκε ένας επιπλέον πίνακας για κάθε έτος, ο οποίος περιλαμβάνει και τα σημεία συμφόρησης (chokepoints) του δικτύου, όπως αναφέρθηκε κατά την περιγραφή κατασκευής του δικτύου στην υποενότητα 3.2.1. Οι πίνακες αυτοί προέκυψαν εκτρέποντας τις αντίστοιχες ροές των βασικών πινάκων για κάθε έτος, ανάλογα με τα σημεία συμφόρησης από τα οποία διέρχονται. Υπενθυμίζεται ότι τα σημεία από τα οποία διέρχεται κάθε διαδρομή προέκυψαν μέσω της εφαρμογής SeaRates, ακολουθώντας το παράδειγμα των Sun et al. (2022). Οι πέντε τελικοί πίνακες χωρίς και με τα σημεία συμφόρησης παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Α και Παράρτημα Β, αντίστοιχα.

Τονίζεται ότι η ονομασία των χωρών-εξαγωγέων στους πίνακες αυτούς συμπίπτει με τον τριψήφιο κωδικό που τους αντιστοιχεί, σύμφωνα με την προτυποποίηση της Διεθνούς Ολυμπιακής Επιτροπής (ΔΟΕ). Οι λιμένες εισαγωγής που συμμετέχουν προέκυψαν από τους σταθμούς εισαγωγής (import terminals) των εκθέσεων του GIIGNL που συμμετέχουν στο εμπόριο κατά την περίοδο έρευνας 2018-2022. Ο λιμένας στο οποίον υπάγονται προέκυψε με βάση την καταχώρηση της Eurostat. Λοιπά στοιχεία που αφορούν το έτος έναρξης λειτουργίας των τερματικών σταθμών, τη χωρητικότητά τους και τον τύπο τους προέκυψαν από την αντίστοιχη βάση δεδομένων (GIE LNG Database) του οργανισμού GIE. Ο τύπος του τερματικού σταθμού προκύπτει από την κατηγοριοποίηση του οργανισμού GIE, και διακρίνεται είτε με βάση τη χωρητικότητά του (σε small, medium ή large) είτε με βάση τη μορφή του σε πλωτή μονάδα αποθήκευσης και επαναεριοποίησης (Floating Storage and Regasification Unit, FSRU) και παράκτια εγκατάσταση βαρύτητας (Offshore Gravity Based Structure, GBS). Όλα τα παραπάνω στοιχεία για τους λιμένες εισαγωγής συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρακάτω.

Πίνακας 4.1 Στοιχεία λιμένων και terminals εισαγωγής LNG του εξεταζόμενου δικτύου

Κράτος	Λιμένας	Terminal	Τύπος	Έναρξη λειτουργίας	Χωρητικότητα (m3 LNG)
Ισπανία	Barcelona	Barcelona LNG Terminal	Large	1968	760.000
	Valencia	Sagunto LNG Terminal	Large	2006	600.000
	Cartagena	Cartagena LNG Terminal	Large	1989	587.000
	Huelva	Huelva LNG Terminal	Large	1988	619.500
	Bilbao	Bilbao LNG Terminal	Large	2003	450.000
	Ferrol	LNG Terminal Mugardos	Large	2007	300.000
Ηνωμένο Βασίλειο	London	Isle of Grain LNG Terminal	Large	2005	1.000.000
	Milford Haven	South Hook & Dragon LNG Terminals	Large	2009	775.000 & 320.000
	Tees	Teesside Gasport	Large	2007	Gas Port
Γαλλία	Dunkerque	Dunkerque LNG Terminal	Large	2016	600.000
	Nantes Saint-Nazaire	Montoir-de-BretagneLNG Terminal	Large	1980	360.000
	Marseille Fos Port	Fos Cavaou & Fos Tonkin LNG Terminals	Large	2010 & 1972	80.000 & 330.000
Ιταλία	Livorno	OLT Offshore LNG Toscana FSRU	FSRU	2013	137.500
	- *	Rovigo LNG Terminal	Large Offshore GBS	2009	250.000
	La Spezia	Panigaglia LNG Terminal	Onshore	1971	100.000
	Ravenna	Ravenna LNG Terminal	Small	2021	20.000
	Oristano	HIGAS LNG Terminal	Small	2021	9.000
Ολλανδία	Rotterdam	Gate LNG Terminal	Large	2011	540.000
	Delfzijl	EemsEnergyTerminal	FSRU	2022	170.000
Πορτογαλία	Sines	Sines LNG Terminal	Large	2004	390.000
Βέλγιο	Zeebrugge	Zeebrugge LNG Terminal	Large	1987	386.000
Πολωνία	Swinoujscie	Swinoujscie LNG Terminal	Large	2016	320.000
Ελλάδα	Megara	Revithoussa LNG Terminal	Large	2018	225.000
Λιθουανία	Klaipeda	FSRU Independence	FSRU	2014	170.000
Σουηδία	Nynashamn	Nynashamn LNG Terminal	Small	2011	20.000
	Lysekil	Lysekil LNG Terminal	Small	2014	30.000
Μάλτα	Marsaxlokk	Malta Delimara LNG Terminal	FSU (Onshore Regas.)	2017	125.00
Φινλανδία	Tornio	Tornio Magna LNG Terminal	Small	2018	50.000
	Pori	Pori LNG Terminal	Small	2016	28.500
	Hamina Kotka	Hamina LNG Terminal	Small	2022	30.000
Νορβηγία	Mosjoen	Mosjoen LNG Terminal	Small	2007	6.500
	Frederikstad	Frederikstad LNG Terminal	Small	2011	5.900
Κροατία	Bakar	Krk LNG Terminal	FSRU	2021	140.000
* Το terminal Rovigo LNG Terminal στην βάση της Eurostat δεν εντάσσεται σε κάποιον λιμένα, αλλά στην κατηγορία ''ofshore installations''					

4.2. Ανάπτυξη κώδικα

Προκειμένου να επιτελεστούν οι απαραίτητες διαδικασίες της ανάλυσης του δικτύου, αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας **προγραμματιστικός κώδικας** μέσω του λογισμικού MATLAB της Mathworks. Ο κώδικας διεκπεραιώνει τις διεργασίες της εισαγωγής των δεδομένων, του υπολογισμού των επιλεγμένων δεικτών, του διαχωρισμού του δικτύου σε κοινότητες μέσω της εκτέλεσης του επιλεγμένου αλγορίθμου, της προσομοίωσης αστοχιών στο δίκτυο, της παρουσίασης της πορείας των τιμών των δεικτών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτής και της δημιουργίας των αντίστοιχων διαγραμμάτων. Είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός ότι ο κώδικας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάλυση και την προσομοίωση οποιουδήποτε δικτύου, πέραν των εξεταζόμενων στα πλαίσια αυτής, και συνεπώς αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο με ευρεία χρήση.

Ο κώδικας περιλαμβάνει ένα σύνολο 26 συναρτήσεων. Οι εσωτερικές διεργασίες των βασικότερων από αυτές περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- **dataYEAR.m & dataYEARc.m** Οι συναρτήσεις αυτές εισάγουν τα δεδομένα του μητρώου του δικτύου κάθε έτους. Οι πρώτες εισάγουν το

μητρώο του ετήσιου δικτύου, με κόμβους που περιλαμβάνουν μόνο τα λιμάνια εισαγωγής και τις χώρες-εξαγωγείς, ενώ οι τελευταίες εισάγουν το μητρώο του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου των σημείων συμφόρησης

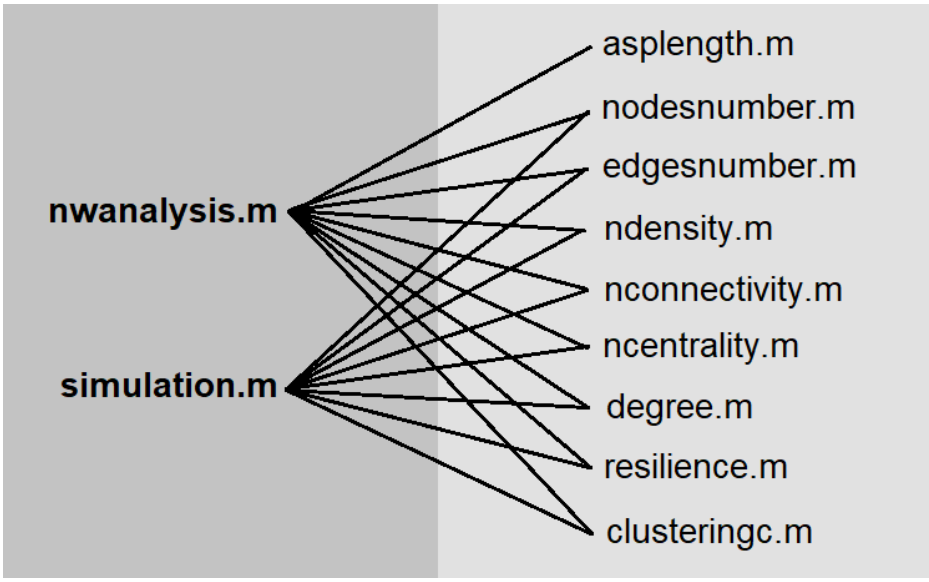
- **nodesnumber.m** Η εν λόγω συνάρτηση, παρότι εκτελεί φαινομενικά απλές διαδικασίες, επιτελεί διττό σκοπό: αρχικά εντοπίζει το LCC (Largest Connected Component) του δικτύου, η ακριβής έννοια του οποίου περιγράφεται στην υποενότητα 3.3.2, και αποκλείει από το δίκτυο τα υπόλοιπα –ασύνδετα- υποδίκτυα. Έπειτα, η συνάρτηση προσδιορίζει το πλήθος των συμμετεχόντων στο LCC κόμβων
- **degree.m** Μέσω της συνάρτησης προσδιορίζονται οι εσωτερικοί και εξωτερικοί, σταθμισμένοι και μη, βαθμοί συνδεσιμότητας των κόμβων του δικτύου
- **nwanalysis.m** Η συνάρτηση nwanalysis.m περιλαμβάνει 9 απλούστερες συναρτήσεις και υπολογίζει το σύνολο των δεικτών της Θεωρίας Δικτύου που έχουν επιλεχθεί. Σημειώνεται ότι το σύνολο των δεικτών υπολογίζεται με βάση το δίκτυο που περιλαμβάνει μόνο λιμένες εισαγωγής και χώρες-εξαγωγείς, αφού η συμπερίληψη των σημείων συμφόρησης ως κόμβους θα οδηγούσε σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Στα πλαίσια της συνάρτησης αυτής, τα ετήσια δίκτυα που περιλαμβάνουν τα σημεία αυτά χρησιμοποιούνται μόνο για τον υπολογισμό των βαθμών συνδεσιμότητας, μέσω της εφαρμογής της συνάρτησης degree.m που περιγράφηκε παραπάνω
- **communities.m** Η συνάρτηση εφαρμόζει τον επιλεγμένο αλγόριθμο για το διαχωρισμό των κοινοτήτων και υπολογίζει την τιμή της σπονδυλότητας του δικτύου. Όπως είναι λογικό, για την εκτέλεση της συνάρτησης χρησιμοποιείται το ετήσιο δίκτυο στο οποίο δεν περιέχονται τα σημεία συμφόρησης των θαλασσίων διαδρομών, αφού δεν συμμετέχουν σε εμπορικές κοινότητες
- **simulation.m** Η προσομοίωση γίνεται εφικτή μέσω της συγκεκριμένης συνάρτησης. Επιλέγεται η αλληλουχία των κόμβων που αστοχούν στις σωρευτικές προσομοιώσεις, με βάση τα κριτήρια που έχουν τεθεί, και υπολογίζονται οι επιλεγμένοι δείκτες για το εναπομείναν δίκτυο. Το δεύτερο σκέλος επαναλαμβάνεται για τις μεμονωμένες αστοχίες. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση αστοχιών εκτελείται με βάση το πιο πρόσφατο υφιστάμενο δίκτυο που περιλαμβάνεται στην ανάλυση, δηλαδή αυτό του δικτύου ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG για το 2023, ενώ στο δίκτυο περιλαμβάνονται τα σημεία συμφόρησης, αφού επιχειρείται να αποτυπωθεί και η δική τους σημασία στην ασφάλεια του εφοδιασμού.

Το σύνολο των συναρτήσεων του κώδικα που αναπτύχθηκε με τα βασικά χαρακτηριστικά τους, και συγκεκριμένα τα εισαγόμενα και εξαγόμενα δεδομένα (inputs και outputs) κάθε μίας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.2 Συναρτήσεις κώδικα με τα inputs και τα outputs κάθε μίας

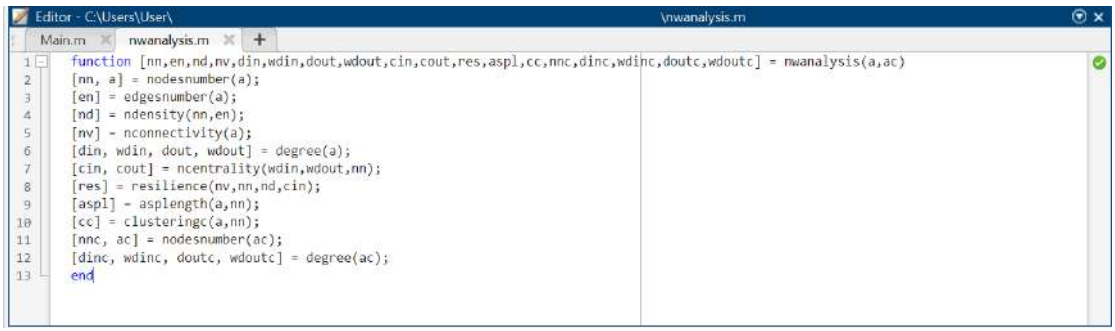
Συνάρτηση	inputs	outputs
dataYEAR.m	-	Μητρώο ετήσιου δικτύου χωρίς chokepoints
dataYEARc.m	-	Μητρώο ετήσιου δικτύου με chokepoints
nodesnumber.m	Μητρώο δικτύου (με chokepoints ή χωρίς)	Αριθμός κόμβων Νέος πίνακας δικτύου (LCC)
edgesnumber.m	Μητρώο δικτύου	Αριθμός συνδέσμων
ndensity.m	Αριθμός κόμβων Αριθμός συνδέσμων	Πυκνότητα δικτύου
nconnectivity.m	Μητρώο δικτύου	Συνδεσιμότητα
degree.m	Μητρώο δικτύου (με chokepoints ή χωρίς)	Εσωτερικός βαθμός συνδεσιμότητας Εξωτερικός βαθμός συνδεσιμότητας Εσωτερικός σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας Εξωτερικός σταθμισμένος βαθμός συνδεσιμότητας
ncentrality.m	Αριθμός κόμβων Εσωτερικός σταθμισμένος βαθμός κεντρικότητα Εξωτερικός σταθμισμένος βαθμός κεντρικότητας	Εσωτερικός βαθμός κεντρικότητας Εξωτερικός βαθμός κεντρικότητας
resilience.m	Αριθμός κόμβων Συνδεσιμότητα Πυκνότητα δικτύου Εσωτερικός βαθμός κεντρικότητας	Ανθεκτικότητα δικτύου
asplength.m	Μητρώο δικτύου Αριθμός κόμβων	Μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής
clusteringc.m	Μητρώο δικτύου Αριθμός κόμβων	Συντελεστής ομαδοποίησης
nwanalysis.m	Μητρώο δικτύου (με chokepoints και χωρίς)	Όλα τα παραπάνω
communities.m	Μητρώο δικτύου (χωρίς chokepoints)	Σπονδυλότητα Κοινότητα κάθε κόμβου Πλήθος κόμβων ανά κοινότητα
simulation.m	Μητρώο δικτύου (με chokepoints)	LCC/Ανθεκτικότητα/Συντελεστής ομαδοποίησης (Στοχευμένες αστοχίες) LCC/Ανθεκτικότητα/Συντελεστής ομαδοποίησης (Τυχαίες αστοχίες) LCC/Ανθεκτικότητα/Συντελεστής ομαδοποίησης/Επίδοση Μεμονωμένες αστοχίες)
graphplot.m	Γραφική απεικόνιση δικτύου	Πίνακας δικτύου Ονόματα κόμβων
diagplot2.mm	Διάγραμμα	Αλληλουχία κόμβων Εξέλιξη δείκτη (τυχαίες αστοχίες) Εξέλιξη δείκτη (στοχευμένες αστοχίες) Λεζάντες
diagplot22.m	Διάγραμμα	Έτη Δίκτες προς απεικόνιση Λεζάντες
indsimplot.m	Διάγραμμα	Εξέλιξη δείκτη Έτη Λεζάντες

Το Σχήμα 4.7 που ακολουθεί επιχειρεί να παρουσιάσει σχηματικά την αξιοποίηση πιο απλών συναρτήσεων (δεξιά) για την οικοδόμηση συναρτήσεων που επιτελούν πιο σύνθετες διαδικασίες (αριστερά). Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η ανάπτυξη του κώδικα αλλά και η κατανόησή του από πιθανούς μετέπειτα χρήστες, μειώνεται η πιθανότητα σφαλμάτων και καθίσταται δυνατή η διόρθωση ή η περαιτέρω βελτίωσή του σε μελλοντική φάση.



