



Ενίσχυση της ανθεκτικότητας για τα ελληνικά λιμάνια (ResPorts)

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ Π3.4

Π3.4 Αξιολόγηση και Ιεράρχηση τρωτότητας Λιμένων και ανάπτυξη εργαλείου
“Resilience Estimator”



ResportsP



ResPorts Project



Χρηματοδοτικό Πρόγραμμα
«ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ &
ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ
2022» / Άξονας
Προτεραιότητας 3 «ΕΡΕΥΝΑ
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ»



ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ	
Ακρωνύμιο:	ResPorts
Τίτλος στα Ελληνικά:	Ενίσχυση ανθεκτικότητας για τα ελληνικά λιμάνια
Τίτλος στα Αγγλικά:	Enhancing the Resilience for Greek Ports
Συντονιστής της Ε.Υ.:	Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Ιστότοπος:	https://resports.stt.aegean.gr
Διάρκεια:	30 μήνες

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΔΟΤΕΟΥ	
Αριθμός και Τίτλος Παραδοτέου:	Π3.4 Αξιολόγηση και Ιεράρχηση τρωτότητας Λιμένων και ανάπτυξη εργαλείου “Resilience Estimator”
Αριθμός και Τίτλος Πακέτου Εργασίας	ΠΕ3 Προβλέψεις Κλιματικών Κινδύνων και Αξιολόγηση πιθανών επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής στους λιμένες
Είδος Παραδοτέου:	Π3.4 Εργαλείο
Υπεύθυνος Εταίρος:	Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών σε συνεργασία με το Τμήμα Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Συγγραφείς:	Α. Πολυδωροπούλου, Α. Βελεγράκης, Ο. Σχινάς, Δ. Χατζηστρατής, Α. Νικολάου, Ι. Μονιούδη, Κ. Σταθάκη, Ε. Ντάβας, Κ. Μοσχόπουλος, Α. Χατζηπαυλής
Ημερομηνία Υποβολής:	12/04/2025

Το ερευνητικό έργο με τίτλο «Ενίσχυση της ανθεκτικότητας για τα ελληνικά λιμάνια – ResPorts υλοποιείται στο πλαίσιο του Προγράμματος «Φυσικό Περιβάλλον & Καινοτόμες Δράσεις 2022/ Άξονας Προτεραιότητας 3 «Έρευνα και Εφαρμογή», με συνολικό προϋπολογισμό 199.647,00 Ευρώ. Το έργο χρηματοδοτείται από το Πράσινο Ταμείο με Δικαιούχο το Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου



ΠΡΑΣΙΝΟ ΤΑΜΕΙΟ



Χρηματοδοτικό Πρόγραμμα «ΦΥΣΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ
2022» / Άξονας Προτεραιότητας 3
«ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ»



Περιεχόμενα

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΛΙΜΕΝΩΝ	8
2 ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑΣ/ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΛΙΜΕΝΩΝ	16
2.1 ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑ/ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ	16
2.2 ΙΕΡΑΡΧΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ	17
2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	25
3 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	30
4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	31



Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση των τιμών των πέντε (5) κριτηρίων για τους λιμένες Χίου, Βόλου και Ηρακλείου βάσει της ΑΗΡ που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο των Living Labs του έργου ResPorts	10
Σχήμα 2. Ιεραρχικό πλαίσιο ταξινόμησης της κρισιμότητας/τρωτότητας των λιμένων σε περιφερειακή κλίμακα.	17
Σχήμα 3. Ιεραρχική δόμηση προβλήματος.	19
Σχήμα 4 Ιεραρχικό δέντρο ΑΗΡ.	19
Σχήμα 5. Στάδια εφαρμογής μεθόδου TOPSIS.....	21
Σχήμα 6. Ιεραρχία κριτηρίων	26
Σχήμα 7. (α) Οι ελληνικοί λιμένες. (b) Βαθμολογίες κατάταξης των 137 λιμένων (μέθοδος TOPSIS) σύμφωνα με την κοινωνικο-οικονομική τους αξία. Οι 15 πρώτοι στην κατάταξη λιμένες φαίνονται με κόκκινο χρώμα.	27
Σχήμα 8. (α) Οι θέσεις των 15 επιλεγμένων λιμένων οι οποίοι απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και (b) η κατάταξη τους (μέθοδος POMETHEE II) βάσει της κρισιμότητας/τρωτότητάς τους υπό ιστορικές και μελλοντικές συνθήκες.....	28



Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για το λιμένα Χίου	12
Πίνακας 2. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για το λιμένα Βόλου	13
Πίνακας 3. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για το λιμένα Ηρακλείου	14
Πίνακας 4. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για τυχαίο λιμένα	15
Πίνακας 5. Θεμελιώδης κλίμακα απολύτων αριθμών του Saaty (Mateo, 2012).	19
Πίνακας 6. Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων.....	20
Πίνακας 7. Πλήθος στοιχείων ιδιοδιανυσμάτων	20
Πίνακας 8. Βάρη που ανατέθηκαν στους δείκτες/κριτήρια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ΑΗΡ κατά τα δύο στάδια της ιεράρχησης.	26
Πίνακας 9. Βαθμολογίες κατάταξης (ανάλυση PROMETHEE II) των 15 επιλεγμένων λιμένων, ως προς την κρισιμότητα/τρωτότητα τους. Η θετική βαθμολογία εκφράζει πώς μια εναλλακτική λύση υπερτερεί όλων των άλλων, ενώ η αρνητική βαθμολογία εκφράζει πώς μια εναλλακτική λύση ξεπερνιέται από όλες τις άλλες.	28





Χρηματοδοτικό Πρόγραμμα «ΦΥΣΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ
2022» / Άξονας Προτεραιότητας 3
«ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ»



Εκτενής Περίληψη

Σύμφωνα με το Τεχνικό Δελτίο του έργου η δράση 3.4 με τίτλο «Αξιολόγηση και Ιεράρχηση τρωτότητας Λιμένων και ανάπτυξη εργαλείου “Resilience Estimator”» αφορά στην αξιολόγηση των επιπτώσεων της της Κλιματικής Αλλαγής (ΚΑ) στους λιμένες. Για το λόγο αυτό στο πλαίσιο των Living Labs που πραγματοποιήθηκαν στις λιμενικές εγκαταστάσεις των λιμένων Χίου, Βόλου και Ηρακλείου, συμμετείχαν ομάδες εστίασης με ειδικούς της λιμενικής βιομηχανίας. Σε αυτές τις συναντήσεις αναπτύχθηκε διαδικτυακό ερωτηματολόγιο κάνοντας χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (ΑΗΡ) για την αξιολόγηση της σχετικής σημασίας των επιπτώσεων, και για τη βελτιστοποίηση και τελική ανάθεση των συντελεστών βαρύτητας τους (παραδοτέο Π3.2). Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι λαμβάνει υπόψιν την κρίση των ερωτώμενων κατά ισότιμο τρόπο, με διαφάνεια και συνδυάζοντας αντικρουόμενους στόχους. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία των “10 Climate Change Priorities”, σε αντιστοιχία με τα “10 Environmental Priorities” for ECO Ports”.

Η δράση περιλάμβανε δύο διακριτές αλλά συμπληρωματικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις:

- Η πρώτη μέθοδος επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός δείκτη ανθεκτικότητας μέσω των Ζωντανών Εργαστηρίων που πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένους λιμένες, αναλύοντας επιμέρους δείκτες (υποδομές, διακυβέρνηση, ψηφιακή επάρκεια, κ.ά.) και καταλήγοντας σε ψηφιακό εργαλείο το οποίο δύναται να υπολογίσει το προφίλ ανθεκτικότητας εκάστου λιμένα, με στόχο την υποστήριξη τοπικών στρατηγικών βελτίωσης.
- Η δεύτερη μέθοδος αφορούσε την ιεράρχηση της κρισιμότητας και τρωτότητας των λιμένων σε εθνικό επίπεδο. Αυτή εφαρμόστηκε σε δύο στάδια. Αρχικά, γίνεται ταξινόμηση όλων των λιμένων βάση των κοινωνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών τους (π.χ. μέγεθος, διακινήσεις, συνδεσιμότητα, (Δ2.1 Δ2.2, Δ3.3), ώστε από το σύνολο τους να επιλεγούν οι πιο κρίσιμοι για περαιτέρω ανάλυση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται η ΑΗΡ για να αποδοθούν βάρη στα κριτήρια και η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), που είναι καταλληλότερη για την ανάλυση μεγάλου αριθμού λιμένων και κριτηρίων. Στη συνέχεια ακολουθούν και άλλες πολυκριτηριακές αναλύσεις (ΑΗΡ, PROMETHEE), συνεκτιμώντας την κοινωνικο-οικονομική σημασία των λιμένων και την έκθεση τους στους κλιματικούς κινδύνους (Δ3.1 και Δ3.2), για την τελική ιεράρχηση της τρωτότητας των 10-15 πιο κρίσιμων λιμένων.

Τέλος, αναπτύχθηκε εργαλείο αξιολόγησης/ ιεράρχησης τρωτότητας ως υποσύνολο του Συστήματος Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (ΣΥΛΑ).