Σχήμα 4.7 Απεικόνιση χρήσης απλών συναρτήσεων για την σύνθεση περίπλοκων συναρτήσεων

Ενδεικτικά, στην εικόνα του Σχήματος 4.8 παρουσιάζεται, ως παράδειγμα, η σύνθεση της συνάρτησης nwanalysis.m, η οποία περικλείει όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται για την ανάλυση υφιστάμενου δικτύου, πλην του διαχωρισμού των εμπορικών κοινοτήτων μέσω της έννοιας της σπονδυλότητας, και αποτελείται από 9 θεμελιώδεις απλούστερες συναρτήσεις.



Σχήμα 4.8 Ενδεικτική παράθεση της σύνθεσης της συνάρτησης nwanalysis.m σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB (Mathworks)

4.3. Αποτελέσματα

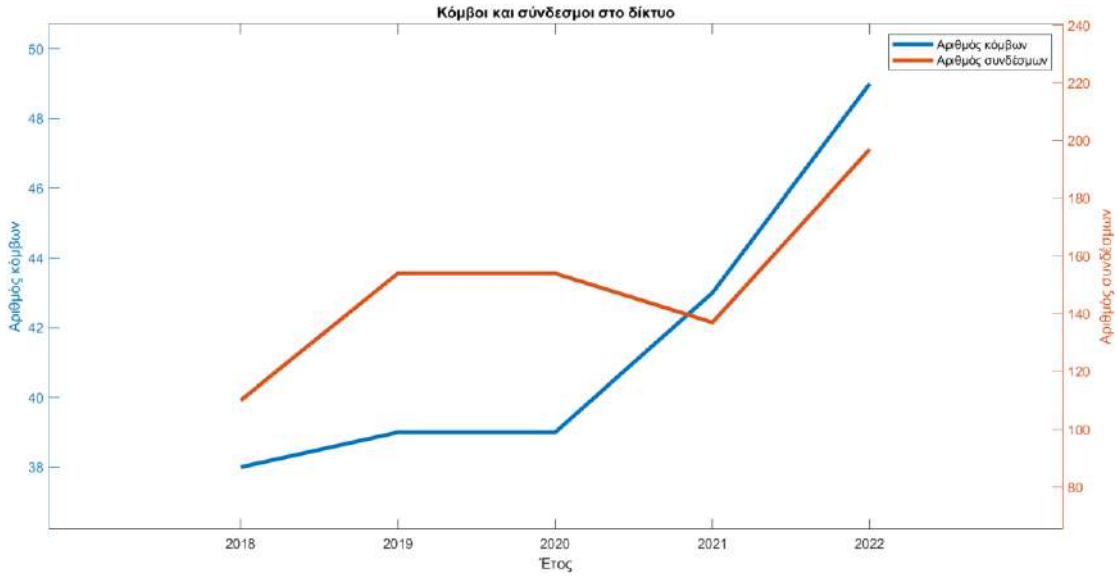
Από την ανάλυση προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Οι τιμές των επιλεγμένων δεικτών παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί. Έπειτα, επιχειρείται η ανάλυση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, η πιθανή ερμηνεία τους και συζητείται κατά πόσο επιβεβαιώνονται τα ευρήματα προηγούμενων μελετών.

Πίνακας 4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δεικτών ανάλυσης

Έτος	2018	2019	2020	2021	2022
Αριθμός κόμβων	38	39	39	43	49
Αριθμός συνδέσμων	110	154	154	137	197
Πυκνότητα (Δ)	0,08	0,10	0,10	0,08	0,08
Συνδεσιμότητα	280,00	456,00	658,00	261,00	1270,00
Εσωτερικός βαθμός κεντρικότητας (Cin)	69,27	78,10	93,05	81,64	137,77
Εξωτερικός βαθμός κεντρικότητας (Cout)	154,69	168,44	194,13	170,89	561,33
Ανθεκτικότητα (R)	1963,41	2191,29	2653,95	1812,15	5392,72
Μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής (L)	0,16	0,24	0,33	0,11	0,23
Συντελεστής ομαδοποίησης (C)	0,000902	0,000495	0,001348	0,000654	0,000857
Σπονδυλότητα (Q)	0,67	0,52	0,43	0,52	0,04
Αριθμός εμπορικών κοινοτήτων	11	15	15	12	16

4.3.1. Εξέλιξη χωρικής δομής δικτύου

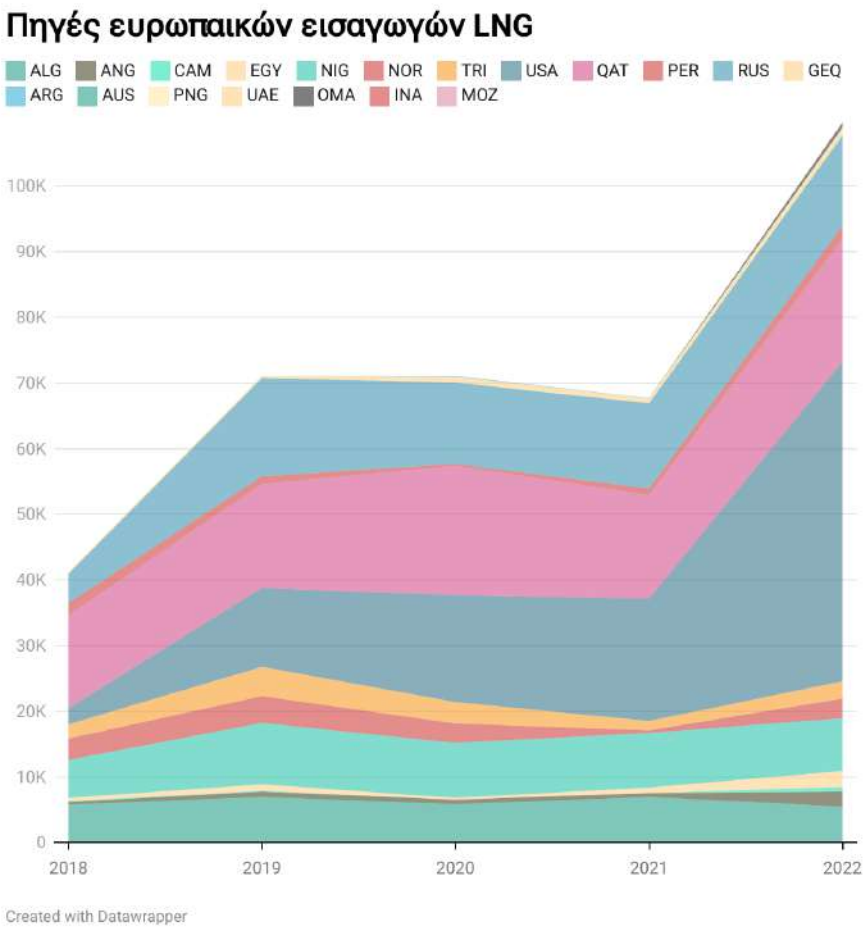
Οι εισαγόμενοι στην Ευρώπη όγκων LNG αυξήθηκαν σημαντικά κατά την περίοδο 2018-2020 (Mei et al. (2024). Ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, παρόλα αυτά, δεν φαίνεται να εμφανίζει τόσο σημαντική αύξηση κατά τα έτη αυτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Αντίθετα, **οι κόμβοι αυξάνονται απότομα** κατά τα έτη 2020-2022 που ακολουθούν, σημειώνοντας την περίοδο αυτή αύξηση 25,64%. Ενδεχομένως αυτό να οφείλεται στην ετεροχρονισμένη αντίδραση της αγοράς, η οποία βλέποντας τη ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης, έσπευσε να στραφεί σε νέους εμπορικούς εταίρους για την κάλυψη της επερχόμενης ζήτησης. Θα πρέπει, στο σημείο αυτό, να τονιστεί η μειωμένη αντιπροσωπευτικότητα του μεγέθους του δικτύου, λόγω της συμπερίληψης σε αυτό χωρών από την πλευρά των εισαγωγέων και λιμένων από αυτή των εισαγωγέων, με αποτέλεσμα να μην αποτυπώνεται πιθανή αύξηση του αριθμού των λιμένων εξαγωγής από χώρες-εξαγωγείς που ήδη συμμετείχαν στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο, θεωρείται σημαντικό να αναφερθεί ξεχωριστά η αύξηση των λιμένων εισαγωγής και των χωρών-εξαγωγέων από 26 σε 32 και από 12 σε 17, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9 Χρονική εξέλιξη αριθμού κόμβων και συνδέσμων στο δίκτυο

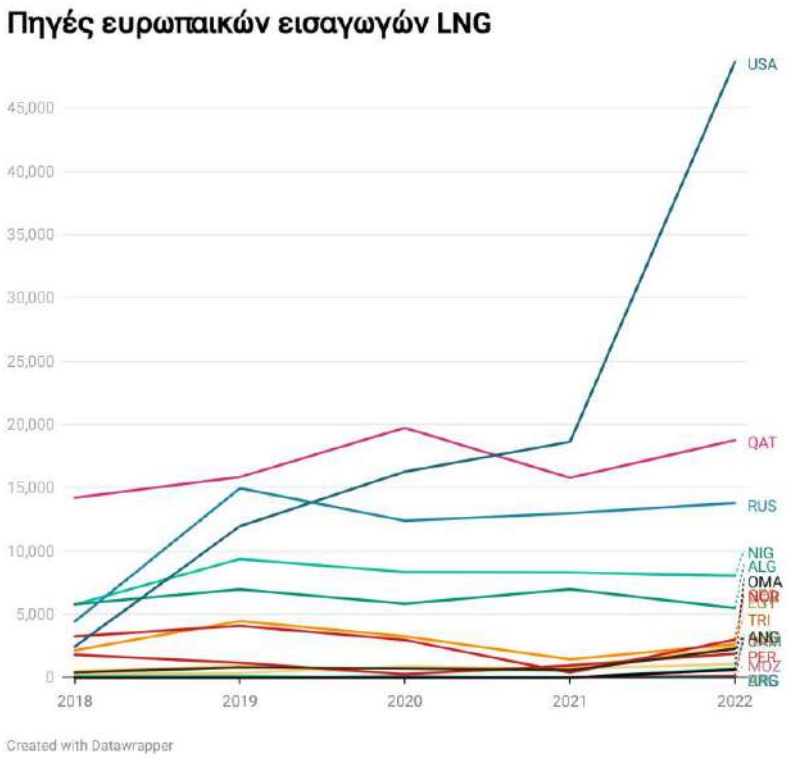
Παράλληλα, στο ίδιο σχήμα (Σχήμα 4.9) φαίνεται η **σημαντική αύξηση**, της τάξης του 79,09%, του **αριθμού των συνδέσμων** στο δίκτυο, δηλαδή των εμπορικών σχέσεων. Η αύξηση αυτή, όμως, τονίζεται ότι πραγματοποιήθηκε εν μέσω έντονων διαταράξεων, οι οποίες αποδεικνύουν και την ευαισθησία του εφοδιασμού, λόγω της στήριξής του στο δια θαλάσσης εμπόριο και υποδηλώνουν ότι το διεθνές εμπόριο LNG βρίσκεται ακόμη υπό διαμόρφωση, ενώ δε θα μπορούσε να παραβλεφθεί και το γεγονός ότι η σταθεροποίηση και κάμψη του αριθμού των συνδέσμων συμπίπτει με τα έτη 2020-2021, εν μέσω των οποίων κορυφώνεται η πανδημία του COVID-19.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, **ο εμπορικός όγκος** μεταβλήθηκε από 41.188 σε 109.724 MT, σημειώνοντας **αύξηση της τάξης του 166,40%**. Στο ίδιο διάγραμμα (Σχήμα 4.10) απεικονίζεται και η εξέλιξη των πηγών των εισαγωγών αυτών.



Σχήμα 4.10 Πηγές ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG (2018-2022) (αθροιστικά)

Όπως είναι εμφανές, η σημαντική αυτή **αύξηση της εισαγόμενης ποσότητας** LNG υποστηρίχθηκε σημαντικά **από τις ΗΠΑ**, οι οποίες αύξησαν τις εξαγωγές LNG προς την Ευρώπη από 2.462 σε 48.648 MT, δηλαδή ακολουθώντας μία αύξηση 1.875,95%. Με αυτόν τον τρόπο, το μερίδιο της αγοράς εξαγωγών των ΗΠΑ εκτοξεύτηκε από 5,98% το 2018, σε 44,34% το 2022. Μάλιστα, ραγδαία ήταν η αύξηση του μεριδίου της αγοράς των ΗΠΑ από το 2021 και έπειτα, γεγονός που υποδηλώνει τη σημασία που διαδραμάτισε η ρωσο-ουκρανική σύρραξη και οι ευρωπαϊκές κυρώσεις, οι οποίες έστρεψαν τα κράτη της ηπείρου σε αναζήτηση εναλλακτικών πηγών εισαγωγής φυσικού αερίου, όπως συμπεραίνουν και οι Xiao et al. (2024). Έτσι, οι ΗΠΑ, οι οποίες κατά τη δεκαετία του 2010 μετατράπηκαν σε βασικό παραγωγό φυσικού αερίου παγκοσμίως μέσω της καινοτομίας της Shale Gas Revolution, εδραιώθηκαν ως κυρίαρχος ενεργειακός παράγοντας όσον αφορά το φυσικό αέριο στην Ευρώπη. Η συγκριτική συνεισφορά των εξαγωγέων, καθώς και η δεσπόζουσα θέση των ΗΠΑ στην αγορά αποτυπώνονται εμφανέστερα στο διάγραμμα του Σχήματος 4.11 παρακάτω.



Σχήμα 4.11 Πηγές ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG (2018-2022) (μεμονωμένα)

Κρίσιμα συμπεράσματα μπορούν, επίσης, να εξαχθούν από τη διερεύνηση των σταθμισμένων βαθμών συνδεσιμότητας των κόμβων. Στον Πίνακα 4.4 που ακολουθεί παρατίθενται οι 15 μέγιστοι κόμβοι όσον αφορά τον μέγιστο εκ του εσωτερικού και του εξωτερικού σταθμισμένου βαθμού συνδεσιμότητας σε φθίνουσα κατάταξη για τα έτη 2018, 2020, και 2022. Η κατάταξη αυτή συμβάλει στην προσπάθεια κατανόησης της εξέλιξης των **σημαντικότερων κόμβων του δικτύου** και του **γεωγραφικού κέντρου βάρους** διεθνούς εμπορίου LNG που διακινείται προς την Ευρώπη.