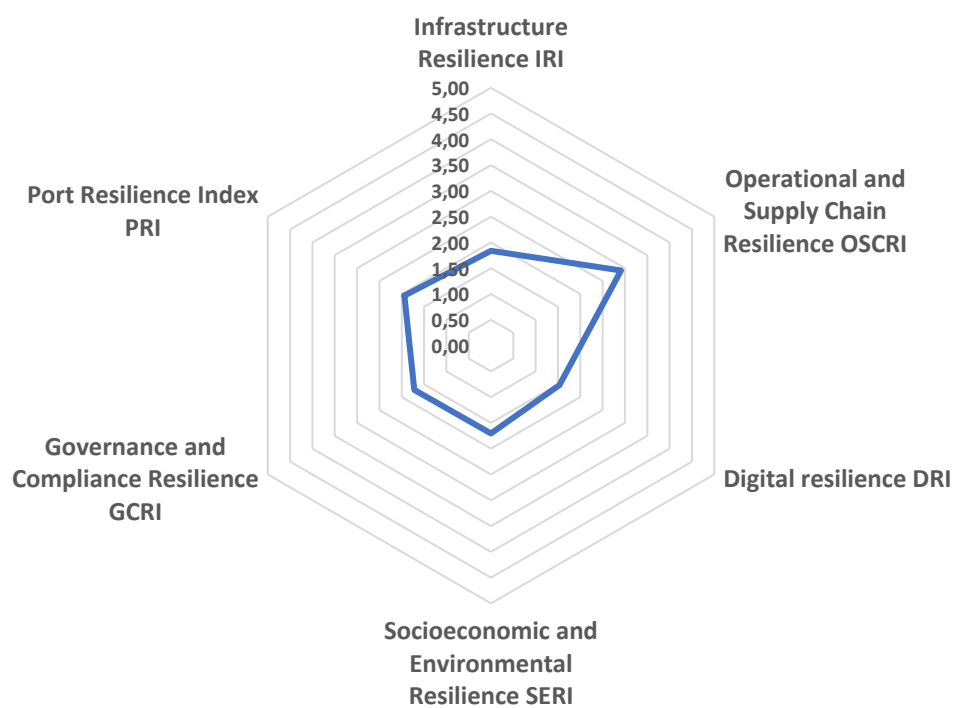
1 Αξιολόγηση Ανθεκτικότητας Λιμένων

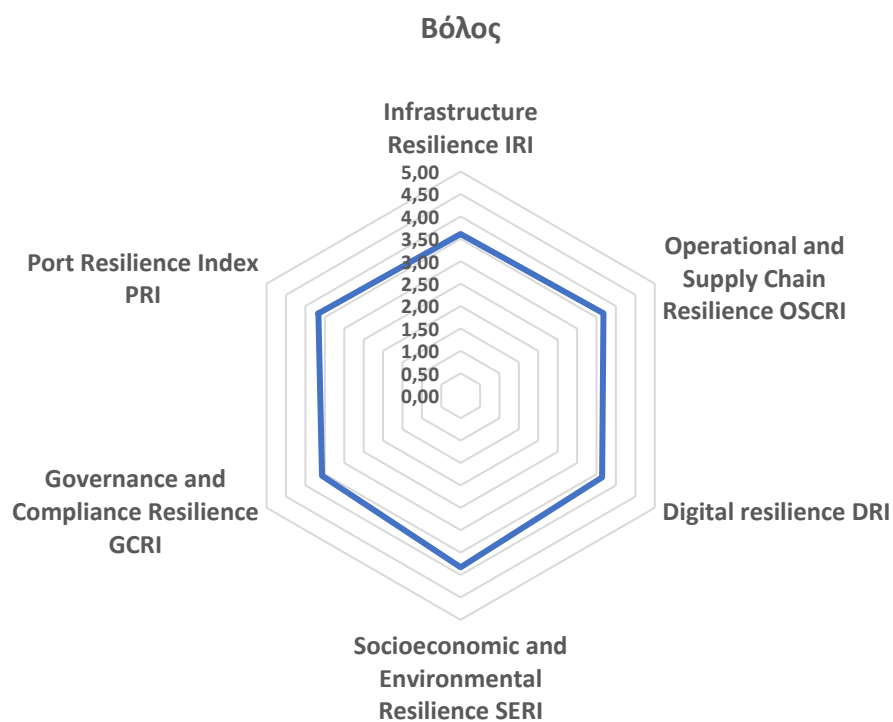
Η αξιολόγηση των λιμένων αναφορικά με την ανθεκτικότητά τους έναντι των επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής βασίστηκε στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP – Analytic Hierarchy Process). Το Σχήμα 1 παρουσιάζει τον Δείκτη Ανθεκτικότητας των λιμένων Χίου, Βόλου και Ηρακλείου. Η χρήση της AHP κατά τη διάρκεια των Living Labs στους τρεις (3) λιμένες των νήσων Χίου και Ηρακλείου καθώς και του ηπειρωτικού λιμένα της πόλης του Βόλου, σε συνδυασμό με την ανάλυση των συλλεχθέντων δεδομένων κατέδειξε τις εξής τιμές βαρών για τα κριτήρια και υποκριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν/ αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του έργου ResPorts (Πίνακες 1-3).

Από το Σχήμα 1, εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα για τον Δείκτη Ανθεκτικότητας των τριών λιμένων, τόσο επιμέρους όσο και συνολικά. Για το λιμένα Χίου προκύπτει ότι ο δείκτης με την υψηλότερη τιμή είναι η Λειτουργική και Εφοδιαστική Ανθεκτικότητα (OSCRI), η οποία αγγίζει περίπου το 2,8, υποδεικνύοντας ότι η Χίος διαθέτει ισχυρή ανθεκτικότητα στη λειτουργία και τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αντίθετα, ο τομέας με τη χαμηλότερη τιμή είναι η Κοινωνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα (SERI), η οποία βρίσκεται κάτω από το 1,0, γεγονός που υποδηλώνει σημαντικές προκλήσεις στον κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό τομέα. Η Ψηφιακή Ανθεκτικότητα (DRI) είναι επίσης χαμηλή, περίπου στο 1,0, δείχνοντας ότι η Χίος υστερεί σε ψηφιακές υποδομές και τεχνολογική ετοιμότητα. Οι υπόλοιποι δείκτες βρίσκονται σε μέτρια επίπεδα. Συγκεκριμένα, η Ανθεκτικότητα Υποδομών (IRI) βρίσκεται κοντά στο 1,8, δείχνοντας επαρκή αλλά βελτιώσιμη αντοχή των υποδομών του νησιού, ενώ ο Δείκτης Ανθεκτικότητας Λιμανιού (PRI) καταγράφεται περίπου στο 1,5, υποδηλώνοντας μια μέτρια απόδοση του λιμανιού ως προς την ανθεκτικότητά του. Η Ανθεκτικότητα στη Διακυβέρνηση και Συμμόρφωση (GCRI) καταγράφεται γύρω στο 1,2, αποκαλύπτοντας την ανάγκη για βελτιώσεις σε θέματα διακυβέρνησης και συμμόρφωσης με κανονισμούς. Συνολικά, η Χίος φαίνεται να διαθέτει ισχυρή ανθεκτικότητα σε σχέση με τη λειτουργία και την εφοδιαστική αλυσίδα, ενώ αντιμετωπίζει προκλήσεις στους τομείς της ψηφιακής ανάπτυξης και της κοινωνικοοικονομικής και περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας. Για την ενίσχυση της συνολικής ανθεκτικότητας του λιμένα του νησιού, θα ήταν σκόπιμο να δοθεί προτεραιότητα σε επενδύσεις σε ψηφιακές υποδομές, καθώς και σε πολιτικές που ενισχύουν την κοινωνική και οικονομική ευημερία.



Χίος





Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση των τιμών των πέντε (5) κριτηρίων για τους λιμένες Χίου, Βόλου και Ηρακλείου βάσει της ΑΗΡ που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο των Living Labs του έργου ResPorts

Για το λιμένα Βόλου ο δείκτης με τη χαμηλότερη τιμή είναι η Κοινωνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα (SERI), η οποία βρίσκεται στο 3,40, όμως, αν και χαμηλότερη από τους υπόλοιπους δείκτες, εξακολουθεί να είναι σε αρκετά καλό επίπεδο. Αντίθετα, η Ανθεκτικότητα Υποδομών (IRI) έχει την υψηλότερη τιμή, αγγίζοντας το 3,90, κάτι που υποδηλώνει ότι ο Βόλος εκτιμάται ότι διαθέτει ισχυρές και ανθεκτικές υποδομές. Οι υπόλοιποι δείκτες κινούνται σε παρόμοια επίπεδα. Η Λειτουργική και Εφοδιαστική Ανθεκτικότητα (OSCRI), η Ψηφιακή Ανθεκτικότητα (DRI), η Ανθεκτικότητα Διακυβέρνησης και Συμμόρφωσης (GCRI) και ο Δείκτης Ανθεκτικότητας Λιμανιού (PRI) βρίσκονται μεταξύ 3,50 και 3,70, κάτι που δείχνει ισορροπημένη ανθεκτικότητα σε αυτούς τους τομείς, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις. Συνολικά, ο Βόλος εμφανίζει υψηλή συνολική ανθεκτικότητα, με τις πιο ισχυρές επιδόσεις στις υποδομές, ενώ ο τομέας που απαιτεί τη μεγαλύτερη προσοχή είναι ο κοινωνικοοικονομικός και περιβαλλοντικός. Ο λιμένας φαίνεται να διαθέτει καλά οργανωμένες υποδομές, λειτουργικά δίκτυα και ικανοποιητική διακυβέρνηση, αλλά θα μπορούσε να επενδύσει περισσότερο σε πολιτικές που βελτιώνουν την κοινωνική, οικονομική και περιβαλλοντική της σταθερότητα.

Για το λιμένα Ηρακλείου, οι τιμές των κριτηρίων κινούνται από 2,5 έως 3,0, υποδηλώνοντας ένα συνολικά ισορροπημένο προφίλ ανθεκτικότητας. Δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών δεικτών, κάτι που δείχνει ότι η πόλη διαθέτει σχετικά ομοιογενή ανθεκτικότητα σε όλους τους τομείς. Ο δείκτης με την υψηλότερη τιμή είναι η Ανθεκτικότητα Υποδομών (IRI), η οποία φτάνει το 3,0, δείχνοντας ότι το Ηράκλειο διαθέτει ανθεκτικές και επαρκώς ανεπτυγμένες υποδομές. Σε παρόμοιο επίπεδο κινούνται και οι δείκτες Λειτουργικής και Εφοδιαστικής Ανθεκτικότητας (OSCRI), Ψηφιακής Ανθεκτικότητας (DRI) και Ανθεκτικότητας Λιμανιού (PRI), γεγονός που αποκαλύπτει μια καλή συνολική προσαρμοστικότητα σε θέματα λειτουργίας, τεχνολογίας και λιμενικών υποδομών. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στους δείκτες Κοινωνικοοικονομικής και Περιβαλλοντικής Ανθεκτικότητας (SERI) και Ανθεκτικότητας στη Διακυβέρνηση και Συμμόρφωση (GCRI), οι οποίοι βρίσκονται περίπου στο 2,5. Αυτό δείχνει ότι, αν και σε σχετικά καλό επίπεδο, η πόλη έχει περιθώρια βελτίωσης στους τομείς της κοινωνικής και περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας, καθώς και στη διακυβέρνηση και συμμόρφωση με κανονισμούς. Συνολικά, το Ηράκλειο παρουσιάζει μια σταθερή και ισορροπημένη ανθεκτικότητα, με ισχυρές επιδόσεις στις υποδομές, τη λειτουργικότητα και την τεχνολογία. Οι τομείς που θα μπορούσαν να ενισχυθούν περαιτέρω αφορούν την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, καθώς και την αποτελεσματικότητα της διακυβέρνησης.

Στη συνέχεια, μετά τους Πίνακες 1-3, ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα βάρη των κριτηρίων και υποκριτηρίων που προκύπτουν συνδυαστικά από τα βάρη των λιμένων Χίου, Βόλου και Ηρακλείου. Αποτελούν ένα δυνητικό profile το οποίο οι εκπρόσωποι των λιμενικών υποδομών της χώρας δύνανται να χρησιμοποιήσουν για να υπολογίσουν το δικό τους Δείκτη Ανθεκτικότητας.