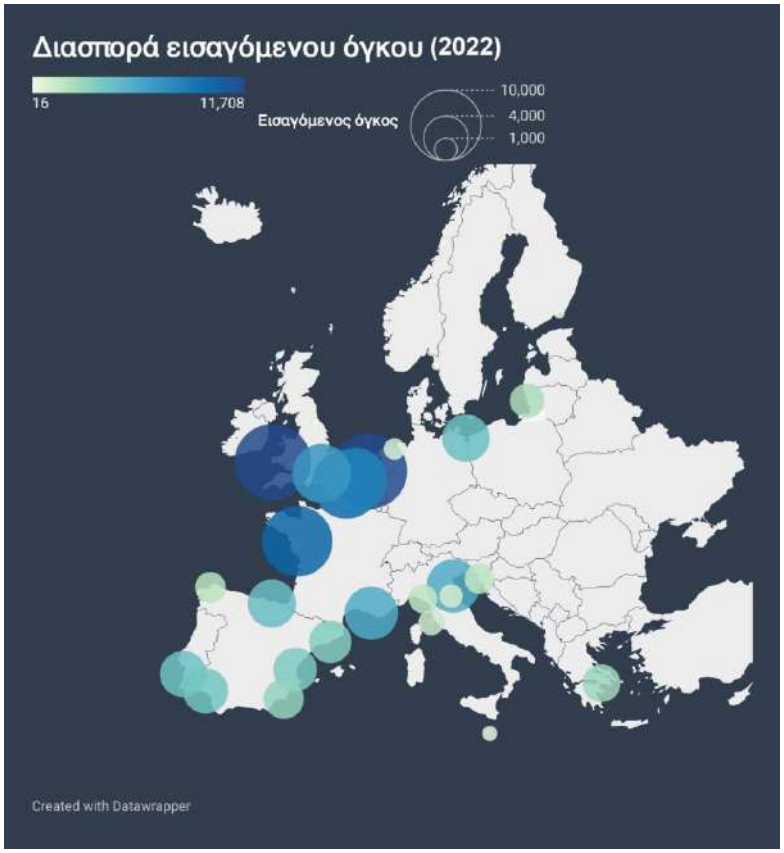
Πίνακας 4.4 Φθίνουσα κατάταξη των 15 πρώτων κόμβων ως προς τον μέγιστο εκ του εσωτερικού και του εξωτερικού σταθμισμένου βαθμού συνδεσιμότητας τους (2018, 2020 και 2022)

Βαθμοί συνδεσιμότητας κόμβων δικτύου διαχρονικά						
	2018		2020		2022	
1	14.206	Qatar	20.196	**Gibraltar**	48.648	USA
2	14.206	**Suez**	19.726	Qatar	30.760	**Gibraltar**
3	14.206	**Hormuz**	19.726	**Suez**	19.713	**Suez**
4	12.065	**Gibraltar**	19.726	**Hormuz**	18.820	**Hormuz**
5	5.805	Algeria	16.269	USA	18.757	Qatar
6	5.780	Nigeria	12.400	Russia	13.799	Russia
7	5.337	Marseille Fos Port	8.350	Nigeria	13.591	Zeebrugge
8	4.580	Rovigo LNG	7.745	Milford Heaven	12.028	Milford Heaven
9	4.456	Russia	5.897	Rotterdam	11.973	Rotterdam
10	4.372	Nantes Saint-Nazaire	5.875	Zeebrugge	10.690	Nantes Saint-Nazaire
11	3.895	Barcelona	5.836	Algeria	9.637	Dunkerque
12	3.595	Rotterdam	5.829	Nantes Saint-Nazaire	8.044	Nigeria
13	3.566	Milford Heaven	5.275	London	6.891	London
14	3.435	Huelva	5.230	Rovigo LNG	5.612	Rovigo LNG
15	3.263	Norway	4.875	Marseille Fos Port	5.569	Marseille Fos Port

Από τον πίνακα αυτό προκύπτουν προφανή και ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, μπορεί να παρατηρηθεί η σταθερή πτώση της σημασίας του Κατάρ για τον εφοδιασμό της Ευρώπης με LNG. Την ίδια πορεία ακολουθεί η Νιγηρία και, σε μεγαλύτερο βαθμό, η Αλγερία. Αντίθετα, οι ΗΠΑ, παρότι το 2018 δεν βρίσκονταν στην κατάταξη των 15 πρώτων σε σημασία κόμβων του δικτύου, κατέληξαν να αποτελούν τον σημαντικότερο κόμβο για τον εφοδιασμό της Ευρώπης το 2022.

Η παραπάνω ριζική μεταβολή επιφέρει την ανάλογη μεταβολή και στη λοιπή δομή του δικτύου. Λιμένες με ευκολότερη και οικονομικότερη **πρόσβαση από τις ΗΠΑ** παρουσιάζουν, άλλες σταδιακή, και άλλες πιο ραγδαία αύξηση της σημασίας τους στο δίκτυο. Ενδεικτικά είναι τα παραδείγματα των λιμένων των Zeebrugge, Milford Haven και Rotterdam που βρίσκονται στην Ατλαντική ακτή της Ευρώπης. Αντίθετα, λιμένες όπως αυτός της Marseille, της Barcelona, της Huelva και ο τερματικός σταθμός Rovigo LNG, οι οποίοι κατέχουν προνομιακή θέση ως προς τις διαδρομές από το Κατάρ, φαίνεται να χάνουν την ιδιαίτερη σημασία τους. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τη γεωγραφική διασπορά του όγκου εισαγωγής LNG των ευρωπαϊκών λιμένων του δικτύου, η οποία απεικονίζεται για τα έτη 2018 και 2022 στους χάρτες των Σχημάτων 4.12 και 4.13, αντίστοιχα.

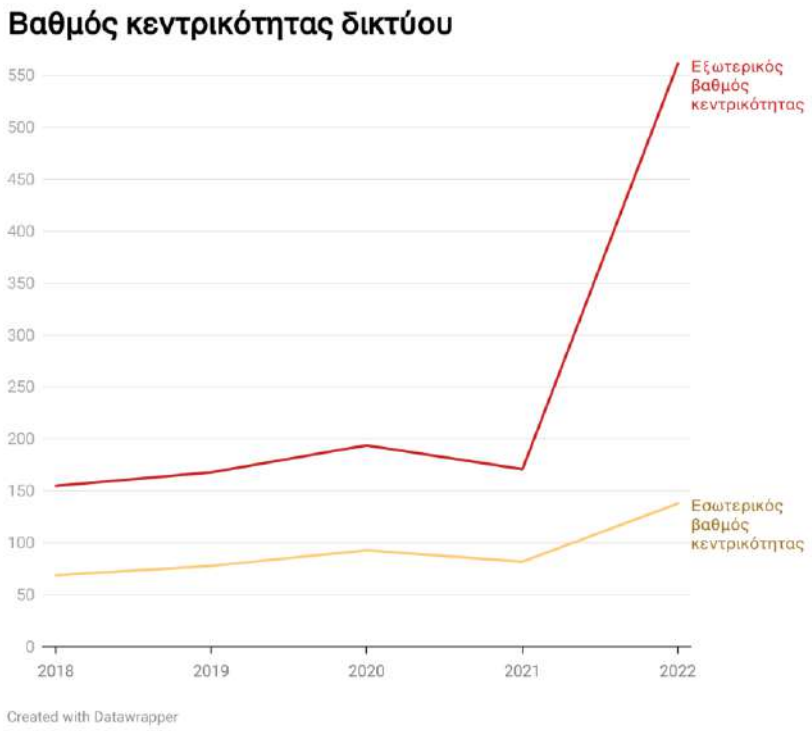
Σχήμα 4.12 Διασπορά εισαγόμενου όγκου LNG στους ευρωπαϊκούς λιμένες το 2018



Σχήμα 4.13 Διασπορά εισαγόμενου όγκου LNG στους ευρωπαϊκούς λιμένες το 2022

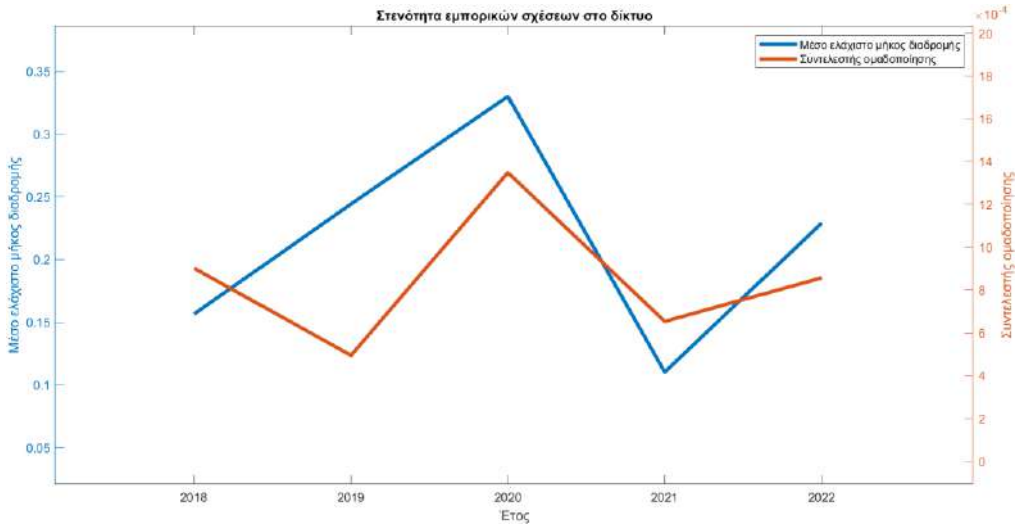
Με τη βοήθεια των παραπάνω εικόνων επιβεβαιώνεται με έναν ακόμη τρόπο η **μεταστροφή της ευρωπαϊκής αγοράς σε εναλλακτικούς εξαγωγείς** από τη Δύση και η μεταφορά του κέντρου βάρους του εφοδιασμού στις ευρωπαϊκές ακτές του Ατλαντικού. Τέλος, αξιοσημείωτο κρίνεται το γεγονός ότι τρία από τα πέντε συμμετέχοντα στο δίκτυο σημεία συμφόρησης βρίσκονται σταθερά εντός των τεσσάρων σημαντικότερων κόμβων της παραπάνω κατάταξης (Πίνακας 4.4), με ότι αυτό μπορεί να συνεπάγεται για την ασφάλεια του εφοδιασμού της Ευρώπης, η οποία θα διερευνηθεί περαιτέρω μέσω της προσομοίωσης των αστοχιών. Μάλιστα, η συγκριτική εξέλιξη της σημασίας των σημείων αυτών ακολουθεί την ευρύτερη μεταβολή του δικτύου. Ως αποτέλεσμα, **το Στενό του Γιβραλτάρ αυξάνει τη σημασία του** σε σχέση με τη Διώρυγα του Σουέζ και τα Στενά του Ορμούζ, καταλήγοντας σημαντικότερο από αυτά το 2022, όπως διαπίστωσαν άλλωστε και οι Xiao et al. (2024) για το σύνολο του διεθνούς εμπορίου LNG.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.14 παρατίθεται η χρονική εξέλιξη του εσωτερικού και του εξωτερικού βαθμού κεντρικότητας. Είναι εμφανής η ανοδική τάση και των δύο δεικτών, με τον εξωτερικό βαθμό κεντρικότητας να διατηρεί μόνιμα υψηλότερες τιμές έναντι του εσωτερικού, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη **εντονότερων μονοπωλιακών χαρακτηριστικών στην αγορά εξαγωγών** σε σχέση με αυτή των εισαγωγών. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται απόλυτα από τη γεωγραφικά περιορισμένη συγκέντρωση των αποθεμάτων φυσικού αερίου που αντιτίθεται στη διεσπαρμένη και αποκεντρωμένη ζήτηση για κατανάλωση. Παράλληλα, ενώ η αύξηση των ευρωπαϊκών κρατών που στράφηκαν στη LNG, αλλά και η συνολική αύξηση στην ευρωπαϊκή ζήτηση LNG οδηγούν σε άνοδο του δείκτη εσωτερικής κεντρικότητας, ο εξωτερικός βαθμός κεντρικότητας εκτοξεύεται το 2022 στο 362,83% της τιμής που κατείχε το 2018. Αυτό υποδηλώνει την **υψηλή εξάρτηση** των ευρωπαϊκών κρατών από περιορισμένο αριθμό εξαγωγέων, ενώ ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι, ενώ οι τρεις μεγαλύτεροι εξαγωγείς του δικτύου το 2018 (Κατάρ, Αλγερία και Νιγηρία) κατείχαν περίπου το 62% του μεριδίου της αγοράς εξαγωγών, ο αντίστοιχος δείκτης για το 2022 ήταν ίσος με 74% (ΗΠΑ, Κατάρ και Ρωσία). Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με την γενικότερη εικόνα του παγκόσμιου εμπορίου LNG, όσον αφορά τα μονοπωλιακά του χαρακτηριστικά, όπως αποτυπώθηκε και στην έρευνα των Geng et al. (2014), όπου επίσης διαπιστώθηκε η υπεροχή του εξωτερικού έναντι του εσωτερικού βαθμού κεντρικότητας, καθώς και η ραγδαία ανοδική τάση του πρώτου σε σχέση με αυτή του δεύτερου.



Σχήμα 4.14 Χρονική εξέλιξη εξωτερικού και εσωτερικού βαθμού κεντρικότητας δικτύου

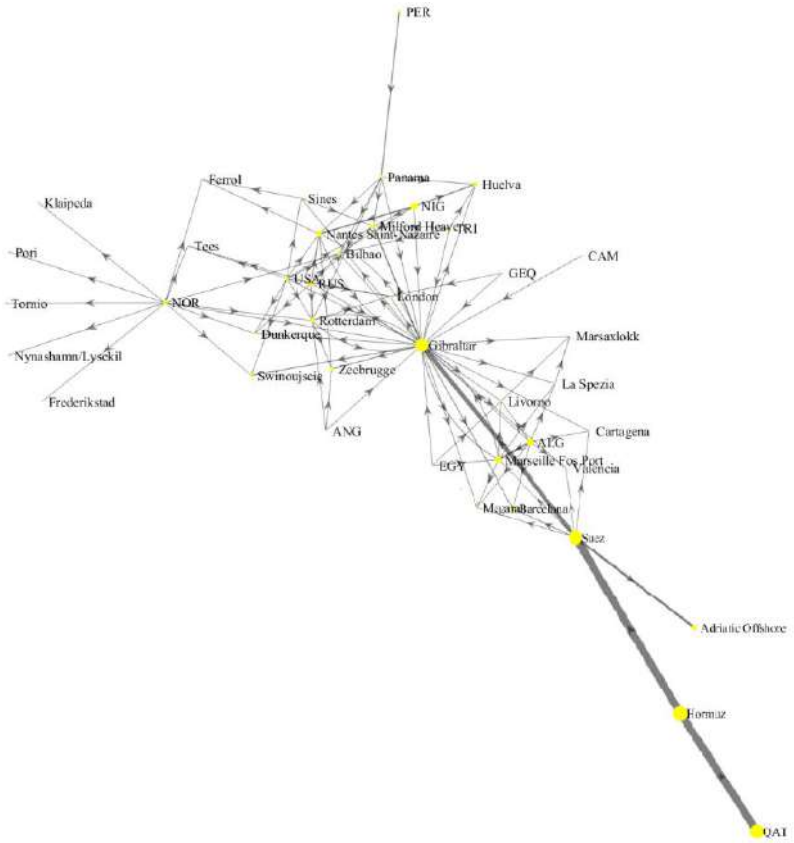
Ιδιαίτερη σημασία ενέχει η διερεύνηση της στενότητας των εμπορικών σχέσεων που συμπεριλαμβάνονται στο δίκτυο, παρατηρώντας την εξέλιξη του μέσου ελάχιστου μήκους διαδρομής και του συντελεστή ομαδοποίησης, η οποία φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.15.