Πίνακας 1. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για το λιμένα Χίου

Περιοχές Επιπτώσεων	Βάρη των ΠΕ	Κριτήρια	Βάρη των Κριτηρίων	Δείκτες	Βάρη των Δεικτών	Τελικά Βάρη
Ανθεκτικότητα Υποδομών	26,9%	Ανθεκτικότητα Φυσικών Υποδομών	39,5%	1 Ηλικία και κατάσταση κύριων υποδομών λιμένα (π.χ., τερματικοί σταθμοί, προβλήτες, γερανοί)	66%	0,07073
				2 Υποδομές ασφαλείας και συστημάτων εφεδρείας	34%	0,03569
		Ανθεκτικότητα στην Κλιματική Αλλαγή	60,5%	3 Προστασία από πλημμύρες και μέτρα προσαρμογής στο κλίμα	73%	0,11885
				4 Στάθμη της θάλασσας	27%	0,04418
Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα και Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	26,9%	Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα	46,9%	5 Διαθεσιμότητα σχεδίων εκτάκτου ανάγκης	46%	0,05771
				6 Διάρκεια διακοπής λειτουργίας του λιμανιού λόγω απρόβλεπτων γεγονότων	36%	0,04557
				7 Περιπτώσεις μείωσης όγκου φορτίου	18%	0,02273
		Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	53,1%	8 Προσβασιμότητα σε εναλλακτικούς τρόπους μεταφοράς (π.χ., σιδηροδρομικούς, οδικούς, αεροπορικούς)	100%	0,14290
Ψηφιακή Ανθεκτικότητα	10,3%	Ανθεκτικότητα στην Κυβερνοασφάλεια	50,3%	9 Μέτρα κυβερνοασφάλειας για την προστασία κρίσιμων συστημάτων	49%	0,02522
				10 Δυνατότητες ανταπόκρισης σε περιστατικά	51%	0,02646
		Ανθεκτικότητα στις Πληροφορίες και την Επικοινωνία	49,7%	11 Μηχανισμοί ανταλλαγής πληροφοριών με τις αρχές	33%	0,01702
				12 Εκπαίδευση προσωπικού για επικοινωνία εκτάκτου ανάγκης	67%	0,03413
Κοινωνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	25,0%	Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	34,5%	13 Πρακτικές περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και μέτρα ελέγχου ρύπανσης	100%	0,08644
		Οικονομική Ανθεκτικότητα	37,1%	14 Διαφοροποίηση των τύπων φορτίων και της βάσης πελατών	33%	0,03047
				15 Οικονομική σταθερότητα και ικανότητα απορρόφησης οικονομικών σοκ	67%	0,06245
				16 Εξωστρέφεια και σχέσεις με την κοινότητα	34%	0,02423
		Συμμετοχή Κοινότητας και Ενδιαφερόμενων Φορέων	28,4%	17 Συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών στη λήψη αποφάσεων	66%	0,04684
Ανθεκτικότητα Διακυβέρνησης	10,8%	Ρυθμιστική και Νομική Ανθεκτικότητα	100,0%	18 Νομικό πλαίσιο για την ευθύνη και την επίλυση διαφορών	37%	0,04025
				19 Ικανότητα του λιμένα να προσαρμόζεται σε αλλαγές των κανονισμών	63%	0,06813



Πίνακας 2. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για το λιμένα Βόλου

Περιοχές Επιπτώσεων	Βάρη των ΠΕ	Κριτήρια	Βάρη των Κριτηρίων	Δείκτες	Βάρη των Δεικτών	Τελικά Βάρη
Ανθεκτικότητα Υποδομών	27,5%	Ανθεκτικότητα Φυσικών Υποδομών	46,7%	1 Ηλικία και κατάσταση κύριων υποδομών λιμένα (π.χ., τερματικοί σταθμοί, προβλήτες, γερανοί)	50%	0,06419
				2 Υποδομές ασφαλείας και συστημάτων εφεδρείας	50%	0,06419
		Ανθεκτικότητα στην Κλιματική Αλλαγή	53,3%	3 Προστασία από πλημμύρες και μέτρα προσαρμογής στο κλίμα	82%	0,11962
				4 Στάθμη της θάλασσας	18%	0,02705
Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα και Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	19,1%	Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα	59,6%	5 Διαθεσιμότητα σχεδίων εκτάκτου ανάγκης	45%	0,05159
				6 Διάρκεια διακοπής λειτουργίας του λιμανιού λόγω απρόβλεπτων γεγονότων	30%	0,03421
		Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	40,4%	7 Περιπτώσεις μείωσης όγκου φορτίου	25%	0,02817
				8 Προσβασιμότητα σε εναλλακτικούς τρόπους μεταφοράς (π.χ., σιδηροδρομικούς, οδικούς, αεροπορικούς)	100%	0,07741
Ψηφιακή Ανθεκτικότητα	16,1%	Ανθεκτικότητα στην Κυβερνοασφάλεια	32,9%	9 Μέτρα κυβερνοασφάλειας για την προστασία κρίσιμων συστημάτων	40%	0,02100
				10 Δυνατότητες ανταπόκρισης σε περιστατικά	60%	0,03205
		Ανθεκτικότητα στις Πληροφορίες και την Επικοινωνία	67,1%	11 Μηχανισμοί ανταλλαγής πληροφοριών με τις αρχές	40%	0,04275
				12 Εκπαίδευση προσωπικού για επικοινωνία εκτάκτου ανάγκης	60%	0,06533
Κοινωνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	20,3%	Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	53,2%	13 Πρακτικές περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και μέτρα ελέγχου ρύπανσης	100%	0,10772
		Οικονομική Ανθεκτικότητα	24,4%	14 Διαφοροποίηση των τύπων φορτίων και της βάσης πελατών	20%	0,01005
				15 Οικονομική σταθερότητα και ικανότητα απορρόφησης οικονομικών σοκ	80%	0,03936
		Συμμετοχή Κοινότητας και Ενδιαφερόμενων Φορέων	22,4%	16 Εξωστρέφεια και σχέσεις με την κοινότητα	54%	0,02462
				17 Συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών στη λήψη αποφάσεων	46%	0,02081
Ανθεκτικότητα Διακυβέρνησης	17,0%	Ρυθμιστική και Νομική Ανθεκτικότητα	100,0%	18 Νομικό πλαίσιο για την ευθύνη και την επίλυση διαφορών	25%	0,04244
				19 Ικανότητα του λιμένα να προσαρμόζεται σε αλλαγές των κανονισμών	75%	0,12747



Πίνακας 3. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για το λιμένα Ηρακλείου

Περιοχές Επιπτώσεων	Βάρη των ΠΕ	Κριτήρια	Βάρη των Κριτηρίων	Δείκτες	Βάρη των Δεικτών	Τελικά Βάρη
Ανθεκτικότητα Υποδομών	28,1%	Ανθεκτικότητα Φυσικών Υποδομών	66,1%	1 Ηλικία και κατάσταση κύριων υποδομών λιμένα (π.χ., τερματικοί σταθμοί, προβλήτες, γερανοί)	43%	0,07947
				2 Υποδομές ασφαλείας και συστημάτων εφεδρείας	57%	0,10645
		Ανθεκτικότητα στην Κλιματική Αλλαγή	33,9%	3 Προστασία από πλημμύρες και μέτρα προσαρμογής στο κλίμα	74%	0,07092
				4 Στάθμη της θάλασσας	26%	0,02449
Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα και Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	19,7%	Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα	44,1%	5 Διαθεσιμότητα σχεδίων εκτάκτου ανάγκης	55%	0,04733
				6 Διάρκεια διακοπής λειτουργίας του λιμανιού λόγω απρόβλεπτων γεγονότων	28%	0,02422
				7 Περιπτώσεις μείωσης όγκου φορτίου	18%	0,01528
		Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	55,9%	8 Προσβασιμότητα σε εναλλακτικούς τρόπους μεταφοράς (π.χ., σιδηροδρομικούς, οδικούς, αεροπορικούς)	100%	0,10991
Ψηφιακή Ανθεκτικότητα	11,1%	Ανθεκτικότητα στην Κυβερνοασφάλεια	32,7%	9 Μέτρα κυβερνοασφάλειας για την προστασία κρίσιμων συστημάτων	22%	0,00812
				10 Δυνατότητες ανταπόκρισης σε περιστατικά	78%	0,02807
		Ανθεκτικότητα στις Πληροφορίες και την Επικοινωνία	67,3%	11 Μηχανισμοί ανταλλαγής πληροφοριών με τις αρχές	30%	0,02240
				12 Εκπαίδευση προσωπικού για επικοινωνία εκτάκτου ανάγκης	70%	0,05224
Κοινωνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	28,0%	Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	44,0%	13 Πρακτικές περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και μέτρα ελέγχου ρύπανσης	100%	0,12318
		Οικονομική Ανθεκτικότητα	24,6%	14 Διαφοροποίηση των τύπων φορτίων και της βάσης πελατών	32%	0,02208
				15 Οικονομική σταθερότητα και ικανότητα απορρόφησης οικονομικών σοκ	68%	0,04687
				16 Εξωστρέφεια και σχέσεις με την κοινότητα	18%	0,01624
		Συμμετοχή Κοινότητας και Ενδιαφερόμενων Φορέων	31,4%	17 Συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών στη λήψη αποφάσεων	82%	0,07177
Ανθεκτικότητα Διακυβέρνησης	13,1%	Ρυθμιστική και Νομική Ανθεκτικότητα	100,0%	18 Νομικό πλαίσιο για την ευθύνη και την επίλυση διαφορών	26%	0,03341
				19 Ικανότητα του λιμένα να προσαρμόζεται σε αλλαγές των κανονισμών	74%	0,09755



Πίνακας 4. Τιμές βαρών κριτηρίων και υποκριτηρίων βάσει της ΑΗΡ για τυχαίο λιμένα

Περιοχές Επιπτώσεων	Βάρη των ΠΕ	Κριτήρια	Βάρη των Κριτηρίων	Δείκτες	Βάρη των Δεικτών	Τελικά Βάρη
Ανθεκτικότητα Υποδομών	27,7%	Ανθεκτικότητα Φυσικών Υποδομών	46,2%	1 Ηλικία και κατάσταση κύριων υποδομών λιμένα (π.χ., τερματικοί σταθμοί, προβλήτες, γερανοί)	58%	0,07408
				2 Υποδομές ασφαλείας και συστημάτων εφεδρείας	42%	0,05401
		Ανθεκτικότητα στην Κλιματική Αλλαγή	53,8%	3 Προστασία από πλημμύρες και μέτρα προσαρμογής στο κλίμα	75%	0,11131
				4 Στάθμη της θάλασσας	25%	0,03805
Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα και Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	24,0%	Επιχειρησιακή Ανθεκτικότητα	49,2%	5 Διαθεσιμότητα σχεδίων εκτάκτου ανάγκης	48%	0,05708
				6 Διάρκεια διακοπής λειτουργίας του λιμανιού λόγω απρόβλεπτων γεγονότων	33%	0,03865
				7 Περιπτώσεις μείωσης όγκου φορτίου	19%	0,02259
		Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	50,8%	8 Προσβασιμότητα σε εναλλακτικούς τρόπους μεταφοράς (π.χ., σιδηροδρομικούς, οδικούς, αεροπορικούς)	100%	0,12213
Ψηφιακή Ανθεκτικότητα	11,1%	Ανθεκτικότητα στην Κυβερνοασφάλεια	41,9%	9 Μέτρα κυβερνοασφάλειας για την προστασία κρίσιμων συστημάτων	41%	0,01917
				10 Δυνατότητες ανταπόκρισης σε περιστατικά	59%	0,02743
		Ανθεκτικότητα στις Πληροφορίες και την Επικοινωνία	58,1%	11 Μηχανισμοί ανταλλαγής πληροφοριών με τις αρχές	32%	0,02081
				12 Εκπαίδευση προσωπικού για επικοινωνία εκτάκτου ανάγκης	68%	0,04370
Κοινωνικοοικονομική και Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	24,6%	Περιβαλλοντική Ανθεκτικότητα	39,5%	13 Πρακτικές περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και μέτρα ελέγχου ρύπανσης	100%	0,09700
		Οικονομική Ανθεκτικότητα	31,6%	14 Διαφοροποίηση των τύπων φορτίων και της βάσης πελατών	30%	0,02353
				15 Οικονομική σταθερότητα και ικανότητα απορρόφησης οικονομικών σοκ	70%	0,05425
				16 Εξωστρέφεια και σχέσεις με την κοινότητα	32%	0,02280
		Συμμετοχή Κοινότητας και Ενδιαφερόμενων Φορέων	28,9%	17 Συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών στη λήψη αποφάσεων	68%	0,04822
Ανθεκτικότητα Διακυβέρνησης	12,5%	Ρυθμιστική και Νομική Ανθεκτικότητα	100,0%	18 Νομικό πλαίσιο για την ευθύνη και την επίλυση διαφορών	32%	0,04064
				19 Ικανότητα του λιμένα να προσαρμόζεται σε αλλαγές των κανονισμών	68%	0,08454