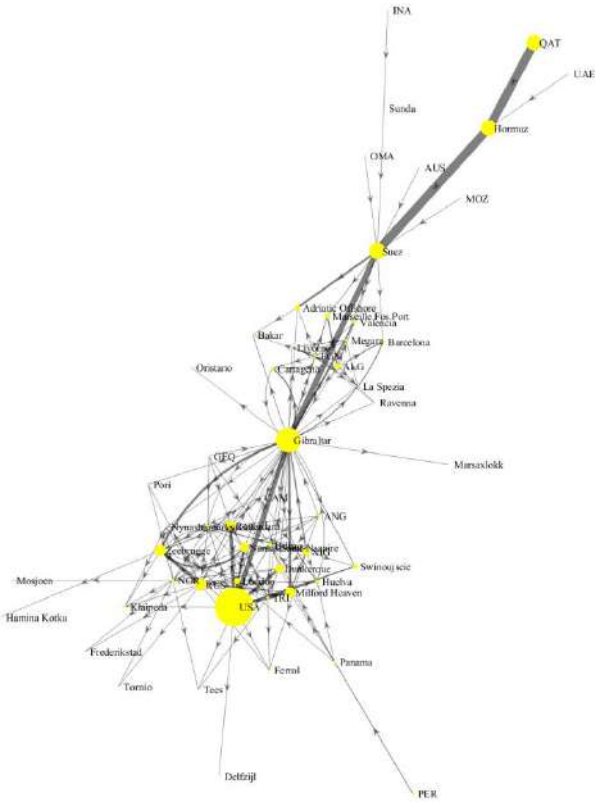
Σχήμα 4.15 Χρονική εξέλιξη του μέσου ελάχιστου μήκους διαδρομής και του συντελεστή ομαδοποίησης του δικτύου

Το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής παρουσιάζει αύξηση, αλλά εξακολουθεί να λαμβάνει εξαιρετικά χαμηλή τιμή. Τιμές του δείκτη τόσο χαμηλές υποδηλώνουν

ότι κάθε κόμβος του δικτύου συνδέεται με περιορισμένο αριθμό κόμβων, και μάλιστα τις περισσότερες φορές η σύνδεση μεταξύ δύο εμπορικών εταίρων γίνεται απευθείας, και όχι μέσω διαδοχικών μεταφορτώσεων. Τόσο χαμηλές τιμές του δείκτη σπανίζουν στη σχετική βιβλιογραφία, όμως αποτελούν εύλογο εύρημα εφόσον το δίκτυο της παρούσας ανάλυσης είναι κατευθυνόμενο. Παράλληλα, ο συντελεστής ομαδοποίησης υπέστη ελαφρά μείωση κατά την περίοδο μελέτης, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των Mei et al. (2024), ενώ το εύρος των τιμών που καταλαμβάνει οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, οι κόμβοι με τους οποίους συναλλάσσεται ένας μέσος κόμβος του δικτύου αναπτύσσουν μεταξύ τους μόλις το 8% με 9% του μέγιστου αριθμού εμπορικών σχέσεων που θα μπορούσαν να αναπτύξουν. Τόσο το μέσο ελάχιστο μήκος διαδρομής, όσο και ο συντελεστής ομαδοποίησης παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις και δεν αποκτούν εμφανή ανοδική ή καθοδική τάση. Βέβαια, η ελαφρά αύξηση του μέσου ελάχιστου μήκους διαδρομής, σε συνδυασμό με τη μικρή μείωση του συντελεστή ομαδοποίησης αποτελούν χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός μεγεθυνόμενου δικτύου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η απότομη **αύξηση των κόμβων** του δικτύου καθιστά αναπόφευκτη τη **χαλάρωση των εμπορικών δεσμών** του δικτύου, με τις **μεταφορτώσεις** να περιλαμβάνουν όλο και σημαντικότερο μερίδιο της συνολικής διακίνησης και με τον **διαχωρισμό μεταξύ κομβικών και περιφερειακών μελών** του δικτύου να γίνεται πιο ευκρινής. Η ταυτόχρονη αυτή διεύρυνση και ‘’χαλάρωση’’ του δικτύου φαίνεται στις γραφικές απεικονίσεις των δικτύων του 2018 και του 2022 μέσω των Σχημάτων 4.16 και 4.17, αντίστοιχα, οι οποίες δημιουργήθηκαν μέσω του κώδικα που αναπτύχθηκε σε MATLAB, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 4.2.

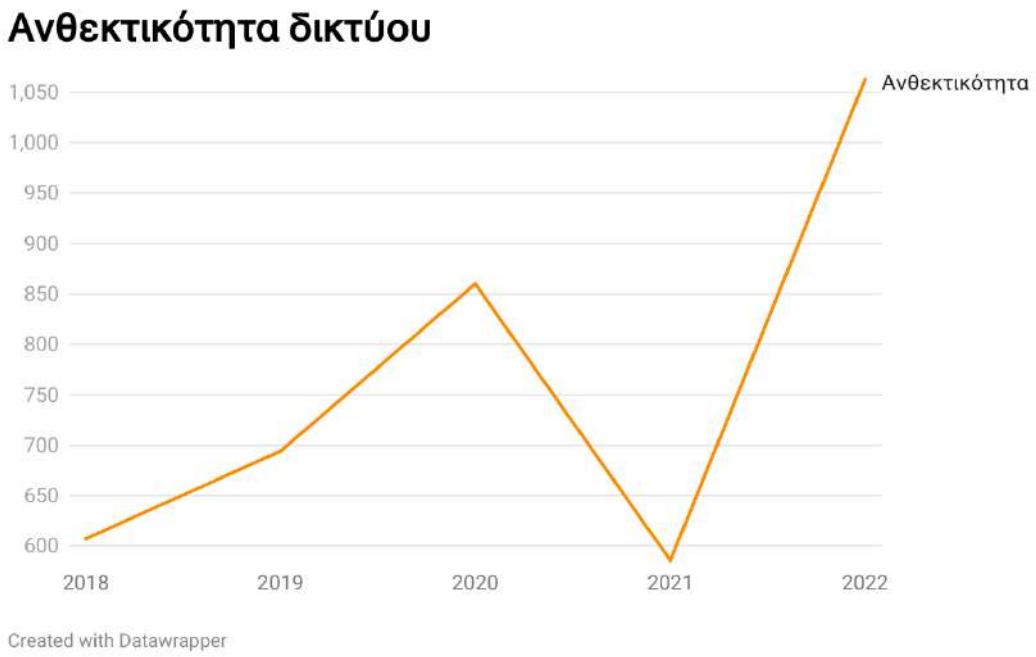


Σχήμα 4.16 Γραφική απεικόνιση δικτύου ευρωπαϊκού εφοδιασμού LNG το 2018



Σχήμα 4.17 Γραφική απεικόνιση δικτύου ευρωπαϊκού εφοδιασμού LNG το 2022

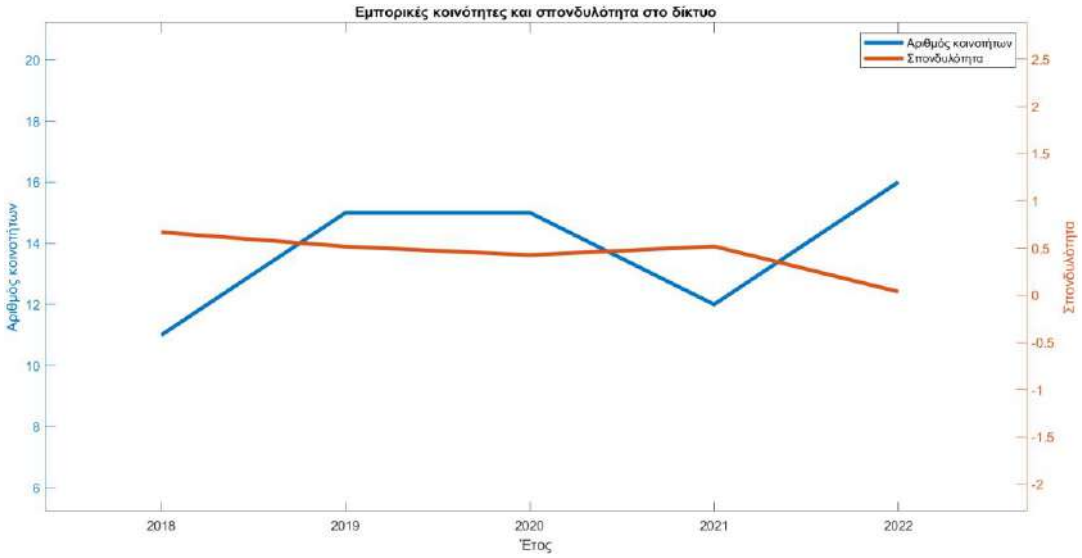
Τέλος, ο δείκτης ανθεκτικότητας του δικτύου εμφανίζει **ανοδική τάση** κατά την περίοδο μελέτης. Η άνοδος αυτή αποδεικνύει ότι η υψηλή αύξηση των τιμών του μεγέθους και της συνδεσιμότητας του δικτύου, μεγεθών ευθέως ανάλογων του δείκτη ανθεκτικότητας, υπερνικά αυτή των, αντιστρόφως ανάλογων δεικτών, του συνολικού βαθμού κεντρικότητας και της πυκνότητας. Όπως προκύπτει από τη χρονική εξέλιξη του δείκτη, η οποία παρατίθεται με τη βοήθεια του Σχήματος 4.18, η ανοδική τάση της ανθεκτικότητας του δικτύου διακόπηκε πρόσκαιρα το 2021, πιθανότατα λόγω της ανασφάλειας και αστάθειας που προκάλεσε η πανδημία του COVID-19 στην διεθνή κοινότητα, με τον δείκτη να ανακάμπτει και να ''εκτοξεύεται'' το επόμενο έτος.



Σχήμα 4.18 Χρονική εξέλιξη του δείκτη ανθεκτικότητας του δικτύου

4.3.2. Εξέλιξη εμπορικών κοινοτήτων

Από το Σχήμα 4.19, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της σπονδυλότητας και του αριθμού εμπορικών κοινοτήτων ενώ φαίνεται οτι ο αριθμός των κοινοτήτων στο δίκτυο αυξάνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης.



Σχήμα 4.19 Χρονική εξέλιξη σπονδυλότητας και αριθμού εμπορικών κοινοτήτων στο δίκτυο

Στην πραγματικότητα, αν αφαιρεθούν οι κοινότητες οι οποίες αποτελούνται από έναν μόνο κόμβο, λιμένα εισαγωγής ή χώρα-εξαγωγέα, προκύπτει ότι ο αριθμός των κοινοτήτων μειώθηκε από 8 το 2018, σε 7 το 2022. Ταυτόχρονα, η σπονδυλότητα, η οποία υπενθυμίζεται ότι λαμβάνει τιμές από -1 έως 1 και εκφράζει την ποιότητα του διαχωρισμού μεταξύ των κοινοτήτων, παρότι ελάμβανε τιμή που προσέγγιζε την μονάδα το 2018, το 2022 η τιμή της έτεινε στο 0. Σε συνδυασμό με τη μείωση του αριθμού των μη μονομελών κοινοτήτων, αυτό συνηγορεί στο συμπέρασμα ότι **η αγορά ευρωπαϊκού εφοδιασμού LNG ενοποιείτα**ι ολοένα και περισσότερο, ενδεχόμενα λόγω της διαμόρφωσης κοινών ευρωπαϊκών πολιτικών σε ενεργειακό επίπεδο, συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν επίσης, σε εντονότερο βαθμό, οι Mei et al. (2024). Επιπρόσθετα, στους χάρτες των Σχημάτων 4.20 και 4.21 απεικονίζεται η γεωγραφική διασπορά των μελών των μη μονομελών εμπορικών κοινοτήτων των ετών 2018 και 2022, αντίστοιχα.

Σχήμα 4.20 Γεωγραφική διασπορά μελών εμπορικών κοινοτήτων το 2018

Σχήμα 4.21 Γεωγραφική διασπορά μελών εμπορικών κοινοτήτων το 2022

Μία εκ των βασικών μεταβολών που διαδραματίζονται είναι η ενοποίηση έως το 2022 των δύο εμπορικών κοινοτήτων που το 2018 συμπεριλαμβάνουν τη

μεγάλη πλειοψηφία των λιμένων της Βόρειας και της Βαλτικής Θάλασσας. Η πρώτη κοινότητα συμπεριλαμβάνει το 2018 λιμένες στα δυτικά της Ιβηρικής χερσονήσου και λιμένες του Ηνωμένου Βασιλείου, οι οποίοι τροφοδοτούνται συστηματικά και κατά κύριο λόγο από τις ΗΠΑ. Η δεύτερη από τις αργότερα ενοποιούμενες αυτές κοινότητες αφορά τους λιμένες Σκανδιναβικών χωρών και κρατών της Βαλτικής, οι οποίοι τροφοδοτούνται κυρίως μέσω μεταφορτώσεων που λαμβάνουν χώρα στο λιμένα της Dunkerque. Μάλιστα, στην νέα, ενιαία κοινότητα που προκύπτει το 2022 συμμετέχουν επιπλέον οι εξαιρετικής σημασίας κόμβοι του Κατάρ και του λιμένα του Rotterdam.

Ταυτόχρονα, παρατηρείται μία κοινότητα κόμβων με βασικό εξαγωγέα τη Ρωσία και κύριο σημείο μεταφορτώσεων, αρχικά, το λιμένα του Rotterdam, και έπειτα αυτόν του Zeebrugge στο Βέλγιο. Παρότι ο λιμένας του Λονδίνου παύει έως το 2022 να εντάσσεται στην κοινότητα αυτή, τα μέλη της αυξάνονται, αφού σε αυτή εισχωρούν λιμένες της βόρειας ακτής της Ισπανίας και ο λιμένας της Nantes.

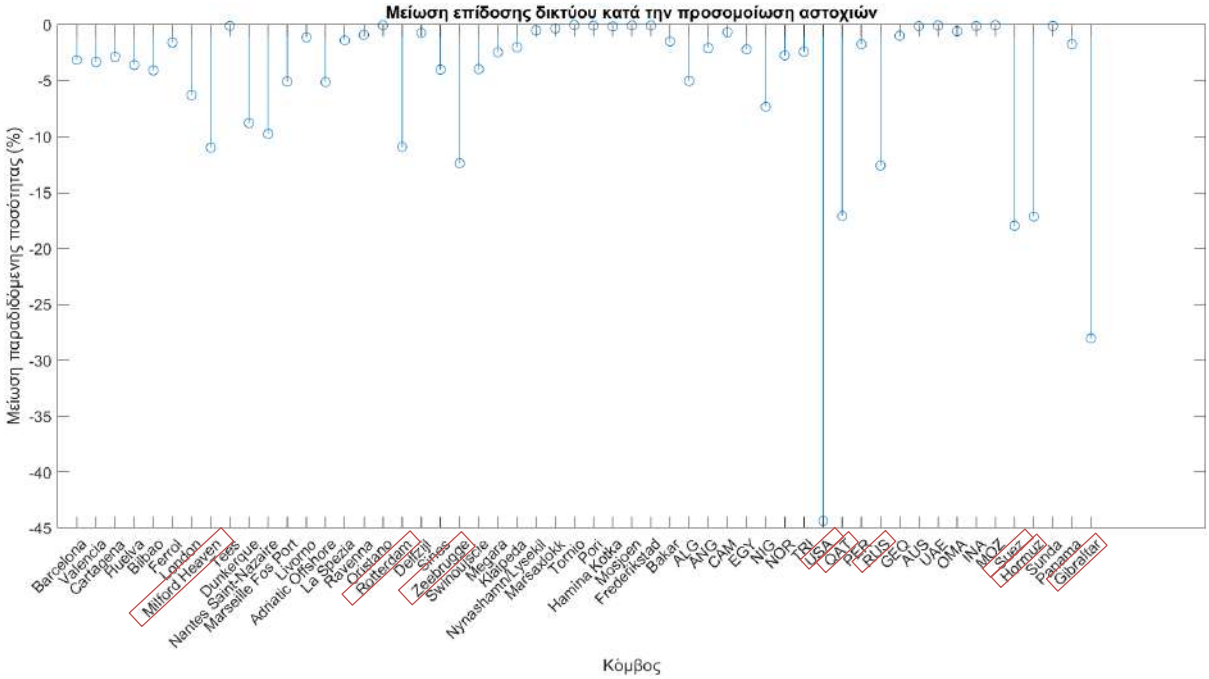
Σημαντικές χώρες-εξαγωγείς της δυτικής Αφρικής το 2018 εντάσσονταν σε κοινή εμπορική κοινότητα με την Αίγυπτο, εξάγοντας LNG κατά κύριο λόγο στους λιμένες του Zeebrugge και του Livorno. Το 2022 φαίνεται, πλέον, να έχουν εισχωρήσει στην προϋπάρχουσα εμπορική κοινότητα των λιμένων της νότιας και Μεσογειακής ακτής της Ισπανίας και του λιμένα του Marsaxlokk, στη Μάλτα, των οποίων κύριος τροφοδότης ήταν το Trinidad & Tobago.

Τέλος, αξιοσημείωτη εμπορική κοινότητα είναι αυτή που σχηματίζεται από τις εμπορικές σχέσεις μεταξύ της Αλγερίας και τους λιμένες της Marseille και La Spezia στη Μεσόγειο. Άλλες, λιγότερο ασταθείς και πιο ολιγομελείς κοινότητες φαίνονται επίσης στους χάρτες των Σχημάτων 4.20 και 4.21.

4.3.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η διερεύνηση της ανθεκτικότητας του δικτύου ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG θα πραγματοποιηθεί προσομοιώνοντας αστοχίες κόμβων του δικτύου και παρατηρώντας τη μεταβολή δεικτών της Θεωρίας Δικτύων που επελέγησαν νωρίτερα. Σημειώνεται ότι στο υπό προσομοίωση δίκτυο του 2022 συμμετέχουν τα επιλεγέντα σημεία συμφόρησης (chokepoints) θαλάσσιων διαδρομών. Η εξέλιξη των δεικτών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των αστοχιών έχει οπτικοποιηθεί μέσω διαγραμμάτων που δημιουργήθηκαν μέσω του κώδικα που αναπτύχθηκε. Στην περίπτωση της μεμονωμένης αστοχίας κόμβων, επί του οριζόντιου άξονα τοποθετούνται οι κόμβοι του δικτύου, και επί του κατακόρυφου η ποσοστιαία μεταβολή του εκάστοτε δείκτη κατά τη μεμονωμένη αστοχία του κάθε κόμβου. Παρακάτω, στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η μεταβολή της επίδοσης του δικτύου, και συγκεκριμένα του

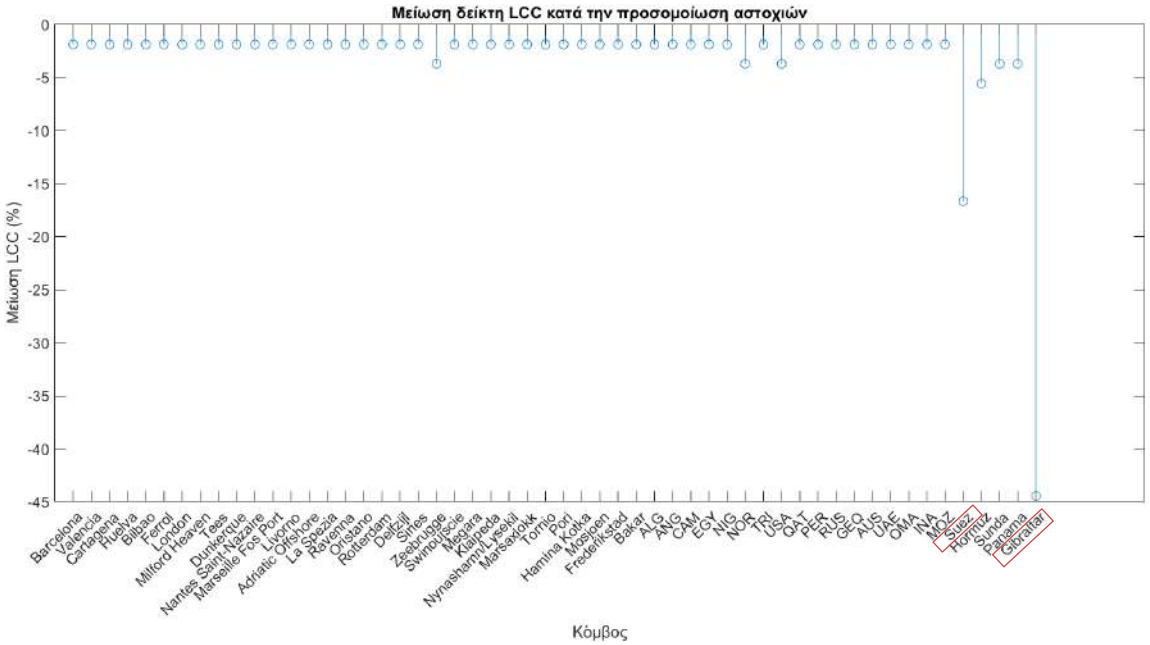
ποσοστού της συνολικής εισαγόμενης ποσότητας που δύναται να παραδοθεί, κατά την αστοχία μεμονωμένων κόμβων.



Σχήμα 4.22 Ποσοστιαία μεταβολή επίδοσης δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών

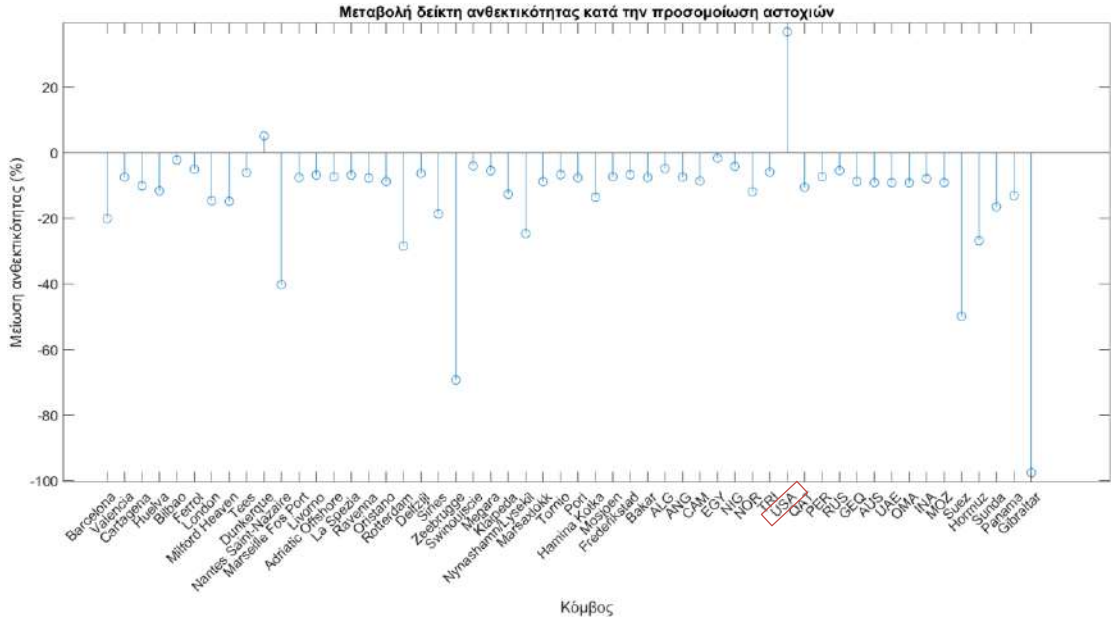
Όπως είναι λογικό, η απευθείας αποκοπή μεγάλων εισαγωγέων από το δίκτυο επιφέρει μεγάλη μείωση των υπό παράδοση ποσοτήτων. Ενδεικτικά παραδείγματα οι περιπτώσεις της Ρωσίας, του Κατάρ και των ΗΠΑ, με την αποκοπή των τελευταίων, μάλιστα, να προκαλεί περίπου 45% μείωση. Επίσης, μεγάλη είναι η επιρροή στις εισαγωγές LNG, και συνεπώς και στην ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης, λιμένων με σημαντική μεταφορτωτική διακίνηση, όπως αυτούς του Milford Haven, του Rotterdam και του Zeebrugge. Επιπλέον, ακόμα σημαντικότερος εμφανίζεται ο ρόλος των θαλάσσιων σημείων, κατά σειρά σημασίας, του Γιβραλτάρ, του Σουέζ και του Ορμούζ.

Ο ρόλος των σημείων αυτών αναβαθμίζεται ακόμα περισσότερο όταν εξετάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του μεγέθους του LCC του δικτύου, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.23. Πιθανή διατάραξη του Στενού του Γιβραλτάρ θα απέκοπτε περίπου το 45% των κόμβων του δικτύου από το εναπομείναν σώμα του, ενώ στην περίπτωση του Σουέζ, η συρρίκνωση του δικτύου ισούται με περίπου 16%. Εντυπωσιακό είναι ότι για την συντριπτική πλειοψηφία των κόμβων, η μείωση του μεγέθους που επιφέρεται αφορά μόνο στην δική τους αποκοπή από αυτό, γεγονός που δείχνει την έντονη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων του δικτύου, μεταξύ των οποίων υπάρχει δυνατότητα διαμόρφωσης εναλλακτικών διαδρομών χωρίς τη συμμετοχή αστοχούντων κόμβων.



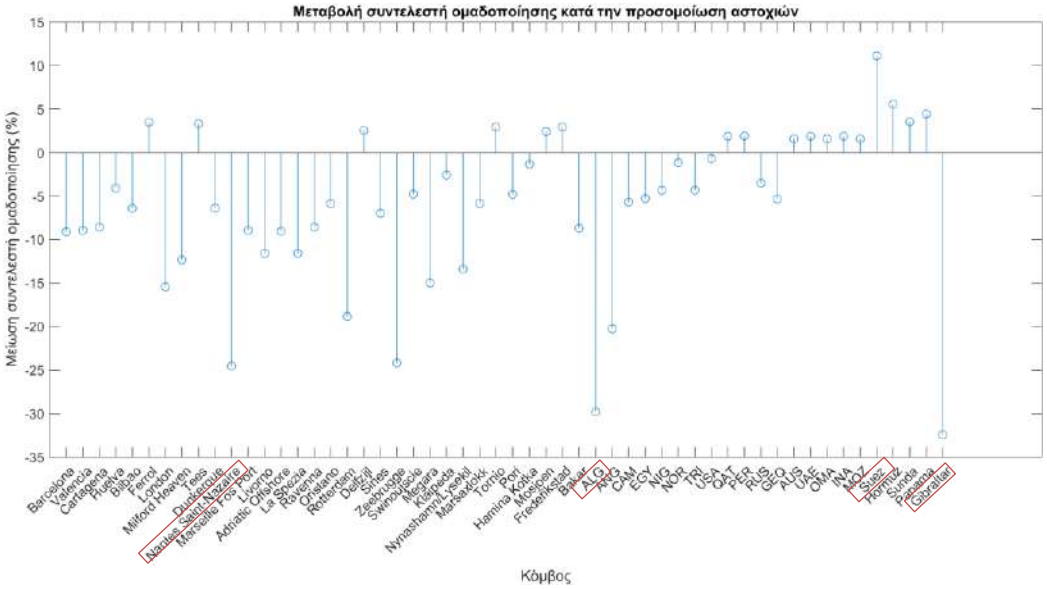
Σχήμα 4.23 Ποσοστιαία μεταβολή LCC δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών

Στο Σχήμα 4.24 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη της ανθεκτικότητας του δικτύου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αύξηση του δείκτη στην περίπτωση απομάκρυνσης των ΗΠΑ από το δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση, η εξάλειψη των έντονων μονοπωλιακών χαρακτηριστικών του δικτύου οδηγεί σε μείωση του βαθμού κεντρικότητας του δικτύου και άρα σε αύξηση της ανθεκτικότητας του.



Σχήμα 4.24 Ποσοστιαία μεταβολή ανθεκτικότητας δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών

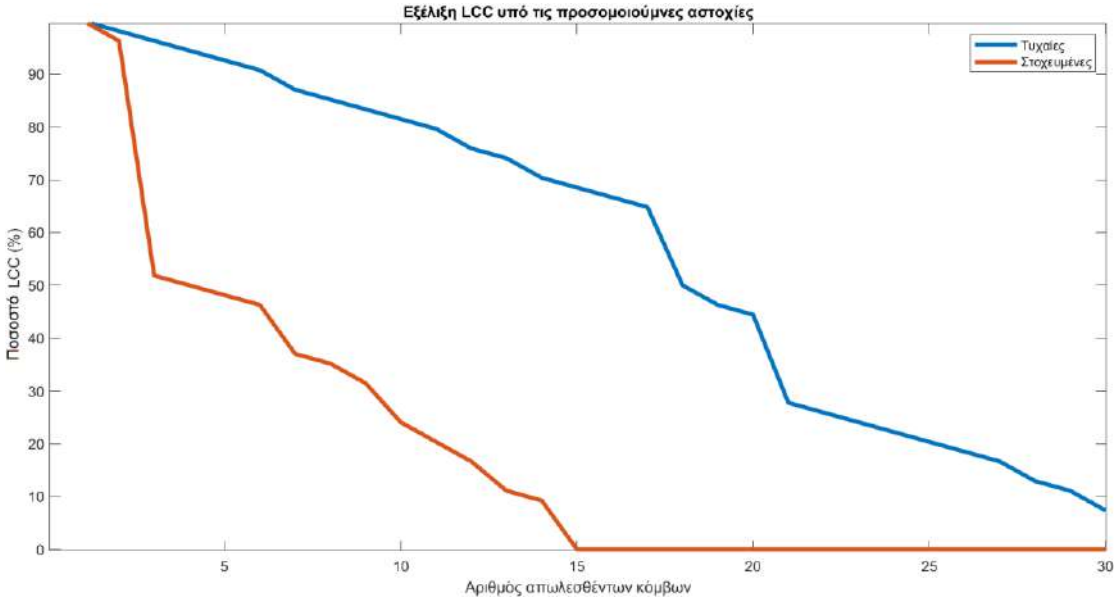
Παρόμοιες αυξήσεις παρά τις προσομοιούμενες αστοχίες παρουσιάζει και ο συντελεστής ομαδοποίησης του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25. Πρακτικά, υψηλός συντελεστής ομαδοποίησης σε έναν κόμβο υποδηλώνει ότι η κόμβος αυτός συμμετέχει σε μία στενά συνεργαζόμενη ομάδα κόμβων, οπού οι κόμβοι με τους οποίους αυτός συναλλάσσεται αναπτύσσουν και μεταξύ τους εμπορικούς δεσμούς. Έτσι, απομονωμένοι κόμβοι, όπως οι χώρες-εξαγωγείς Μοζαμβίκη, Ομάν, ΗΑΕ και άλλες, ή κόμβοι με μεγάλα ποσοστά διακίνησης σε κόμβους ασύνδετους μεταξύ τους, όπως ο κόμβος που αντιπροσωπεύει τη Διώρυγα του Σουέζ, προκαλούν δια της αστοχίας τους αύξηση του συντελεστή. Αντίθετα, η αστοχία λιμένων ή χωρών που αποτελούν τον πυρήνα εμπορικών κοινοτήτων το 2022, όπως ο λιμένας της Nantes και η Αλγερία, ή σημείων που ενώνουν εμπορικές κοινότητες με το υπόλοιπο δίκτυο, με ενδεικτικό παράδειγμα το Στενό του Γιβραλτάρ, επιφέρει σημαντική μείωση του συντελεστή ομαδοποίησης του δικτύου.



Σχήμα 4.25 Ποσοστιαία μεταβολή συντελεστή ομαδοποίησης δικτύου υπό την επίδραση μεμονωμένων αστοχιών

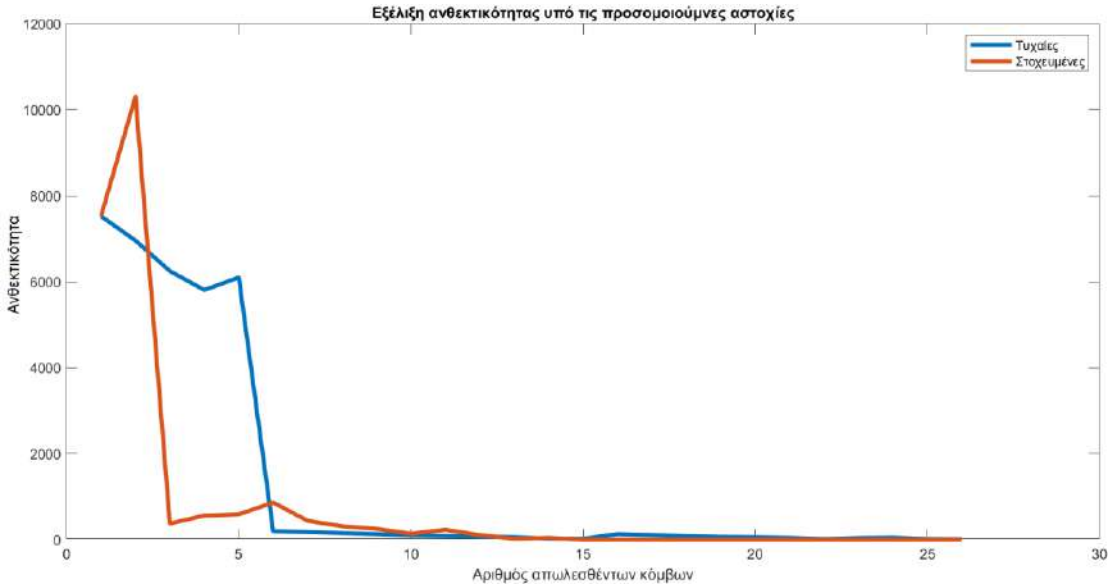
Όπως και στην περίπτωση των μεμονωμένων αστοχιών, έτσι και σε αυτή των σωρευτικών, η εξέλιξη των επιλεγμένων δεικτών κατά τις αστοχίες που προσομοιώνονται έχει οπτικοποιηθεί μέσω διαγραμμάτων με τη βοήθεια του προγραμματιστικού λογισμικού MATLAB. Επί του οριζόντιου άξονα τοποθετείται ο αριθμός των συνολικών κόμβων που έχουν αφαιρεθεί και επί του οριζόντιου η τιμή του δείκτη, ενώ σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται τόσο η περίπτωση τυχαίων, όσο και στοχευμένων αστοχιών. Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.26 παρατίθεται η εξέλιξη του ποσοστού του μεγέθους του εναπομείναντος LCC του δικτύου σε σχέση με το συνολικό μέγεθος του αρχικού δικτύου. Είναι εμφανής η αντίθεση μεταξύ των τυχαίων αστοχιών και των στοχευμένων επιθέσεων. Κατά τις πρώτες, ο δείκτης μειώνεται σχεδόν γραμμικά κατά την αστοχία των 17 πρώτων κόμβων. Αντίθετα, κατά τις

επιτηδευμένες επιθέσεις, η μείωση του μεγέθους του δικτύου πραγματοποιείται πολύ γρηγορότερα, και η κατάρρευση του επέρχεται πολύ νωρίτερα. Είναι ενδεικτικό ότι με την αστοχία των τριών σημαντικότερων κόμβων, αποκόπτονται από το δίκτυο περίπου το 50% των κόμβων. Η έντονη διαφοροποίηση επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα των μελετών των Sun et al. (2022) και Mei et al. (2024).