2 Ιεράρχηση κρισιμότητας/τρωτότητας Λιμένων

2.1 Κρισιμότητα/ συνδεσιμότητα

Ένα σύστημα υποδομής μεταφορών αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο κόμβων και συνδέσμων που μαζί σχηματίζουν ένα δίκτυο (Jafino, Kwakkel, & Verbraeck, 2020). Η ιεράρχηση των στοιχείων υποδομής που πραγματοποιείται σε ένα δίκτυο μεταφορών ονομάζεται ανάλυση κρισιμότητας δικτύου μεταφορών (transport network criticality analysis) (Jenelius, Petersen, & Mattsson, 2006) και έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά. Πρώτον, ο τελικός της στόχος δεν είναι ο υπολογισμός των βαθμολογιών της κρισιμότητας για κάθε στοιχείο του δικτύου μεταφορών, αλλά η κατάταξη των στοιχείων με βάση τις βαθμολογίες κρισιμότητάς τους. Οι αρμόδιες αρχές μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη μέθοδο για να υποστηρίξουν τον προγραμματισμό των παρεμβάσεών τους. Δεύτερον, το αντικείμενο της ανάλυσης είναι τα αντικείμενα της υποδομής μεταφορών, τα οποία αναπαρίστανται ως στοιχεία του δικτύου (σύνδεσμοι ή κόμβοι). Το δεύτερο χαρακτηριστικό διακρίνει την ανάλυση κρισιμότητας από άλλους τύπους μελετών δικτύων μεταφορών, όπως η ανάλυση έκθεσης, όπου το αντικείμενο της ανάλυσης είναι ο χρήστης (Jenelius & Mattsson, 2015), ή η ανάλυση ευρωστίας, όπου συγκρίνονται διαφορετικά δίκτυα μεταφορών (Sullivan et al., 2010). Προηγούμενες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές ορολογίες για την ανάλυση κρισιμότητας, όπως η ανάλυση τρωτότητας (vulnerability analysis) (Luathep et al., 2011). Παρά τις εν λόγω ορολογικές διαφορές, εφόσον μια μελέτη δικτύου μεταφορών παρουσιάζει τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά, θεωρείται ανάλυση κρισιμότητας.

Στα δίκτυα μεταφορών δεν υπάρχει ενιαία αποδεκτή τυποποίηση για το κριτήριο της κρισιμότητας λιμένα, με αποτέλεσμα οι αρμόδιες αρχές να έχουν να επιλέξουν από έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων αναφορικά με την κρισιμότητα ενός λιμένα (Jafino, Kwakkel, & Verbraeck, 2019). Για παράδειγμα, οι Jenelius et al. (2006) βλέπουν την κρισιμότητα από την άποψη του κινδύνου (risk). Ένα στοιχείο του δικτύου μεταφορών θεωρείται κρίσιμο εάν η πιθανότητα και οι συνέπειες της αστοχίας του στοιχείου είναι υψηλές. Αντίθετα, οι De Oliveira, da Silva Portugal και Junior (2016) βλέπουν την κρισιμότητα ως ουδέτερη έννοια ως προς την πιθανότητα. Οι διαφορετικές τυποποιήσεις της κρισιμότητας έχουν οδηγήσει σε έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων, που κυμαίνονται από μια απλή μέτρηση της χωρητικότητας της οδού (Sullivan et al., 2010) έως πιο περίπλοκους δείκτες, όπως τα μέτρα συνδεσιμότητας του δικτύου (Kurauchi et al., 2009).

Σχετικά με τη συνδεσιμότητα ενός λιμένα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι μετρά (εν μέρει) τη στρατηγική θέση ενός λιμένα, ενώ καθορίζεται κυρίως από τα δίκτυα των μεταφορέων και την ικανότητα εξυπηρέτησης του λιμένα (Lam and Yap, 2011, Wang and Ng, 2011, Wang et al., 2016). Παρόμοιος όρος ο οποίος χρησιμοποιείται είναι η κεντρικότητα, η οποία θεωρείται πιο ολοκληρωμένη από τη συνδεσιμότητα (Ducruet et al., 2010, Wang and Cullinane, 2016). Η κεντρικότητα προσδιορίζεται ως χωρική ιδιότητα που ενισχύει τα επίπεδα κυκλοφορίας των κόμβων μεταφορών και, ως εκ τούτου, υποδεικνύει ποια μέρη βρίσκονται σε στρατηγική θέση εντός των συστημάτων μεταφορών.

Οι Tang et al. (2011) καθιέρωσαν τον δείκτη συνδεσιμότητας για να καταγράψουν στοιχεία των δικτύων των λιμενικών υπηρεσιών, όπως ο αριθμός των λιμενικών επισκέψεων, ο όγκος του εμπορίου, η κίνηση φορτίων, το λιμενικό τέλος και άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως ο χρόνος εξυπηρέτησης, οι ώρες λειτουργίας και οι δυνατότητες διατροφικών μεταφορών. Οι Jiang et al. (2015) παρείχαν θεωρητική βάση για τη συνδεσιμότητα λιμένων με σκοπό τη μέτρηση του ελάχιστου χρόνου μεταφοράς και της μέγιστης μεταφορικής ικανότητας.

Οι Wang και Ng (2011) παρείχαν μια αξιολόγηση της διεθνούς συνδεσιμότητας των λιμένων από γεωγραφική άποψη για να εκτιμήσουν την πιθανή ανάπτυξη λιμένων-κόμβων τροφοδοσίας. Για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας των λιμένων με τις αγορές των προαστίων χρησιμοποιήθηκαν η συχνότητα των δρομολογίων, η

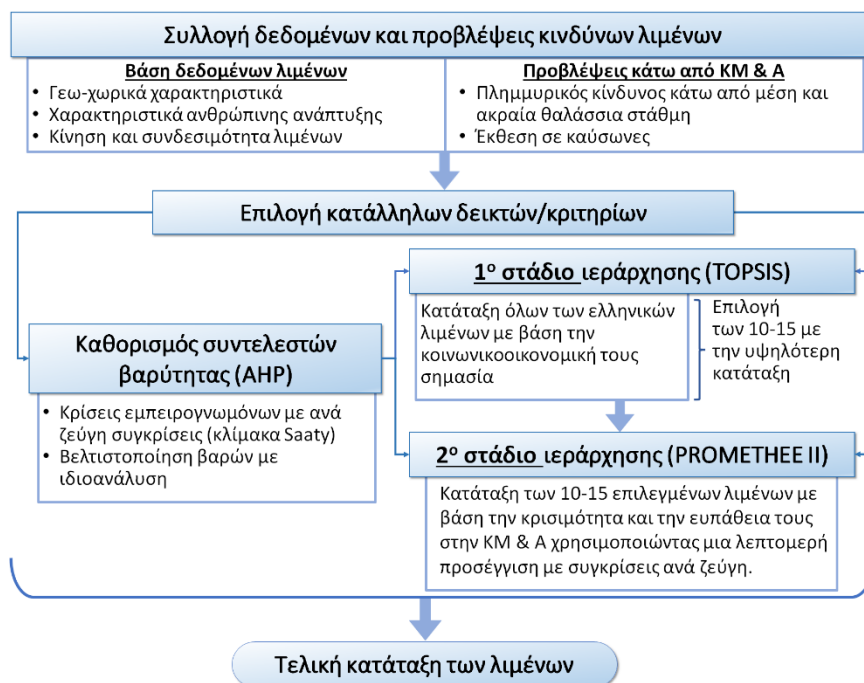


κάλυψη της αγοράς και τα δρομολόγια. Ωστόσο, με τα ταχέως αναδυόμενα δίκτυα μεταφορών, η επιλογή μιας αλυσίδας και όχι ενός λιμένα καθίσταται πιο κρίσιμη για τις εταιρείες τακτικών γραμμών, τους παρόχους υπηρεσιών εφοδιαστικής και τους φορτωτές (Notteboom and de Langen, 2016).

Η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη (UNCTAD) εξέτασε έξι συνιστώσες με τις οποίες μετρά τον Δείκτη Συνδεσιμότητας Λιμένων Τακτικών Γραμμών (Port Liner Shipping Connectivity Index - PLSCI), ο οποίος δείχνει την ενσωμάτωση ενός λιμένα στα παγκόσμια δίκτυα τακτικών γραμμών: τον αριθμό των προσεγγίσεων πλοίων ανά εβδομάδα (συχνότητα εξυπηρέτησης), τη συνολική αναπτυγμένη χωρητικότητα, τον αριθμό των υπηρεσιών τακτικών γραμμών, τον αριθμό των εταιρειών τακτικών γραμμών, το μέσο μέγεθος των πλοίων και τον αριθμό άλλων λιμένων που συνδέονται μέσω άμεσων υπηρεσιών τακτικών γραμμών (UNCTAD, 2024).

2.2 Ιεραρχικό πλαίσιο ταξινόμησης της κρισιμότητας των λιμένων

Η μέθοδος Ιεράρχησης έχει στόχο να ληφθεί η βέλτιστη απόφαση για την επιλογή των πιο κρίσιμων λιμένων που απαιτούν προστασία, συνδυάζοντας κριτήρια που υποδεικνύουν την κοινωνικο-οικονομική τους αξία καθώς και την τρωτότητα τους στους προβλεπόμενους κλιματικούς κινδύνους. Υπάρχουν λιμάνια με μικρή επιβατική/εμπορευματική κίνηση και, ως εκ τούτου, υπάρχει ελάχιστο ενδιαφέρον για μέτρα προσαρμογής, ακόμη και αν αυτά θα μπορούσαν να είναι αρκετά ευάλωτα σε κλιματικούς κινδύνους/επιπτώσεις (κριτήριο που μπορεί να επηρεάσει την κατάταξη κρισιμότητας τους). Ως εκ τούτου, συνιστάται πρώτα να κατατάσσονται οι λιμένες με βάση την κοινωνικοοικονομική σημασία/κρισιμότητα τους, πριν γίνει περαιτέρω ανάλυση με βάση την ευπάθεια τους στην Κλιματική Μεταβλητότητα και Αλλαγή. Με βάση τα παραπάνω αναπτύχθηκε το Ιεραρχικό Πλαίσιο ταξινόμησης της κρισιμότητας των λιμένων που περιγράφεται στη συνέχεια (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Ιεραρχικό πλαίσιο ταξινόμησης της κρισιμότητας/τρωτότητας των λιμένων σε περιφερειακή κλίμακα [Πηγή: Ιδία επεξεργασία].