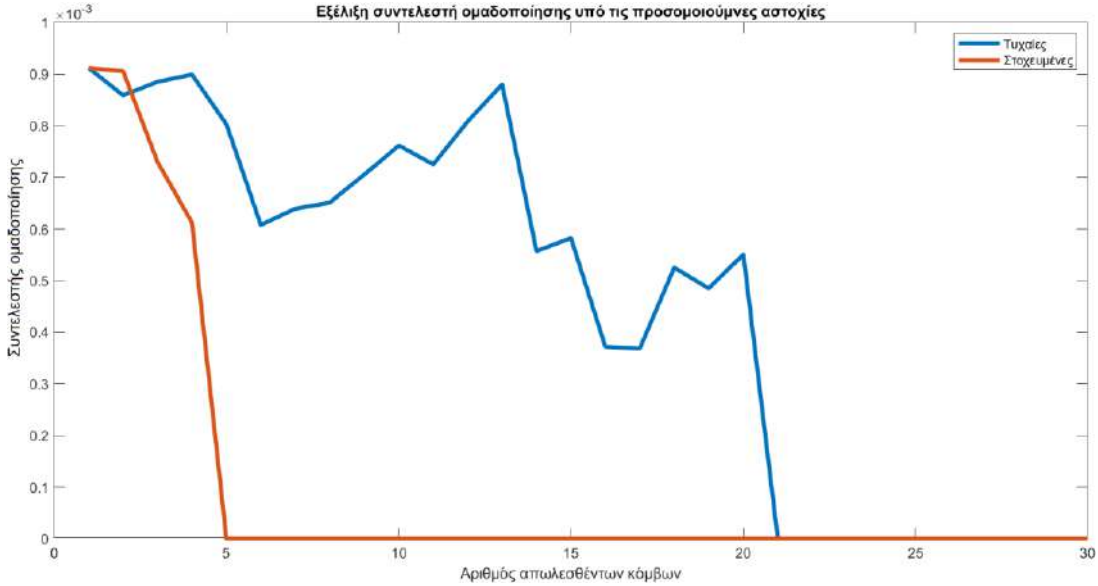
Σχήμα 4.26 Μεταβολή ποσοστού μεγέθους LCC επί του συνολικού μεγέθους του δικτύου υπό την επίδραση σωρευτικών αστοχιών

Όσον αφορά τη μεταβολή του δείκτη ανθεκτικότητας κατά τις σωρευτικές επιθέσεις, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.27, η εικόνα διαφέρει. Παρότι οι στοχευμένες επιθέσεις επιφέρουν κατάρρευση του δείκτη με την απομάκρυνση τριών κόμβων, ενώ οι τυχαίες αστοχίες με την απομάκρυνση έξι κόμβων, η μείωση του δείκτη σε καμία περίπτωση δεν ακολουθεί γραμμική πορεία. Ενδιαφέρον ενέχει η πρόσκαιρη αύξηση της τιμής του δείκτη κατά την αφαίρεση των πιο σημαντικών κόμβων, η οποία, όπως φάνηκε και κατά τις μεμονωμένες αστοχίες, απλοποιεί σημαντικά το δίκτυο μειώνοντας την κεντρικότητα του και συνάδει με το αποτέλεσμα της μελέτης των Xiao et al. (2024). Η αποκέντρωση της συνδεσιμότητας του δικτύου αυξάνει την ανθεκτικότητά του.



Σχήμα 4.27 Μεταβολή ανθεκτικότητας του δικτύου υπό την επίδραση σωρευτικών αστοχιών

Διερευνώντας, τέλος, τις τιμές του συντελεστή ομαδοποίησης, παρατηρείται ότι αυτές καταρρέουν πλήρως με την αστοχία των πέντε σημαντικότερων κόμβων. Αντίθετα, ο συντελεστής εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις μέχρι την απότομη μείωση, η οποία επέρχεται μετά την απομάκρυνση 20 κόμβων, κατά την τυχαία αστοχία. Αυτό το φαινόμενο συνάδει με τα αποτελέσματα των Mei et a. (2022) και Xiao et al. (2024), ενώ οι διακυμάνσεις οφείλονται στο γεγονός ότι, κατά τις τυχαίες αστοχίες, η αστοχία κόμβου που εντάσσεται σε στενά συνεργαζόμενες ομάδες κόμβων προκαλεί μείωση του συντελεστή, ενώ η αστοχία απομονωμένου κόμβου σε αύξηση του.



Σχήμα 4.28 Μεταβολή συντελεστή ομαδοποίησης του δικτύου υπό την επίδραση σωρευτικών αστοχιών

Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1. Ανασκόπηση διαδικασίας

Η παρούσα ενότητα της διπλωματικής εργασίας δίνει την ευκαιρία να πραγματοποιηθεί μία **σύντομη ανασκόπηση** της διαδικασίας της ανάλυσης που προηγήθηκε. Σε αυτό το πλαίσιο, δίνεται η ευκαιρία να τεθούν προς συζήτηση δυσκολίες που συναντήθηκαν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, πιθανές αδυναμίες της που εντοπίστηκαν και καινοτόμα χαρακτηριστικά που υιοθετήθηκαν. Επίσης, αναφέρονται στοιχεία των αποτελεσμάτων που δεν αναμενόταν ή δεν συμφωνούν με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Η **βασική δυσκολία** που προέκυψε κατά την εκπόνηση της ανάλυσης αφορά τη συλλογή έγκυρων και λεπτομερών δεδομένων σε επίπεδο λιμένων. Από τη δυσκολία αυτή πηγάζει, άλλωστε, και η μεγαλύτερη αδυναμία της ανάλυσης: η ανισομέρεια μεταξύ των εξαγωγέων, που συμμετέχουν στο δίκτυο σε επίπεδο κρατών, και εισαγωγέων, που συμμετέχουν σε επίπεδο λιμένων. Αυτό αποτελεί σαφές μειονέκτημα της ανάλυσης αφού παραβιάζει την ομοιομορφία μεταξύ των κόμβων και, επομένως, καθιστά ενδεχομένως παραπλανητικούς δείκτες όπως το μέγεθος του δικτύου, την συνδεσιμότητα του και όσους παράγονται εξ αυτών.

Εντούτοις, έστω και αυτή η κατά το ήμισυ σε επίπεδο λιμένων θεώρηση του δικτύου **χωρίς τη χρήση δεδομένων τύπου AIS** (Automated Identification System) αποτελεί πρωτοπόρος. Η δόμηση **κατευθυνόμενου δικτύου** αλλά και η συμπερίληψη στο δίκτυο **σημείων συμφόρησης** των θαλάσσιων διαδρομών (chokepoints) αποτελούν επιπλέον καινοτομίες της παρούσας μελέτης.

Παρότι η ανάλυση αποκλειστικά του κατευθυνόμενου προς την Ευρώπη εμπορίου LNG στο σύνολο της περιόδου 2018-2022 δεν αποτέλεσε καθαυτό αντικείμενο άλλης σχετικής έρευνας, τα ευρήματα της είναι συγκρίσιμα με αυτά ορισμένων μελετών. Σε γενικές γραμμές παρουσιάζεται σημαντική **ταύτιση των αποτελεσμάτων** της παρούσας εργασίας με αυτά προγενέστερης βιβλιογραφίας, με εξαίρεση, ίσως, μεμονωμένα στοιχεία, τα οποία επισημαίνονται κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Βασικότερα από αυτά είναι η στενότητα των εμπορικών δεσμών του δικτύου, που παρότι σε άλλες έρευνες θεωρείται αυξανόμενη, στα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης οι αντίστοιχοι δείκτες δεν παρουσιάζουν εμφανή τάση, καθώς και η απόλυτη ενοποίηση των κοινοτήτων η οποία δε θα διαπιστώνεται στην εργασία αυτή σε βαθμό τέτοιο όσο σε άλλες μελέτες.

5.2. Συμπεράσματα και προτάσεις προς υιοθέτηση

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όσο και ανάλογων μελετών, μπορεί να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα σε παράγοντες της αγοράς, ρυθμιστικούς φορείς, άλλα μέρη του εμπορίου, ή ακόμα και στο ευρύ κοινό που ενημερώνεται για το ολοένα και σημαντικότερο για την καθημερινότητα LNG. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τα οποία παρουσιάστηκαν νωρίτερα, είναι πολύπλευρα, και για αυτό τα συμπεράσματα που συνάγονται, τα οποία θα αποτελέσουν εφαλτήριο για μελλοντική έρευνα, συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Το δίκτυο ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG, κατά τα έτη 2018-2022, υπέστη σημαντική **μετατόπιση του κέντρου βάρους** του. Η μεγάλη αύξηση της ζήτησης LNG στην Ευρώπη καλύφθηκε σε σημαντικό βαθμό από την ‘’εκτίναξη’’ των εξαγωγών των ΗΠΑ, οι οποίες εδραιώθηκαν ως ο σημαντικότερος εξαγωγέας LNG στην Ευρώπη, καταλαμβάνοντας περίπου το 45% της αντίστοιχης αγοράς, κάτι που μοιάζει ως πιθανό αποτέλεσμα της προσπάθειας απεξάρτησης της Ευρώπης από το ρωσικό αέριο μετά την ρωσική εισβολή στην Ουκρανία. Η εξέλιξη αυτή μετέφερε σε μεγάλο βαθμό το επίκεντρο του εμπορίου από τις ακτές της Μεσογείου σε αυτές του Ατλαντικού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση της σημασίας των λιμένων της βόρειας και δυτικής έναντι αυτών της νότιας Ευρώπης, και ομοίως της κρισιμότητας του Στενού του Γιβραλτάρ έναντι της Διώρυγας του Σουέζ
- Η μεγάλη αύξηση του αριθμού των εισαγωγέων LNG στην Ευρώπη και των εισαγόμενων όγκων δεν φαίνεται να συνοδεύεται από εξίσου μεγάλη αύξηση των εξαγωγέων. Ενδεικτικά, αναφέρθηκε ότι το μερίδιο των τριών μεγαλύτερων εξαγωγέων LNG προς την Ευρώπη το 2018 ήταν 62%, ενώ το ίδιο ποσοστό ανήλθε το 2022 σε 74%. Η αύξηση της κεντρικότητας τους δικτύου εφοδιασμού είναι αντιστρόφως ανάλογη της ανθεκτικότητας. Επομένως, η όλο και υψηλότερη εξάρτηση της Ευρώπης από περιορισμένο αριθμό χωρών δημιουργεί έντονα **μονοπωλιακά χαρακτηριστικά** στην αγορά εξαγωγών LNG και απειλεί την ενεργειακή ασφάλεια της ηπείρου
- Παρότι το 2022 φαίνεται να σχηματίζονται 7 μη μονομελείς εμπορικές κοινότητες στο δίκτυο, ο αριθμός αυτός φαίνεται να μειώνεται και τα όρια μεταξύ των κοινοτήτων να γίνονται λιγότερο σαφή. Αυτό οδηγεί σταδιακά σε **ενοποίηση του δικτύου εισαγωγών** LNG της Ευρώπης, ως πιθανό αποτέλεσμα των πολιτικών των ευρωπαϊκών κρατών για την προώθηση κοινής ενεργειακής στρατηγικής
- Όπως επιβεβαιώνεται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι **στοχευμένες επιθέσεις** επιφέρουν πολύ σημαντικότερες και πιο άμεσες συνέπειες στο δίκτυο εφοδιασμού της Ευρώπης, ενώ προκαλούν πολύ νωρίτερα την πλήρη κατάρρευση του, σε σχέση με τυχαίες αστοχίες. Οι λιμένες με υψηλή μεταφορτωτική κίνηση ή λιμένες που αποτελούν την

αποκλειστική δίοδο ορισμένων εξαγωγέων προς την Ευρώπη, όπως αυτός του Rotterdam στην Ολλανδία, του Zeebrugge στο Βέλγιο και του Milford Haven στο Ηνωμένο Βασίλειο αποτελούν τους κρισιμότερους λιμένες του δικτύου το 2022. Το σημαντικότερο από τα σημεία συμφόρησης είναι το Στενό του Γιβραλτάρ, ενώ ο κόμβος που αντιπροσωπεύει τις ΗΠΑ στο δίκτυο, αυτονόητα, αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της υψηλής συμμετοχής τους στο μίγμα εισαγωγών LNG της Ευρώπης.

Μέσω των παραπάνω συμπερασμάτων είναι δυνατόν να διαμορφωθεί ένα σύνολο προτάσεων προς την κατεύθυνση της διασφάλισης του εφοδιασμού της Ευρώπης με LNG, και κατ΄επέκταση της ενεργειακής ασφάλειας της ηπείρου. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δίνονται ορισμένες γενικές κατευθύνσεις και σημειώνεται ότι η διατύπωση σαφών και τεκμηριωμένων προτάσεων θα πρέπει να αποτελεί απόσταγμα ενδελεχούς έρευνας, και όχι αυθαίρετης διαμόρφωσης. Ως πρώτος βασικός άξονας, τα ευρωπαϊκά κράτη, τα οποία ήδη διαμορφώνουν κοινή ενεργειακή στρατηγική, θα πρέπει να προσαρμοστούν στην μετατόπιση του κέντρου βάρους του εμπορίου, δίνοντας έμφαση στην **ενίσχυση των υποδομών της ατλαντικής ακτής**. Κατά δεύτερον, προκύπτει ότι η υψηλή εξάρτηση των ευρωπαϊκών εισαγωγών LNG από περιορισμένο αριθμό εξαγωγέων εκθέτει τον εφοδιασμό, και την ενεργειακή ασφάλεια εν γένει, σε μεγάλο κίνδυνο. Για το λόγο αυτό, κρίνεται ότι τα κράτη της Ευρώπης θα πρέπει να διερευνήσουν τη δυνατότητα **διαφοροποίησης του χαρτοφυλακίου εισαγωγών** LNG, μέσω της στροφής σε εναλλακτικούς εμπορικούς εταίρους που, παρότι διαθέτουν επαρκή παραγωγή LNG, δεν κατέχουν σημαντικό μερίδιο των εισαγωγών, όπως η Αυστραλία και τα ΗΑΕ. Αυτό θα συμβάλει στην βέλτιστη διαχείριση του κινδύνου. Τέλος, η αυξημένη επικινδυνότητα για το δίκτυο των στοχευμένων επιθέσεων σε σχέση με τις τυχαίες αστοχίες υποδεικνύει την αναγκαιότητα της λήψης των ανάλογων **μέτρων για την προστασία** των κρίσιμων υποδομών του δικτύου, όπως αυτοί προσδιορίζονται στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης ή άλλων μελετών.

5.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όπως τεκμηριώθηκε στην ενότητα 1, είναι βέβαιο ότι το φυσικό αέριο, και ιδιαίτερα το LNG, παρότι οι σχετικές με αυτό έννοιες δεν είναι ευρέως γνωστές στους ευρωπαίους πολίτες, θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην ομαλή συνέχιση της καθημερινότητας τους. Συνεπώς, η έρευνα σχετικά με αυτό αναμένεται να εμβαθύνει περισσότερο σε όλες τις πτυχές της εφοδιαστικής του αλυσίδας, καθώς πολλές από αυτές παραμένουν, ακόμα, μακριά από το επίκεντρο του ενδιαφέροντος.

Η ανάλυση που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λόγω των δυσκολιών και των αδυναμιών που αναφέρονται παραπάνω, πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο ‘’χώρας-εξαγωγέα προς λιμένα εισαγωγής’’. Επομένως, αναμφίβολα ενδιαφέρουσα θα ήταν η επανάληψη της ανάλυσης αποκλειστικά σε επίπεδο λιμένων, με την απαραίτητη πρόσβαση σε δεδομένα που απαιτούνται για κάτι τέτοιο.

Επιπλέον, μία πιο ολοκληρωμένη οπτική για την προοπτική της ενεργειακής ασφάλειας της Ευρώπης θα προέκυπτε αν, στο υπό ανάλυση δίκτυο εισαγωγών LNG, προστεθούν κομβικά σημεία του δικτύου εισαγωγής και διανομής φυσικού αερίου δια αγωγών (PNG) στην Ευρώπη. Με αυτό τον τρόπο θα διερευνούταν η δομή και η ανθεκτικότητα του συνόλου των εισαγωγών φυσικού αερίου.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία θα είχε η εφαρμογή μοντέλου πρόβλεψης δικτύου, βασισμένου σε χαρακτηριστικά του παροντικού δικτύου που ερευνήθηκαν σε αυτή την εργασία, λαμβάνοντας υπ’ όψιν διαφορετικά σενάρια εργασίας (case studies). Μία τέτοια προσέγγιση θα συνέβαλε στην βαθύτερη κατανόηση των τάσεων της αγοράς LNG και θα κρινόταν χρήσιμη για πολλούς παράγοντες της.

Βιβλιογραφία

An Q, An H, Wang L, Huang X. 2014, Structural and regional variations of natural resource production in China based on exergy. Energy 2014, 74(5):67-77

An Q., Wang L., Qu D., Zhang H. 2018, Dependency network of international oil trade before and after oil price drop. Energy 165, 1021–1033

Bhavathrathan, B. K., & Patil, G. R. 2015. Capacity uncertainty on urban road networks: A critical state and its applicability in resilience quantification. *Computers, Environment and Urban Systems*, *54*, 108–118.

Bi, W., MacAskill, K., Schooling, J., 2023. Old wine in new bottles? Understanding infrastructure resilience: foundations, assessment, and limitations. Transport. Res. Transport Environ. 120, 103793

Biresselioglu, M. E., Yelkenci, T., & Oz, I. O. 2015. Investigating the natural gas supply security: A new perspective. *Energy*, *80*, 168–176.

Blondel, V.D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., Lefebvre, E., 2008. Fast unfolding of communities in large networks. J. Stat. Mech. Theory Exp. 30 (2), 155-168.

Chen Z., An H., Gao X., Li H., Hao X. 2016, Competition pattern of the global liquefied natural gas (LNG) trade by network analysis. J. Nat. Gas Sci. Eng. 33, 769–776

Della Rossa F., Dercole F., Piccardi C. 2013, Profiling core-periphery network structure by random walkers. Sci. Rep. 3, srep01467

Ding, Y., Zhang, M., Chen, S., & Nie, R. 2020. Assessing the resilience of China's natural gas importation under network disruptions. *Energy*, *211*.

Dong G., Qing T., Du R., Wang C., Li R., Wang M., Tian L., Chen L., Vilela A.L.M., Stanley H.E. 2020, Complex network approach for the structural optimization of global crude oil trade system. J. Clean. Prod. 251, 119366

Dong, K., Li, J., & Zhang, H. 2023. LNG point supply of villages and towns in China: Challenges and countermeasures. *Applied Energy*, *334*.

Du R., Dong G., Tian L., Wang Y., Liu Y., Wang M., Fang G., 2016. A complex network perspective on features and evolution of world crude oil trade. Energy Proc. 104, 221–226

Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. 2014. Travel time resilience of roadway networks under disaster. *Transportation Research Part B: Methodological*, *70*, 47–64.

Feng S., Li H., Qi Y., Guan Q., Wen S.2017, Who will build new trade relations? Finding potential relations in international liquefied natural gas trade. Energy 141, 1226–1238

Filimonova I.V., Komarova A.V., Sharma R., Novikov A.Y. 2022, Transformation of international liquefied natural gas markets: New trade routes. Energy Rep. 8, 675–682

Gao, C., Sun, M., Shen, B., 2015. Features and evolution of international fossil energy trade relationships: a weighted multilayer network analysis. Appl. Energy 156, 542–554.

Geng, J.-B.; Ji, Q.; Fan, Y. 2014, A dynamic analysis on global natural gas trade network. Appl. Energy 2014, 132, 23–33.

Geng, J. B., Ji, Q., Fan, Y., & Shaikh, F. 2017. Optimal LNG importation portfolio considering multiple risk factors. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 452–464.

Girvan, M., & Newman, M. E. 2002. Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, *99*(12), 7821-7826.

Glick, R., Rose, A.K., 1999. Contagion and trade: why are currency crises regional? J. Int. Money Finance 18, 603–617.

Gong, C., Gong, N., Qi, R., & Yu, S. 2020. Assessment of natural gas supply security in Asia Pacific: Composite indicators with compromise Benefit-of-the-Doubt weights. *Resources Policy*, *67*.

Guo, J., Guo, S., &Lv, J. 2022. Potential spatial effects of opening Arctic shipping routes on the shipping network of ports between China and Europe. *Marine Policy*, *136*.

Hafezi, R., Akhavan, A. N., Pakseresht, S., & A. Wood, D. 2021. Global natural gas demand to 2025: A learning scenario development model. *Energy*, *224*.

Hao, X., An, H., Sun, X., Zhong, W., 2018. The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: from network perspective. Resour. Pol. 57, 45–54.

Hou, Z.; Niu, X.; Yu, Z.; Chen, W. 2024, Spatiotemporal Evolution and Market Dynamics of the International Liquefied Natural Gas Trade: A Multilevel Network Analysis. Energies 2024, 17, 228.

Huang, J., Ding, Q., Wang, Y., Hong, H., Zhang, H., 2021. The evolution and influencing factors of international tungsten competition from the industrial chain perspective. Resour. Pol. 73, 102185.

Ji, Q., Zhang, H., Fan, Y., 2014. Identification of global oil trade patterns: empirical research based on complex network theory. Energy Convers. Manag. 85, 856–865.

Kong, Z., Lu, X., Jiang, Q., Dong, X., Liu, G., Elbot, N., Chen, S. 2019. Assessment of import risks for natural gas and its implication for optimal importing strategies: A case study of China. *Energy Policy*, *127*, 11–18.

Kumar, S., Kwon, H. T., Choi, K. H., Hyun Cho, J., Lim, W., & Moon, I. 2011. Current status and future projections of LNG demand and supplies: A global prospective. *Energy Policy*, *39*(7), 4097–4104.

Latora, V. Marchiori, M. 2001, Efficient Behavior of Small-World Networks. Phys. Rev. Lett. 2001, 87, 198701.

Li, J., Dong, X., Jiang, Q., Dong, K., Liu, G., 2021. Natural gas trade network of countries and regions along the belt and road: where to go in the future? RESOUR POLICY 71, 101981.

Li, Z., Li, H., Zhang, Q., & Qi, X. 2024. Data-driven research on the impact of COVID-19 on the global container shipping network. *Ocean and Coastal Management*, *248*.

Liu, Q., Yang, Y., Ng, A. K. Y., & Jiang, C. 2023. An analysis on the resilience of the European port network. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *175*.

Newman, M. E. 2006. Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, *103*(23), 8577-8582.

Mei, Q., Qinyou, H., Hu, Y., Yang, Y., Liu, X., Huang, Z., & Wang, P. 2024. Structural analysis and vulnerability assessment of the European LNG maritime supply chain network (2018–2020). *Ocean and Coastal Management*, *253*.

Meza, A., Ari, I., Sada, M. A., & Koç, M. 2022. Disruption of maritime trade chokepoints and the global LNG trade: An agent-based modeling approach. *Maritime Transport Research*, *3*.

Miah, M. M. A., Ahmed, S. S. U., & Sultana, K. S. (2017). Control over Maritime Chokepoints an Assurance of Secure Lifeline. *Bangladesh Maritime Journal*, *3*(1,111-120).

Mou N., Sun S., Yang T., Wang Z., Zheng Y., Chen J., Zhang L. 2020, "Assessment of the Resilience of a Complex Network for Crude Oil Transportation on the Maritime Silk Road," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181311-181325

Nikhalat-Jahromi H., Angeloudis P., Bell M.G.H., Cochrane R. 2016, Global LNG trade: A comprehensive up to date analysis, Enerrgy 19, 160-181

Niu X., Chen W., Wang N. 2023, Spatiotemporal Dynamics, and Topological Evolution of the Global Crude Oil Trade Network. Energies 16, 1728

Oparanya AW., Mdadila K., Rutasitara L. 2019, Thedeterminant of bilateral trade in the east African community: Application of the gravity model, International Journal of Economics and Finance, 11(4): 1-15

Peng, P., Yang, Y., Cheng, S., Lu, F., Yuan, Z. 2019. Hub-and-spoke structure: characterizing the global crude oil transport network with mass vessel trajectories. Energy 168, 966–974.

Peng P., Lu F., Cheng S.F., Yang Y. 2020, Mapping the global liquefied natural gas trade network: a perspective of maritime transportation. J. Clean. Prod. 12, 124640.

Peng, P., Lu, F., Cheng, S., Yang, Y. 2021, Mapping the global liquefied natural gas trade network: A perspective of maritime transportation,J. Clean. Prod. 283, 124640. Review 23: 566–579

Rodrigue, J. P. (2004). Straits, passages and chokepoints: a maritime geostrategy of petroleum distribution. *Cahiers de géographie du Québec*, *48*(135), 357-374.

Shaikh, F., Ji, Q., & Fan, Y. 2016. Assessing the stability of the LNG supply in the Asia Pacific region. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *34*, 376–386.

Shao, L., Hu, J., Zhang, H., 2021. Evolution of global lithium competition network pattern and its influence factors. Resour. Pol. 74, 102353.

Sun, X., Wei, Y., Jin, Y., Song, W., & Li, X. 2023. The evolution of structural resilience of global oil and gas resources trade network. Global Networks, 23, 391–411
Vivoda, V. 2014. LNG import diversification in Asia. *Energy Strategy Reviews*, *2*(3–4), 289–297.

Wan, Z., Su, Y., Li, Z., Zhang, X., Zhang, Q., & Chen, J. 2023. Analysis of the impact of Suez Canal blockage on the global shipping network. *Ocean and Coastal Management*, *245*.

Wang, W., Li, Z., Cheng, X., 2019a. Evolution of the global coal trade network: A complex network analysis. Resour. Pol. 62, 496–506.

Wang, X., Li, H., Yao, H., Chen, Z., Guan, Q., 2019b. Network features and influence factors of global nature graphite trade competition. Resour. Pol. 60, 153–161.

Wang, W., Fan, L., Li, Z., Zhou, P., Chen, X., 2021. Measuring dynamic competitive relationship and intensity among the global coal importing trade. Appl. Energy 303, 117611.

Wang, W., Fan, L.W., Zhou, P. 2022, Evolution of global fossil fuel trade dependencies, Energy 238, 121924

Xia M. 2017, Global LNG Supply and Demand Outlook (2017 - 2020), EMIN Master's thesis.

Xiao, R., Xiao, T., Zhao, P., Zhang, M., Ma, T., & Qiu, S. 2024. Structure and resilience changes of global liquefied natural gas shipping network during the Russia–Ukraine conflict. *Ocean and Coastal Management*, *252*.

Xu J., Li J., Charles V., Zhao X. 2024, Evolution of the rare earth trade network: A perspective of dependency and competition, Geoscience Frontiers 15 (2024): 101653

Yang Y., Poon J.P., Liu Y., Bagchi-Sen S. 2015, Small and flat worlds: A complex network analysis of international trade in crude oil. Energy 2015, 93, 534–543

Zhang, H., Ji, Q., Fan, Y., 2014. Competition, transmission, and pattern evolution: a network analysis of global oil trade. Energy Pol. 73, 312–322.

Zhang, H., Wang, X., Tang, J., Guo, Y., 2022. The impact of international rare earth trade competition on global value chain upgrading from the industrial chain perspective. Ecol. Econ. 198, 107472.

Zhong W., An H., Fang W., Gao X., Dong D. 2016, Features, and evolution of international fossil fuel trade network based on value of emergy. Appl. Energy 165, 868–877

Zhang, H. Y., Xi, W. W., Ji, Q., & Zhang, Q. 2018. Exploring the driving factors of global LNG trade flows using gravity modelling. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 508–515.

Zhong, W., An, H., Shen, L., Dai, T., Fang, W., Gao, X., Dong, D., 2017. Global pattern of the international fossil fuel trade: the evolution of communities. Energy 123, 260–270.

Zhu K., Hao L., Zhao Y. 2023, Research on the evolution and influence mechanism of international liquefied natural gas import competition pattern, Journal of Cleaner Production 414: 137602

Παράρτημα Α Πίνακας δικτύου

Δίκτυο έτους 2018

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																									
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire						330							134								400				
Marseille Fos Port							140						236		80								163		
Livorno																									
- *																									
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam							835								140						70				
Delfzijl																									
Sines						70		70																	
Zeebrugge																									
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	817	98	131				20					3273	46		597			96		100			627		
ANG	67											70	70					139			60				
CAM			57										60												
EGY								120				277	90												
NIG	689		59	1957	355			60			2406	254													
NOR	32				309	90			110	561		548						580				254		511	140
TRI	215		174	570	611			421				53													
USA	62				65		7	474	319	222	134	312	48					299		381		66	73		
QAT	1544	57	179	600	90			2140		267	91	413		4580				276		699	1550	1657	63		
PER	396	61	105	308	400			60			75	137						230							
RUS	73				283		46	221	38	154	1666							1975							
GEQ							60						130												
ARG																									
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
	3895	216	705	3435	2113	490	1108	3566	467	1204	4372	5337	814	4580	817	0	0	3595	0	1180	2080	1977	926	511	140

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										864
																										619
40																										40
																										0
40																										40
																										0
																										0
																										1045
																										0
																										140
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										5805
																										406
																										117
																										487
																										5780
	3	4			121																					3263
120																										2164
																										2462
																										14206
40																										1812
																										4456
40																										230
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
280	3	4	0	0	121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Δίκτυο έτους 2019

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona													55												
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																					250				
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire																									
Marseille Fos Port							720						408												
Livorno																									
- *																									
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam																									71
Delfzijl																									
Sines																									
Zeebrugge						543									60								130	138	64
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	470	136	55	66		69			11		65	3743	147		1635			138		55			379		
ANG	67				133			70				208						200			70		70		
CAM	63							60																	
EGY												322	343								110		185		
NIG	675	128	184	1777	242	133		247		208	2497	281	70					242		2369			320		
NOR	122		57		306	65	42	87	121	7	558	515	120					430				120	400	990	29
TRI	177	146	261	277	1028	171		683	7	72		120	132	251	697			58		110			18		
USA	678	336	159	945	902	155	741	1270	389	601	700	714	1095					1419		950		670	171	69	
QAT	1517	655	594	384	60		332	332		689		657	61	4613				93		486	3320	1655	400		
PER	73			65	129	71		210		225		64						340							
RUS	145	139		205	992	236	34	83	2263	1952	3088							3070		143	2435			127	16
GEQ	62						133	57					61					45							
ARG																									
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
	4049	1540	1310	3719	3792	1443	2002	3099	2791	3754	6908	6624	2492	4864	2392	0	0	6035	0	4113	6185	2445	2073	1324	180

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	
																										55
																										0
																										0
																										0
60																										60
																										0
																										250
																										0
																										0
																										0
																										0
																										1128
43																										43
																										0
																										0
																										0
																										0
		29																								100
																										0
																										0
		60																								995
																										0
11																										11
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										6969
																										818
																										123
																										960
																										9373
		1		67	52																					4089
250																										4458
																										11964
																										15848
																										1177
	31																									14959
																										358
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
364	31	90	0	67	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Δίκτυο έτους 2020

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao											66														
Ferrol																									
London																									
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire						355														65			70		
Marseille Fos Port	100							30					30					60					55		
Livorno																									
- *				75								50													
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam					15																20				70
Delfzijl																									
Sines																									
Zeebrugge							1680											480				35		110	75
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	99	66	106	98							61	3044	200		1909					59			194		
ANG	134			67	65					67		70	60					200		66					
CAM																									
EGY			63					140				4	14										50		
NIG	179	445	371	1339	406	228		260		183	1758	253	139					289		2276		61	163		
NOR	121			184	59		15	224	59	416		116						484		60		254	63	753	68
TRI	234	58	127	66	716	352		735		188	64	63		58				254		59		58			
USA	549	266	973	1098	712	196	1080	1941	335	856	652	517	1566					1699		780	1025	665	993	366	
QAT	1236	408	408	121			2500	4029		269	305	758		5172				185		213	1840	1742	540		
PER			66	57	66													76							
RUS	141	72	78	72	1196	709		386		990	2923							2101		425	2990			216	74
GEQ	189			57	315	138									60			69		61					
ARG	55			65																					
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
	3037	1315	2192	3299	3550	1978	5275	7745	394	2969	5829	4875	2009	5230	1969	0	0	5897	0	4064	5875	2815	2128	1445	287