Το πρώτο βήμα του πλαισίου αφορά την επιλογή κατάλληλων δεικτών/κριτηρίων (Σχήμα 2). Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται επιλέγονται από τις μεταβλητές της «Βάσης Δεδομένων Λιμένων», η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του παραδοτέου Π2.1. Στους δείκτες περιλαμβάνονται, προβλέψεις της έκθεσης των λιμένων στους κλιματικούς κινδύνους, οι οποίες εκτιμήθηκαν στο πλαίσιο του παραδοτέου Π3.1.

Το δεύτερο στάδιο/βήμα αφορά τον καθορισμό συντελεστών βαρύτητας για τους δείκτες. Επιλέχθηκε η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (ΑΗΡ) για την ανάθεση συντελεστών βαρύτητας στους δείκτες/κριτήρια καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση κρίσεων εμπειρογνομόνων σε προβλήματα που διακατέχονται από υποκειμενικότητα και δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της συνέπειας και εγκυρότητας τους. Επίσης επιτρέπει με τις συγκρίσεις ανά ζεύγη την εκτίμηση της σχετικής σημασίας των δεικτών, όπως αναλύθηκε στο Παραδοτέο 3.3. Η μέθοδος αυτή πάρα την ευρέως διαδεδομένη χρήση της, έχει και τους επικριτές της επειδή εμφανίζεται επιρρεπής στην αντιστροφή της κατάταξης και επίσης το όριο του 0.1 για την απόρριψη ασυνεπειών στις κρίσεις εμπειρογνομόνων αμφισβητείται (Abdullah et al., 2021). Στην παρούσα προσέγγιση η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συνολικής κατάταξης των εναλλακτικών, παρά μόνο για την ανάθεση βαρύτητας στα κριτήρια. με τη χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (ΑΗΡ).

Το επόμενο βήμα είναι η ιεράρχηση των λιμένων, η οποία περιλαμβάνει 2 στάδια (Σχήμα 2). Να σημειωθεί, ότι η διαδικασία του προηγούμενου βήματος, για την ανάθεση βαρών, πραγματοποιείται και για τα 2 αυτά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, στόχος είναι η κατάταξη των λιμένων ως προς το μεταφορικό δυναμικό τους, ώστε να επιλεγούν οι 10-15 πιο κρίσιμες υποδομές για πιο λεπτομερή ανάλυση (Andreadis et al., 2021). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), που είναι καταλληλότερη για την ανάλυση μεγάλου αριθμού λιμένων και κριτηρίων (Zavadskas et al., 2016). Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει υπόψη τόσο τις καλύτερες δυνατές όσο και τις χειρότερες δυνατές επιλογές/σενάρια. Βασίζεται στην απόσταση της κάθε εναλλακτικής από το καλύτερο και χειρότερο ιδανικό σενάριο και η τελική απόφαση είναι αυτή με τη μικρότερη απόσταση από το βέλτιστο σενάριο και τη μεγαλύτερη από το χειρίστο (Wu and Abdul-Nour, 2020). Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δε λαμβάνει υπόψη τη σχετική σημασία μεταξύ των εναλλακτικών (Abdullah et al., 2021).

Για την ιεράρχηση των 10-15 πιο κρίσιμων λιμένων που προκύπτουν από το 1^ο στάδιο της ανάλυσης χρησιμοποιείται η μέθοδος PROMETHEE II η οποία μπορεί να ταξινομήσει τις εναλλακτικές από την καλύτερη προς τη χειρότερη, γεγονός που οδηγεί στην πλήρη κατάταξη τους. Οι μέθοδοι PROMETHEE είναι καλά προσαρμοσμένες σε προβλήματα όπου πρέπει να ταξινομηθεί ένας πεπερασμένος αριθμός εναλλακτικών επιλογών λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια. Οι μέθοδοι PROMETHEE είναι γενικά δημοφιλείς μεταξύ των μεθόδων υπεροχής (Mateo, 2012) και η PROMETHEE II χρησιμοποιεί ανά ζεύγη συγκρίσεις για την εκτίμηση της σχετικής σημασίας των εναλλακτικών επιλογών. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι δεν παρέχει σαφή μέθοδο με την οποία να ανατίθενται βάρη (Abdullah et al., 2021), το κενό αυτό καλύπτεται στην παρούσα προσέγγιση με τη χρήση της μεθόδου ΑΗΡ.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι πολυκριτηριακές μέθοδοι που επιλέχθηκαν για την ανάπτυξη ιεραρχικού πλαισίου, συνοπτικά η ΑΗΡ καθώς έχει αναλυθεί στο Παραδοτέο 3.3 και εκτενέστερα η TOPSIS.

Η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (ΑΗΡ)

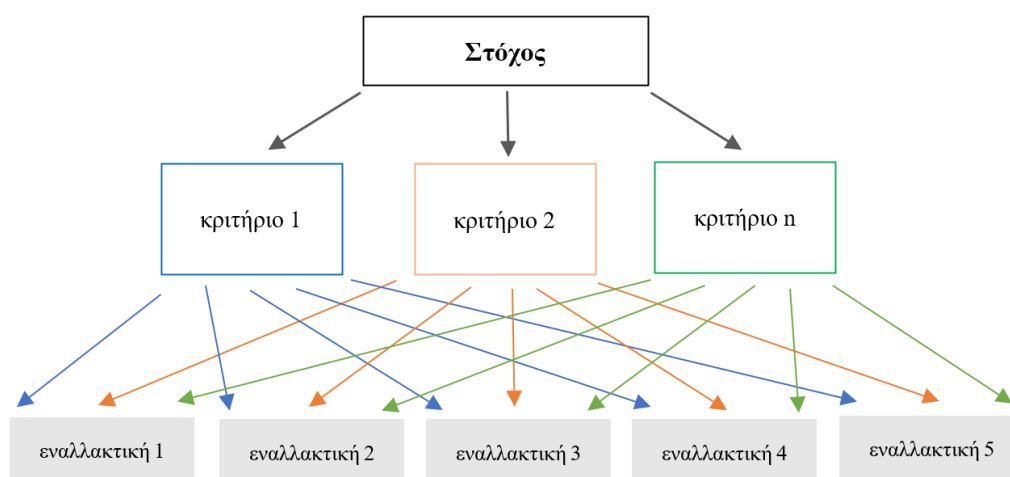
Η μέθοδος της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας (Analytic Hierarchy Process- ΑΗΡ) δημιουργήθηκε από τον Thomas Saaty κατά τη δεκαετία του 1970 και αποτελεί ένα από τα πιο αποτελεσματικά εργαλεία για τη διαχείριση και αξιολόγηση πολυκριτηριακών προβλημάτων κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η ΑΗΡ αποδομεί το αρχικό πρόβλημα σε επιμέρους προβλήματα, μειώνοντας την πολυπλοκότητά του και μέσω δυαδικών συγκρίσεων καθορίζει τις προτεραιότητες σε κάθε επίπεδο (Mateo, 2012).





Σχήμα 3. Ιεραρχική δόμηση προβλήματος.

Η ΑHP εφαρμόζεται βάσει 4^{ων} σταδίων (Σχήμα 3). Το 1^ο βήμα περιλαμβάνει τη δόμηση του αρχικού προβλήματος σε μοντέλο ιεράρχησης διαφορετικών επιπέδων, εστιάζοντας στην αλληλεπίδραση μεταξύ του στόχου (1^ο επίπεδο), των κριτηρίων (2^ο επίπεδο) και των εναλλακτικών αποφάσεων (3^ο επίπεδο) (Σχήμα 4).



Σχήμα 4 Ιεραρχικό δέντρο ΑHP.

Το 2^ο βήμα αφορά στην εκτίμηση της σημαντικότητας των στοιχείων του κάθε επιπέδου σε σχέση με κάθε στοιχείο του ανώτερου επιπέδου: τα κριτήρια συγκρίνονται κατά ζεύγη σε σχέση με το στόχο και οι εναλλακτικές αποφάσεις σε σχέση με το κάθε κριτήριο. Οι δυαδικές συγκρίσεις πραγματοποιούνται βάσει της κλίμακας προτίμησης του Satty (Saaty, 1980) (Πίνακας 5) και τα αποτελέσματα της αριθμητικής υπεροχής του κάθε κριτηρίου υπέρ των υπολοίπων συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα συγκρίσεων σύμφωνα με την κρίση του υπεύθυνου για τη λήψη της απόφασης (Πίνακας 6). Η απόδοση a_{ij} συμβολίζει πόσο πιο σημαντικό είναι το στοιχείο i σε σχέση με το στοιχείο j .

Πίνακας 5. Θεμελιώδης κλίμακα απολύτων αριθμών του Saaty (Mateo, 2012).

τιμές σχετικής σημαντικότητας	a_{ij}
1	ίση σημαντικότητα
3	το i είναι ελαφρώς σημαντικότερο από το j
5	το i είναι πολύ σημαντικότερο από το j
7	το i ισχυρά σημαντικότερο από το j
9	το i απόλυτα σημαντικότερο από το j
2, 4, 6, 8	ενδιάμεσες τιμές

Πίνακας 6. Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων.

	Κριτήριο 1	Κριτήριο 2	...	Κριτήριο j
Κριτήριο 1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1j}
Κριτήριο 2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2j}
...	...	...	...	...
Κριτήριο i	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{ij}

Στο 3^ο βήμα υπολογίζονται τα βάρη που θέτει ο εκάστοτε λήπτης απόφασης στα συγκρινόμενα στοιχεία, δηλαδή την ποσοτική συμμετοχή του κάθε στοιχείου στη λήψη της απόφασης. Στην περίπτωση που τα βάρη είναι γνωστά, ο πίνακας είναι συνεπής και ισχύει:

$$Aw = nw \quad [1]$$

όπου σύμφωνα με τη θεωρία γραμμικών τελεστών και πινάκων της Γραμμικής Άλγεβρας, το w αντιστοιχεί στο ιδιοδιάνυσμα και το n στην ιδιοτιμή του πίνακα A , δηλαδή στο πλήθος των στοιχείων (Πίνακας 7).

Πίνακας 7. Πλήθος στοιχείων ιδιοδιανυσμάτων

	Κριτήριο 1	Κριτήριο 2	...	Κριτήριο n	n=
Κριτήριο 1	$\frac{w_1}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_1}$	...	$\frac{w_n}{w_1}$	w_1
Κριτήριο 2	$\frac{w_2}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_2}$	...	$\frac{w_n}{w_2}$	w_2
...	...	...	...	...	⋮
Κριτήριο n	$\frac{w_n}{w_1}$	$\frac{w_n}{w_2}$	...	$\frac{w_n}{w_n}$	w_n

Στην πράξη, οι συγκρίσεις γίνονται βάσει της κρίσης του εκάστοτε λήπτη της απόφασης και δεν είναι ακριβείς, επομένως $a_{ij} \neq \frac{w_i}{w_j}$. Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας θεωρείται ασυνεπής και η σχέση (1) εκφράζεται:

$$Aw = \lambda w \quad [2]$$

όπου το w αντιστοιχεί στο ιδιοδιάνυσμα και το λ στη μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα A . Όταν ο πίνακας A είναι συνεπής, ισχύει $\lambda_{max} = n$ και η σχέση των λ και n είναι παράγοντας του βαθμού συνέπειας. Για τον υπολογισμό της συνέπειας χρησιμοποιείται ο δείκτης συνέπειας (consistency index -CI) και ισούται με:

$$C.I. = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \quad [3]$$

και ο λόγος συνέπειας (consistency ratio - C.R):

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I} \quad [4]$$



όπου R.I. (random index) ο τυχαίος δείκτης οι τιμές του οποίου υπολογίστηκαν από τον Saaty βάσει μεγάλου δείγματος τυχαίων θετικών πινάκων. Τα αποτελέσματα θεωρούνται συνεπή όταν $C.R. \leq 0,1$ ενώ για τιμές $C.R. > 0,1$, ο λήπτης της απόφασης θα πρέπει να διαχειριστεί τις ασυνέπειες και να αναθεωρήσει την αρχική του κρίση σχετικά με τη σημαντικότητα των κριτηρίων (Wu and Abdul-Nour, 2020). Ο έλεγχος της συνέπειας είναι βασικό στάδιο της AHP, γεγονός που την καθιστά μια από τις πιο εφαρμοσμένες μεθόδους.

Για τον υπολογισμό των βαρών w ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$) χρησιμοποιείται η μέθοδος του ιδιοδιανύσματος. Σύμφωνα με τη σχέση (2), για κάθε πίνακα A , υπολογίζεται το άθροισμα της κάθε γραμμής:

$$s_i = \sum_j a_{ij} \quad [5]$$

Το διάνυσμα w_i προκύπτει από το πηλίκο του αθροίσματος της κάθε γραμμής s_i δια του αθροίσματος όλων των γραμμών:

$$w_i = \frac{s_i}{\sum_i \sum_j a_{ij}} \quad [6]$$

Για την οριστικοποίηση των αποτελεσμάτων, ο πίνακας υψώνεται στο τετράγωνο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (Σχέση 5 & 6) έως η τιμή του ιδιοδιανύσματος w να μη διαφοροποιείται από αυτή που προέκυψε από την προηγούμενη επανάληψη. Κατόπιν εφαρμογής της παραπάνω μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των βαρών των στοιχείων κάθε επιπέδου, γίνεται σύνθεση αυτών μέσω πολλαπλασιασμού των πινάκων δυαδικών συγκρίσεων από το κατώτερο επίπεδο του ιεραρχικού δέντρου προς το ανώτερο, δίνοντας την τελική κατάταξη των εναλλακτικών και την επιλογή της καταλληλότερης επιλογής για τον λήπτη της απόφασης.

Η μέθοδος TOPSIS

Η αναζήτηση της βέλτιστης εναλλακτικής σε ένα πρόβλημα λήψης απόφασης μέσω της μεθόδου **TOPSIS** (**Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution**) βασίζεται στην απόσταση της κάθε εναλλακτικής από το καλύτερο και χειρότερο ιδανικό σενάριο και η τελική απόφαση, για την απόδοση της οποίας έχει αξιολογηθεί η βαρύτητα των επιλεγμένων κριτηρίων, είναι αυτή με τη μικρότερη απόσταση από το βέλτιστο σενάριο και τη μεγαλύτερη από το χειρίστο (Wu and Abdul-Nour, 2020).

Βήματα της μεθόδου TOPSIS (Hwang and Yoon 1981; Tzeng and Huang, 2011)

1. **Κατασκευή του πίνακα απόφασης:** Το πρώτο στάδιο της εφαρμογής της περιλαμβάνει την δημιουργία πίνακα $A = (a_{ij})_{m \times n}$, με m εναλλακτικές, n κριτήρια και a_{ij} την επίδοση της εναλλακτικής i ως προς το κριτήριο j .



Σχήμα 5. Στάδια εφαρμογής μεθόδου TOPSIS.

2. **Κανονικοποίηση του πίνακα απόφασης:** Για να εξασφαλιστεί ότι τα δεδομένα είναι συγκρίσιμα, τα στοιχεία του πίνακα κανονικοποιούνται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m a_{ij}^2}} \quad (7)$$

όπου a_{ij} είναι η τιμή της i -οστής εναλλακτικής στο j -οστό κριτήριο.

3. **Σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης:** Οι τιμές του κανονικοποιημένου πίνακα πολλαπλασιάζονται με τα βάρη των κριτηρίων:

$$p_{ij} = w_i r_{ij} \quad (8)$$

όπου w_i η βαρύτητα του κριτηρίου i και $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

4. **Προσδιορισμός της θετικής και αρνητικής ιδεατής λύσης**

- Η **θετική ιδεατή λύση** (A^+) περιλαμβάνει τις βέλτιστες τιμές των κριτηρίων:

$$A^+ = \{p_j^+ | j = 1, 2, \dots, n\} = \{(max_i p_{ij} | j \in J^+), (min_i p_{ij} | j \in J^-)\} \quad (9)$$

- Η **αρνητική ιδεατή λύση** (A^-) περιλαμβάνει τις χειρότερες τιμές των κριτηρίων:

$$A^- = \{p_j^- | j = 1, 2, \dots, n\} = \{(min_i p_{ij} | j \in J^+), (max_i p_{ij} | j \in J^-)\} \quad (10)$$

με J^+ και J^- να αντιστοιχούν στα κριτήρια με θετική επίδραση (beneficial) (δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή τους, τόσο μεγαλύτερη και η προτίμηση) και αρνητική επίδραση (non beneficial) (δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερη είναι η προτίμηση) αντίστοιχα.

5. **Υπολογισμός της απόστασης των εναλλακτικών από τις ιδεατές λύσεις**

Υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση κάθε εναλλακτικής i από την ιδανική βέλτιστη A^+ και χειρίστη A^- λύση:

- Η απόσταση μιας εναλλακτικής i από τη θετική ιδεατή λύση υπολογίζεται ως:

$$s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^+)^2} \quad (11)$$

- Η απόσταση μιας εναλλακτικής i από την αρνητική ιδεατή λύση υπολογίζεται ως:

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^-)^2} \quad (12)$$

6. **Υπολογισμός του συντελεστή σχετικής εγγύτητας:** Ο συντελεστής σχετικής εγγύτητας μιας εναλλακτικής i προς την ιδεατή λύση υπολογίζεται ως:

$$C_i = \frac{s_i^-}{(s_i^+ + s_i^-)} \quad (13)$$

όπου C_i είναι μεταξύ 0 και 1. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή C_i , τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική.



7. **Κατάταξη των εναλλακτικών:** Οι εναλλακτικές ταξινομούνται με φθίνουσα σειρά βάσει του C_i , και η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή θεωρείται η βέλτιστη.

8. Πλεονεκτήματα της μεθόδου TOPSIS

- Είναι εύκολη στην εφαρμογή και κατανοητή.
- Λαμβάνει υπόψη τόσο τα οφέλη όσο και τα κόστη των κριτηρίων.
- Επιτρέπει τη χρήση βαρών για τη διαφοροποίηση της σημασίας των κριτηρίων.
- Δεν απαιτεί πολύπλοκες υποθέσεις για τα δεδομένα.

9. Μειονεκτήματα της μεθόδου TOPSIS

- Οι αποστάσεις από τις ιδεατές λύσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις.
- Η επιλογή της μετρικής απόστασης (συνήθως Ευκλείδειας) μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα.
- Η κανονικοποίηση μπορεί να αλλοιώσει την αρχική σημασία των δεδομένων.

Η μέθοδος PROMETHEE II

Η μέθοδος PROMETHEE II (Preference Ranking Optimization Method for Enrichment Evaluation) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων υπεροχής (outranking relations methods). Το μεθοδολογικό πλαίσιο βασίζεται στην κατά ζεύγη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων για κάθε κριτήριο με σκοπό την ανάπτυξη σχέσης υπεροχής της μιας λύσης σε σχέση με την άλλη και στην τελική πλήρη κατάταξή τους. Η PROMETHEE II υλοποιείται στα ακόλουθα 6 στάδια (Maity and Chakraborty, 2015):

1^ο στάδιο: Κανονικοποίηση πίνακα αποφάσεων

Εφαρμόζεται κανονικοποίηση του πίνακα αποφάσεων σύμφωνα με τη συνάρτηση:

$$R_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min(x_{ij})]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]} \quad [14]$$

όπου x_{ij} η επίδοση της εναλλακτικής $i=1,2,\dots,m$ σε σχέση με το κριτήριο $j=1,2,\dots,n$ και R_{ij} η κανονικοποιημένη τιμή του x_{ij} . Για κριτήρια μη ωφέλειας (non-beneficial criteria), δηλαδή αυτά για τα οποία ισχύει ότι όσο μικρότερη η τιμή τους τόσο μεγαλύτερη η προτίμηση (π.χ. κόστος), το R_{ij} ισούται:

$$R_{ij} = \frac{[\max(x_{ij}) - x_{ij}]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]} \quad [15]$$

2^ο στάδιο: Υπολογισμός επιδόσεων εναλλακτικών

Υπολογίζεται για κάθε κριτήριο j , η διαφορά της επίδοσης της κάθε εναλλακτικής i σε σχέση με τις υπόλοιπες.

3^ο στάδιο: Ανάπτυξη συνάρτησης προτίμησης



Καθορίζονται οι σχέσεις υπεροχής, δηλαδή η προτίμηση του λήπτη απόφασης για μια επιλογή a σε σχέση με μια επιλογή b για κάθε κριτήριο j . Η σχέση αυτή αποδίδεται μέσω της συνάρτησης προτίμησης και παίρνει τιμές μεταξύ 0 & 1, όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο πιο ισχυρή η προτίμηση:

$$P_j(a, b) = 0, \quad R_{aj} \leq R_{bj} \quad [16]$$

$$P_j(a, b) = R_{aj} - R_{bj}, \quad R_{aj} > R_{bj} \quad [17]$$

4^ο στάδιο: Υπολογισμός δείκτη προτίμησης

Κατόπιν ορισμού των σχέσεων προτίμησης $P_j(a, b)$ για κάθε κριτήριο $j=1,2,\dots,n$, δημιουργείται πίνακας προτιμήσεων όπου αποτυπώνεται η ολική υπεροχή κάθε εναλλακτικής a έναντι της b για όλα τα κριτήρια αξιολόγησης:

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad [18]$$

όπου w_j τα βάρη των κριτηρίων j .