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	
																										0
																										0
																										0
																										0
																										66
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										490
100																										375
																										0
																										125
																										0
																										0
																										0
		8																								113
																										0
																										0
		115																								2495
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										5836
																										729
																										0
																										271
																										8350
		2		56	43																					2977
220																										3252
																										16269
																										19726
																										265
	14	10			3																					12400
																										889
																										120
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
320	14	135	0	56	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Δίκτυο έτους 2021

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																									
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque			180																		115				
Nantes Saint-Nazaire																									
Marseille Fos Port							620								30						60		30		
Livorno																									
- *																									
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam																									75
Delfzijl																									
Sines															320								50		
Zeebrugge							1700																		
Swinoujscie																								30	
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	224	741	401	182						71		4059	209		692	8		60					329		
ANG	204			60														270					65		
CAM																									
EGY		70	123			59						169	6	132		52					60		75	66	
NIG	328	289	796	1441	122	258		60			1732	676					190	135		2162					
NOR																									101
TRI	55	65	166	116	331	66		110					110					70						110	
USA	611	528	368	1229	639	474	6	1794	1110	1534	579	874	134	207				3182		1513		1123	778	620	466
QAT	1054	94	455		120			4255				526		4827				92		241	2060	1749	315		
PER	32	57					390	234		77								180							
RUS		72		141	1276	787	30	717		1380	2438	12						2158		572	2810			227	97
GEQ		58	71	64	325	61												69						65	
ARG																									
AUS	28		30																						
PNG	11																								
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
	2547	1974	2590	3233	2813	1705	2746	7170	1110	3062	4749	6316	459	5166	1042	60	190	6216	0	4488	5105	2872	1642	1118	739

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
						60																				355
																										0
																										740
																										0
						120																				120
																										0
																										0
																										0
																										75
																										0
																										370
																										1700
																										30
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										6976
																										599
																										0
																										812
						130																				8319
	60	95		65	64																					385
190						60																				1449
100	38					720																				18627
																										15788
																										970
	29	161		76	4																					12987
																										713
																										0
																										58
																										11
																										0
																										0
																										0
																										0
290	127	256	0	141	68	1090	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Δίκτυο έτους 2022

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona							20																		
Valencia																									
Cartagena																					60				
Huelva																							13		
Bilbao																									
Ferrol																									
London																									
Milford Haven											320														
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire							310	340													70				
Marseille Fos Port																									
Livorno																							34		
- *																									
La Spezia																							25		
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam							125				140										11				60
Delfzijl																									
Sines																					40		72		
Zeebrugge	270						1120				3770		70											70	
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																					90			375	
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	272	33	119					310		139		2931	148		907	4		264		22			334		13
ANG		68			135			127		209	1000			70				674							
CAM		141		68						71		70						225			140				
EGY		60	41		262			53		65	395	111	75	22	121	260		379			140	65	349		
NIG	645	619	1149	1113	318	251		181		206	575	328	68				50	72		2134		130	205		
NOR			41		62		14	437	47	294	460		34	62				586		27			65	514	240
TRI	189	125		184	253	60	170	62	14	267	30		150	89				370		360		71			
USA	1012	1874	1445	2037	1515	433	4568	4507	38	6609	4000	562	497	533	500	710		7190	788	1528	1580	2438	1334	1185	225
QAT	809	189		63	64			4782		115		1355		4627				93			5010	1650			
PER				55	71		550	1152		71															
RUS	138	280	278	350	1419	980	14	77		1461		12		71				1797		215	6450		144	44	12
GEQ		60	66		262							130	170	68				211		111					
ARG																									
AUS	50																	78							
PNG																									
UAE										63															
OMA	64	189		63	64					67				70				34					69		
INA												70											40		
MOZ					35																				
	3449	3638	3139	3933	4460	1724	6891	12028	99	9637	10690	5569	1212	5612	1528	974	50	11973	788	4397	13591	4354	2684	2188	550

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	
																										20
																										0
		25																								85
																										13
																										0
																										0
																										0
																										320
																										0
																										0
																										720
																										0
																										34
						70																				70
																										25
																										0
																										0
																										336
																										0
110																										222
			150																							5450
																										0
																										0
																										0
																										465
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										0
																										5496
																										2283
																										715
						20																				2418
																										8044
	9	4		55	46																					2997
240																										2634
						1540																				48648
																										18757
																										1899
	7	39			11																					13799
																										1078
																										0
																										128
																										0
																										63
																										620
																										110
																										35
350	16	68	150	55	57	1630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Παράρτημα Β Πίνακας δικτύου με chokepoints

Δίκτυο έτους 2018

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																									
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire						330															400				
Marseille Fos Port													236		80								163		
Livorno																									
- *																									
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam							835														70				
Delfzijl																									
Sines						70		70																	
Zeebrugge																									
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	817	98	131									3273	46		597								627		
ANG																		139			60				
CAM																									
EGY												277	90												
NIG				1957	355			60			2406														
NOR					309	90			110	561								580				254		511	140
TRI				570	611			421																	
USA					65		7	474	319	222	134							299		381		66			
QAT																									
PER																									
RUS					283		46	221	38	154	1666							1975							
GEQ							60																		
ARG																									
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
Suez	1544	57	179									413	0	4580	0	0	0						63		
Hormuz																									
Sunda																									
Panama				308	400	0	0	60	0	0	75							230	0	0	0	0		0	0
Gibraltar	1534	61	395	600	90	0	160	2260	0	267	91	1374	442	0	140	0	0	372	0	799	1550	1657	73	0	0
	3895	216	705	3435	2113	490	1108	3566	467	1204	4372	5337	814	4580	817	0	0	3595	0	1180	2080	1977	926	511	140

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	Suez	Hormuz	Sunda	Panama	Gibraltar	
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														134	864
																														140	619
40																														0	40
																														0	0
40																														0	40
																														0	0
																														0	0
																														140	1045
																														0	0
																														0	140
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														216	5805
																														207	406
																														117	117
																														120	487
																														1002	5780
	3	4			121																									580	3263
																														562	2164
																														495	2462
																											14206				14206
																													1812		1812
																														73	4456
																														170	230
																														0	0
																										0					0
																												0			0
																											0				0
																										0					0
																												0			0
																										0					0
0						0																								7370	14206
																										14206					14206
																										0					0
	0	0	0	0	0																									739	1812
200	0	0	0	0	0	0																									12065
280	3	4	0	0	121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14206	14206	0	1812	12065	

Δίκτυο έτους 2019

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona													55												
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																					250				
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire																									
Marseille Fos Port													408												
Livorno																									
- *																									
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam																									71
Delfzijl																									
Sines																									
Zeebrugge						543																		138	64
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	470	136	55									3743	147		1635								379		
ANG					133			70										200			70				
CAM								60																	
EGY												322	343										185		
NIG				1777	242	133		247		208	2497							242		2369					
NOR					306	65	42	87	121	7	558							430				120		990	29
TRI				277	1028	171		683	7	72								58		110					
USA				945	902	155	741	1270	389	601	700							1419		950		670		69	
QAT																									
PER																									
RUS				205	992	236	34	83	2263	1952	3088							3070		143	2435			127	16
GEQ							133	57										45							
ARG																									
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
Suez	1517	655	594									657	61	4613	0	0	0						400		
Hormuz																									
Sunda																									
Panama				65	129	71	0	210	0	225	0							340	0	0	0	0		0	0
Gibraltar	2062	749	661	450	60	69	1052	332	11	689	65	1902	1478	251	757	0	0	231	0	541	3430	1655	1109	0	0
	4049	1540	1310	3719	3792	1443	2002	3099	2791	3754	6908	6624	2492	4864	2392	0	0	6035	0	4113	6185	2445	2073	1324	180

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	Suez	Hormuz	Sunda	Panama	Gibraltar	
																														0	55
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														60	60
																														0	0
																														0	250
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														720	1128
43																														0	43
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
		29																												0	100
																														0	0
																														0	0
		60																												190	995
																														0	0
11																														0	11
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														404	6969
																														345	818
																														63	123
																														110	960
																														1658	9373
		1		67	52																									1214	4089
																														2052	4458
																														3153	11964
																											15848				15848
																													1177		1177
	31																													284	14959
																														123	358
																														0	0
																										0					0
																												0			0
																											0				0
																										0					0
																												0			0
																										0					0
0						0																								7351	15848
																										15848					15848
																										0					0
	0	0	0	0	0																									137	1177
310	0	0	0	0	0	0																									17864
364	31	90	0	67	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15848	15848	0	1177	17864	

Δίκτυο έτους 2020

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao											66														
Ferrol																									
London																									
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire						355														65					
Marseille Fos Port	100												30										55		
Livorno																									
- *												50													
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam					15																20				70
Delfzijl																									
Sines																									
Zeebrugge							1680											480				35		110	75
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	99	66	106									3044	200		1909								194		
ANG				67	65					67								200		66					
CAM																									
EGY			63									4	14										50		
NIG				1339	406	228		260		183	1758							289		2276		61			
NOR				184	59		15	224	59	416								484		60		254		753	68
TRI				66	716	352		735		188	64							254		59		58			
USA				1098	712	196	1080	1941	335	856	652							1699		780	1025	665		366	
QAT																									
PER																									
RUS				72	1196	709		386		990	2923							2101		425	2990			216	74
GEQ				57	315	138												69		61					
ARG				65																					
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
Suez	1236	408	408									758	0	5172	0	0	0						540		
Hormuz																									
Sunda																									
Panama				57	66	0	0	0	0	0	0							76	0	0	0	0		0	0
Gibraltar	1602	841	1615	294	0	0	2500	4199	0	269	366	1019	1765	58	60	0	0	245	0	272	1840	1742	1289	0	0
	3037	1315	2192	3299	3550	1978	5275	7745	394	2969	5829	4875	2009	5230	1969	0	0	5897	0	4064	5875	2815	2128	1445	287

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	Suez	Hormuz	Sunda	Panama	Gibraltar	
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	66
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														70	490
100																														90	375
																														0	0
																														75	125
																														0	0
																														0	0
																														0	0
		8																												0	113
																														0	0
																														0	0
		115																												0	2495
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														218	5836
																														264	729
																														0	0
																														140	271
																														1550	8350
		2		56	43																									300	2977
																														760	3252
																														4864	16269
																											19726				19726
																													265		265
	14	10			3																									291	12400
																														249	889
																														55	120
																										0					0
																												0			0
																											0				0
																										0					0
																												0			0
																										0					0
0						0																								11204	19726
																										19726					19726
																										0					0
	0	0	0	0	0																									66	265
220	0	0	0	0	0	0																									20196
320	14	135	0	56	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19726	19726	0	265	20196	

Δίκτυο έτους 2021

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																									
Milford Haven																									
Tees																									
Dunkerque																					115				
Nantes Saint-Nazaire																									
Marseille Fos Port															30								30		
Livorno																									
- *																									
La Spezia																									
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam																									75
Delfzijl																									
Sines																									
Zeebrugge							1700																		
Swinoujscie																								30	
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																									
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	224	741	401									4059	209		692	8							329		
ANG				60														270							
CAM																									
EGY		70	123									169	6	132		52							75		
NIG				1441	122	258		60			1732							135		2162					
NOR																									101
TRI				116	331	66		110										70						110	
USA				1229	639	474	6	1794	1110	1534	579							3182		1513		1123		620	466
QAT																									
PER																									
RUS				141	1276	787	30	717		1380	2438							2158		572	2810			227	97
GEQ				64	325	61												69						65	
ARG																									
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
Suez	1093	94	485									526	0	4827	0	0	0						315		
Hormuz																									
Sunda																									
Panama				0	0	0	390	234	0	77	0							180	0	0	0	0		0	0
Gibraltar	1230	1069	1581	182	120	59	620	4255	0	71	0	1562	244	207	320	0	190	152	0	241	2180	1749	893	66	0
	2547	1974	2590	3233	2813	1705	2746	7170	1110	3062	4749	6316	459	5166	1042	60	190	6216	0	4488	5105	2872	1642	1118	739

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	Suez	Hormuz	Sunda	Panama	Gibraltar	
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														240	355
																														0	0
																														680	740
																														0	0
						120																								0	120
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	75
																														0	0
																														370	370
																														0	1700
																														0	30
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														313	6976
																														269	599
																														0	0
																														185	812
																														2409	8319
	60	95		65	64																									0	385
																														646	1449
	38																													4320	18627
																											15788				15788
																													970		970
	29	161		76	4																									84	12987
																														129	713
																														0	0
																										58					58
																												11			11
																											0				0
																										0					0
																												0			0
																										0					0
0						0																								8517	15857
																										15788					15788
																										11					11
	0	0	0	0	0																									89	970
290	0	0	0	0	0	970																									18251
290	127	256	0	141	68	1090	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15857	15788	11	970	18251	

Δίκτυο έτους 2022

Από\Προς	Barcelona	Valencia	Cartagena	Huelva	Bilbao	Ferrol	London	Milford Haven	Tees	Dunkerque	Nantes Saint-Nazaire	Marseille Fos Port	Livorno	- *	La Spezia	Ravenna	Oristano	Rotterdam	Delfzijl	Sines	Zeebrugge	Swinoujscie	Megara	Klaipeda	Nynashamn/Lysekil
Barcelona																									
Valencia																									
Cartagena																									
Huelva																									
Bilbao																									
Ferrol																									
London																									
Milford Haven											320														
Tees																									
Dunkerque																									
Nantes Saint-Nazaire							310	340													70				
Marseille Fos Port																									
Livorno																							34		
- *																									
La Spezia																							25		
Ravenna																									
Oristano																									
Rotterdam							125				140										11				60
Delfzijl																									
Sines																					40				
Zeebrugge							1120				3770													70	
Swinoujscie																									
Megara																									
Klaipeda																									
Nynashamn/Lysekil																					90			375	
Marsaxlokk																									
Tornio																									
Pori																									
Hamina Kotka																									
Mosjoen																									
Frederikstad																									
Bakar																									
ALG	272	33	119									2931	148		907	4							334		
ANG					135			127		209	1000							674							
CAM				68						71								225			140				
EGY		60	41									111	75	22	121	260							349		
NIG				1113	318	251		181		206	575							72		2134		130			
NOR					62		14	437	47	294	460							586		27				514	240
TRI				184	253	60	170	62	14	267	30							370		360		71			
USA				2037	1515	433	4568	4507	38	6609	4000							7190	788	1528	1580	2438		1185	225
QAT																									
PER																									
RUS				350	1419	980	14	77		1461								1797		215	6450			44	12
GEQ					262													211		111					
ARG																									
AUS																									
PNG																									
UAE																									
OMA																									
INA																									
MOZ																									
Suez	923	378	0									1425	0	4697	0	0	0						109		
Hormuz																									
Sunda																									
Panama				55	71	0	550	1152	0	71	0							0	0	0	0	0		0	0
Gibraltar	2254	3167	2979	126	425	0	20	5145	0	449	395	1102	989	893	500	710	50	848	0	22	5210	1715	1833	0	13
	3449	3638	3139	3933	4460	1724	6891	12028	99	9637	10690	5569	1212	5612	1528	974	50	11973	788	4397	13591	4354	2684	2188	550

Marsaxlokk	Tornio	Pori	Hamina Kotka	Mosjoen	Frederikstad	Bakar	ALG	ANG	CAM	EGY	NIG	NOR	TRI	USA	QAT	PER	RUS	GEQ	ARG	AUS	PNG	UAE	OMA	INA	MOZ	Suez	Hormuz	Sunda	Panama	Gibraltar	
																														20	20
																														0	0
																														85	85
																														13	13
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	320
																														0	0
																														0	0
																														0	720
																														0	0
																														0	34
						70																								0	70
																														0	25
																														0	0
																														0	0
																														0	336
																														0	0
																														182	222
			150																											340	5450
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	465
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														0	0
																														748	5496
																														138	2283
																														211	715
						20																								1359	2418
																														3064	8044
	9	4		55	46																									202	2997
																														793	2634
																														10007	48648
																											18757				18757
																													1899		1899
	7	39			11																									923	13799
																														494	1078
																														0	0
																										128					128
																												0			0
																											63				63
																										620					620
																												110			110
																										35					35
0						0																								12181	19713
																										18820					18820
																										110					110
	0	0	0	0	0																									0	1899
350	0	25	0	0	0	1540																									30760
350	16	68	150	55	57	1630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19713	18820	110	1899	30760	