5^ο στάδιο: Υπολογισμός ροών υπεροχής

Βάσει των σχέσεων υπεροχής, υπολογίζονται:

- η θετική ροή: $\varphi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^m \pi(a, b)$
- η αρνητική ροή: $\varphi^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^m \pi(b, a)$
- η καθαρή ροή: $\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$

Όσο μεγαλύτερη η θετική ροή $\varphi^+(a)$, τόσο ισχυρότερη η υπεροχή της εναλλακτικής a σε σχέση με το σύνολο των εναλλακτικών A , ενώ η αρνητική ροή $\varphi^-(a)$ εκφράζει την υπεροχή του συνόλου των εναλλακτικών σε σχέση με την a . Η καθαρή ροή αντιστοιχεί στην τελική αξιολόγηση της a έναντι όλων των υπόλοιπων εναλλακτικών.

6^ο στάδιο: Υπολογισμός ροών υπεροχής

Τέλος, υπολογίζεται η πλήρης κατάταξη των εναλλακτικών ως προς τις καθαρές ροές με ψηλότερα στην κατάταξη να είναι αυτή με τη μεγαλύτερη καθαρή ροή $\varphi(a)$.

Δείκτες/κριτήρια

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται η ιεράρχηση όλων των ελληνικών λιμένων, λαμβάνοντας υπόψη την κοινωνικο-οικονομική τους σημασία. Οι δείκτες που επιλέχθηκαν για αυτό το στάδιο είναι οι εξής:

- (1) **Εμβαδόν λιμένα:** υπολογίστηκε από τα ψηφιοποιημένα πολύγωνα. Τα πολύγωνα προέρχονται από το Coastal Zone Land Cover Land Dataset της υπηρεσίας Land Copernicus και έχουν υποστεί χειροκίνητες διορθώσεις όπου αυτό ήταν απαραίτητο.
- (2) **Πληθυσμός Πλησίον Λιμένα:** Συγκέντρωση πληθυσμού σε ακτίνα 500 m από το λιμένα. Η πληροφορία έχει εξαχθεί από το jrc.ec.europa.eu/ghs_pop2023.php.



- (3) **Μήκος Οδικού δικτύου πλησίον λιμένα:** Συνολικό μήκος των δρόμων σε ακτίνα 1000 m περιμετρικά του λιμένα. Έχει εξαχθεί από τα δεδομένα Open Street Map (OSM).
- (4) **Κίνηση λιμένα:** Αριθμός επιβιβάσεων/αποβιβάσεων.
- (5) **Συνδεσιμότητα:** Αριθμός συνδέσεων εσωτερικού/εξωτερικού.
- (6) **Οικιστική ανάπτυξη πλησίον λιμένα:** Πυκνότητα δόμησης όπισθεν του λιμένα. Εκφράζεται σαν ποσοστό επί του μήκους του λιμένα ή επί του εμβαδού μιας ζώνης buffer ακτίνας 100 μ περιμετρικά του λιμένα. Η πληροφορία δόμησης έχει εξαχθεί από το Coastal Zone Land Use/Land Cover Dataset του Land Copernicus land.copernicus.eu/en/products/coastal-zones/coastal-zones-2018.
- (7) **Κρισιμότητα/Μοναδικότητα Λιμένα:** Πρόκειται για ποιοτικό δείκτη όπου μεγαλύτερη βαθμολογία δίνεται σε απομονωμένες περιοχές (π.χ. νησιά) οι οποίες βασίζονται μόνο σε ένα λιμάνι για τη μεταφορά απαραίτητων προϊόντων.

Το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης επικεντρώνεται στους 10-15 λιμένες που εμφανίζονται υψηλότερα στην κατάταξη με βάση την ανάλυση του πρώτου σταδίου. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας λεπτομερούς πολυκριτηριακής προσέγγισης χρησιμοποιώντας την μέθοδο PROMETHEE II, με ανά ζεύγη συγκρίσεις, προκειμένου να προτεραιοποιηθούν όχι μόνο βάση της κοινωνικο-οικονομικής τους σημασία, αλλά και με βάση την τρωτότητα τους στους προβλεπόμενους κλιματικούς κινδύνους. Τα επιπλέον κριτήρια που επιλέχθηκαν για αυτό το στάδιο είναι τα κάτωθι (παραδοτέο 3.1):

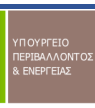
- (8) **Πλημμυρικός Κίνδυνος.** Γίνεται σύγκριση του ύψους της προβλήτας με την προβλεπόμενη Ακραία Θαλάσσια Στάθμη, κατά τη διάρκεια ακραίων γεγονότων θύελλας.
- (9) **Κίνδυνος Θερμοπληξίας.** Αριθμός ημερών που προβλέπεται ο συνδυασμός Θερμοκρασίας και Σχετικής Υγρασίας να ξεπερνάει τις οριακές τιμές-κατώφλια λειτουργικότητας εμποδίζοντας/καθιστώντας αδύνατη (θανατηφόρες συνθήκες) την εργασία υπαλλήλων του λιμένα σε εξωτερικούς ή μη κλιματιζόμενους χώρους ή και την παραμονή επιβατών ενδεχομένως σε περίπτωση καθυστερήσεων ή μη επαρκών κλιματιζόμενων χώρων.
- (10) **Έκθεση σε μελλοντικούς καύσωνες.** Η ακραία θερμοκρασία προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στους εργαζόμενες και εργαζόμενες, στους επιβάτες και γενικά στη λειτουργικότητα, στις ασφαλείς συνθήκες και στις υποδομές των λιμένων. Προσεγγίζεται εδώ με τον αριθμό ημερών που προβλέπεται η θερμοκρασία να ξεπερνάει τις οριακές τιμές-κατώφλια.

2.3 Αποτελέσματα Ιεραρχικού πλαισίου

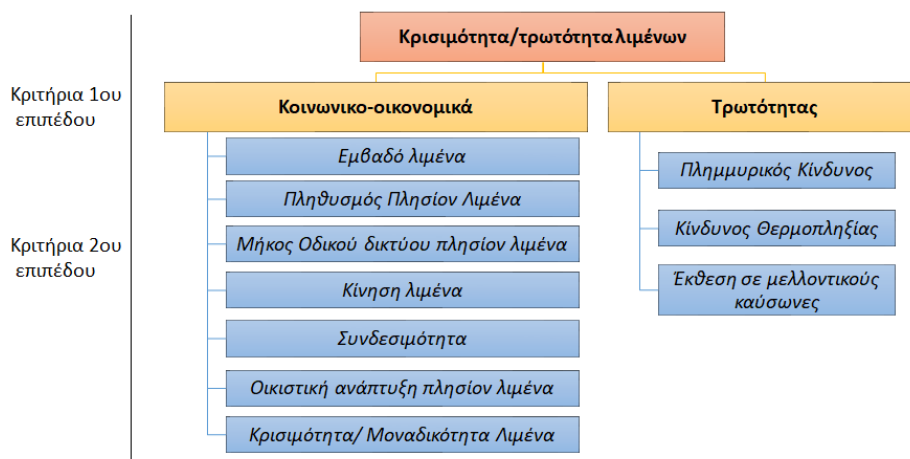
Συντελεστές βαρύτητας για τους δείκτες (AHP)

Για τον καθορισμό συντελεστών βαρύτητας στα κριτήρια εφαρμόστηκε η μέθοδος Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP), δηλαδή συγκρίσεις κατά ζεύγη, χρησιμοποιώντας κλίμακα από 1 έως 9. Οι συγκρίσεις βασίστηκαν σε (20) κρίσεις εμπειρογνώμωνων μέσω της συμπλήρωσης κατάλληλα διαμορφωμένων ερωτηματολογίων σε μορφή Excel, όπου υπολογιζόταν αυτόματα ο λόγος συνέπειας (CR) των πινάκων. Σε περίπτωση που ο λόγος συνέπειας ήταν μεγαλύτερος από 0.1, οι εμπειρογνώμονες είχαν τη δυνατότητα αναπροσαρμογής των κρίσεων τους. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε η συνέπεια όλων των παραγόμενων πινάκων (CR~0) από τους ίδιους τους εμπειρογνώμονες. Η μέθοδος AHP εφαρμόστηκε σύμφωνα με την ιεραρχία των κριτηρίων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6 και μέσω ιδιοανάλυσης καθορίστηκαν::

1. Τα τοπικά βάρη για τα κριτήρια 1ου επιπέδου, δηλαδή η σχετική βαρύτητα μεταξύ της κοινωνικο-οικονομικής σημασίας και της ευπάθειας των λιμένων στην ΚΜ & Α (Πίνακας 8).



2. Τα τοπικά βάρη για τα κοινωνικο-οικονομικά κριτήρια 2ου επιπέδου (1)-(7), που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο στάδιο της ιεράρχησης (εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS) (Πίνακας 8).
3. Τα τοπικά βάρη για τα κριτήρια τρωτότητας (8)-(10) (Πίνακας 8).
4. Τα συνολικά βάρη για όλους τους δείκτες (1)-(10), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο δεύτερο στάδιο της ιεράρχησης (εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE II) (Πίνακας 8).



Σχήμα 6. Ιεραρχία κριτηρίων

Πίνακας 8. Βάρη που ανατέθηκαν στους δείκτες/κριτήρια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AHP κατά τα δύο στάδια της ιεράρχησης.

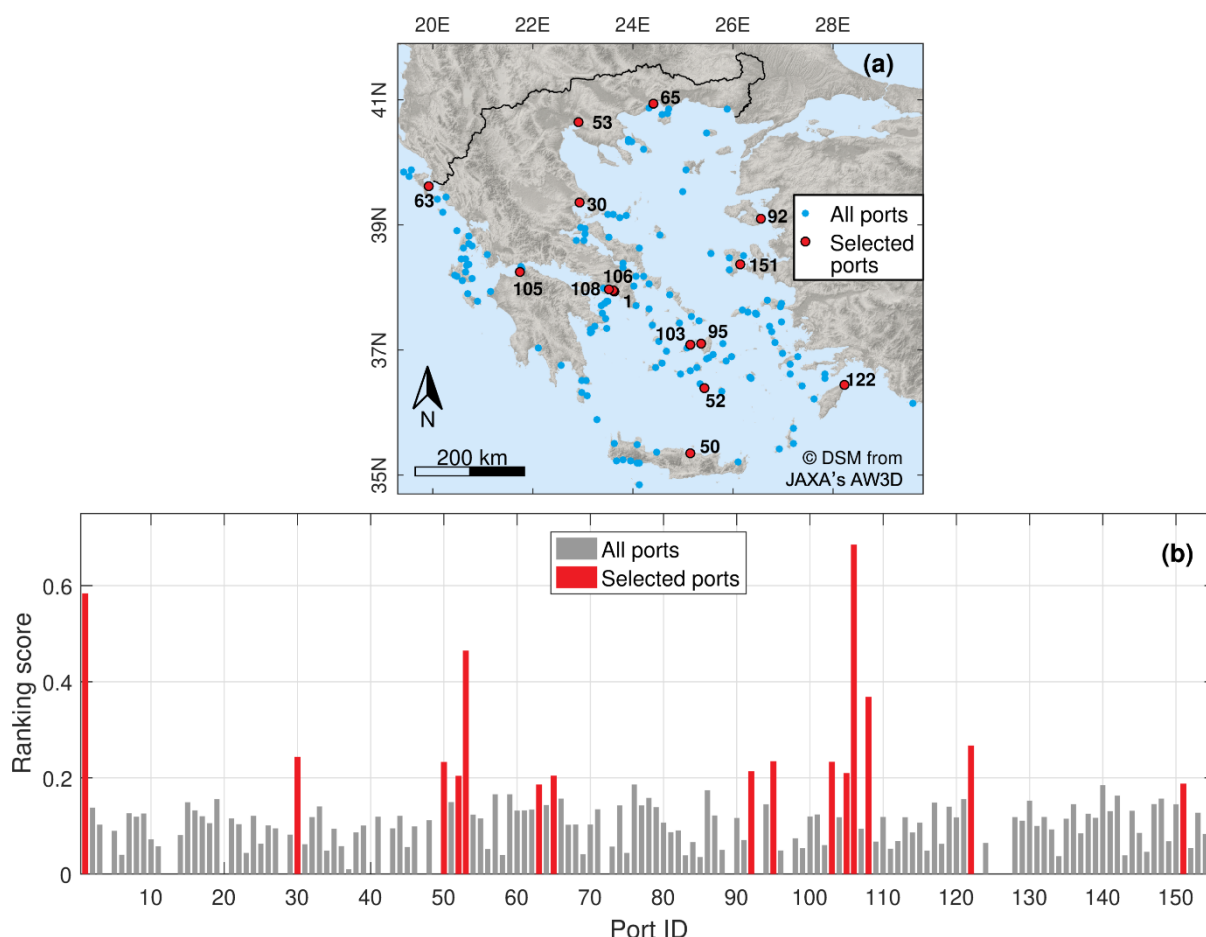
Κριτήρια 1ου επιπέδου	Τοπικά βάρη	Κριτήρια 2ου επιπέδου	Τοπικά βάρη	Συνολικά βάρη
Κοινωνικο-οικονομικά	0.6940	1. Εμβαδό λιμένα 2. Πληθυσμός Πλησίον Λιμένα 3. Μήκος Οδικού δικτύου πλησίον λιμένα 4. Κίνηση λιμένα 5. Συνδεσιμότητα 6. Οικιστική ανάπτυξη πλησίον λιμένα 7. Κρισιμότητα/ Μοναδικότητα Λιμένα	0.1767 0.1123 0.1428 0.1539 0.1418 0.0827 0.1899	0.1226 0.0779 0.0991 0.1068 0.0984 0.0574 0.1318
Τρωτότητας	0.3060	8. Πλημμυρικός Κίνδυνος 9. Κίνδυνος Θερμοπληξίας 10. Έκθεση σε μελλοντικούς καύσωνες	0.4806 0.2322 0.2872	0.1470 0.0710 0.0879

Πρώτο στάδιο Ιεράρχησης των λιμένων (TOPSIS)

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια (1)-(7), εκ των οποίων το (7) (Κρισιμότητα/Μοναδικότητα Λιμένα) είναι ποιοτικό και τα υπόλοιπα ποσοτικά. Δεδομένου ότι οι δείκτες δεν μετρούνται στις ίδιες μονάδες, εφαρμόστηκε κανονικοποίηση (vector normalization) ώστε να διασφαλιστεί η ομοιομορφία και η συγκρισιμότητα των δεδομένων. Κατά την κανονικοποίηση θεωρήθηκε ότι όλοι οι δείκτες

έχουν θετική επίδραση (beneficial) στον καθορισμό της κατάταξης, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή τους, τόσο μεγαλύτερη η προτίμηση.

Η μέθοδος TOPSIS εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των βαθμολογιών προτίμησης για 137 από τους 155 ελληνικούς λιμένες, για τους οποίους υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για όλα τα κριτήρια. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 7. Οι 15 λιμένες με τις υψηλότερες βαθμολογίες, οι οποίοι επιλέχθηκαν για το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης, εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα και σημειώνονται επίσης στον χάρτη της Ελλάδας. Πρώτο στην κατάταξη είναι το λιμάνι στο Πέραμα, ακολουθούν ο Πειραιάς, η Θεσσαλονίκη και τα Παλούκια Σαλαμίνας.

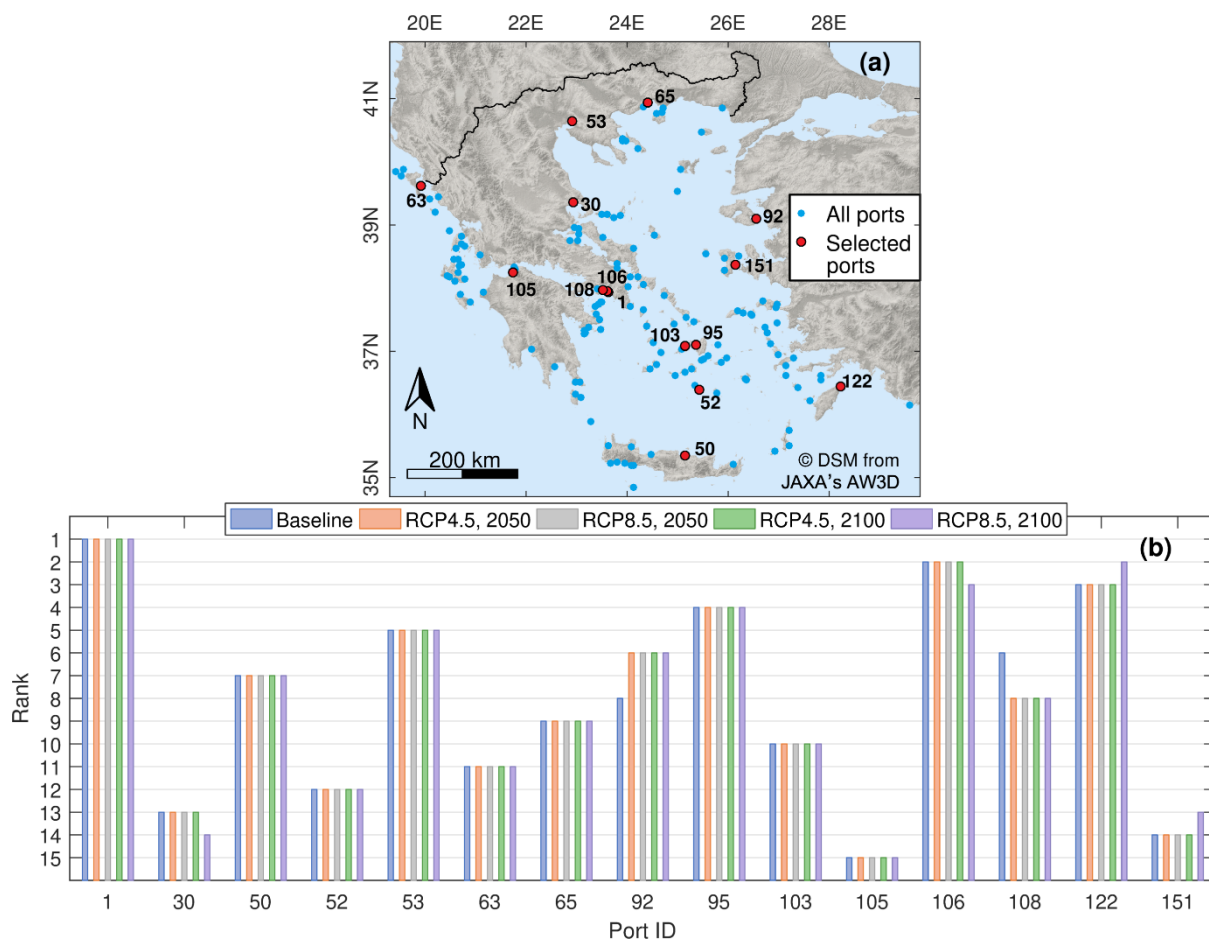


Σχήμα 7. (α) Οι ελληνικοί λιμένες. (β) Βαθμολογίες κατάταξης των 137 λιμένων (μέθοδος TOPSIS) σύμφωνα με την κοινωνικο-οικονομική τους αξία. Οι 15 πρώτοι στην κατάταξη λιμένες φαίνονται με κόκκινο χρώμα.

Δεύτερο στάδιο Ιεράρχησης των λιμένων (PROMETHEE II)

Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια (1)-(10) και εφαρμόστηκε η μέθοδος PROMETHEE II με συγκρίσεις κατά ζεύγη για την κατάταξη των 15 επιλεγμένων λιμένων, τόσο υπό ιστορικές συνθήκες όσο και για τέσσερα μελλοντικά σενάρια: RCP4.5 (συντηρητικό) και RCP8.5 (απαισιόδοξο) για τα έτη 2050 και 2100. Πρώτο βήμα της μεθόδου αποτέλεσε η κανονικοποίηση των δεδομένων ώστε να μετατραπούν σε αδιάστατες και συγκρίσιμες τιμές. Όλοι οι δείκτες θεωρήθηκαν ότι έχουν θετική επίδραση (beneficial) στον καθορισμό της κατάταξης.

Οι βαθμολογίες κατάταξης για τους 15 λιμένες, βάσει της κρισιμότητας/τρωτότητάς τους υπό τις ιστορικές και μελλοντικές συνθήκες, παρουσιάζονται στο Σχήμα 8 και στον Πίνακα 9.



Σχήμα 8. (α) Οι θέσεις των 15 επιλεγμένων λιμένων οι οποίοι απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και (β) η κατάταξη τους (μέθοδος POMETHEE II) βάσει της κρισιμότητας/τρωτότητάς τους υπό ιστορικές και μελλοντικές συνθήκες.

Πίνακας 9. Βαθμολογίες κατάταξης (ανάλυση POMETHEE II) των 15 επιλεγμένων λιμένων, ως προς την κρισιμότητα/τρωτότητα τους. Η θετική βαθμολογία εκφράζει πώς μια εναλλακτική λύση υπερτερεί όλων των άλλων, ενώ η αρνητική βαθμολογία εκφράζει πώς μια εναλλακτική λύση ξεπερνιέται από όλες τις άλλες.

Ονομασία Λιμένα	Περίοδος αναφοράς	RCP4.5, 2050	RCP8.5, 2050	RCP4.5, 2100	RCP8.5, 2100
1-Πειραιάς	0.299	0.294	0.293	0.286	0.278
30-Βόλος	-0.143	-0.138	-0.141	-0.139	-0.159
50-Ηράκλειο	-0.013	-0.006	-0.002	-0.011	-0.013
52-Θήρα	-0.095	-0.098	-0.097	-0.098	-0.084
53-Θεσσαλονίκη	0.064	0.057	0.054	0.056	0.043
63-Κέρκυρα	-0.073	-0.078	-0.078	-0.072	-0.069
65-Καβάλα	-0.028	-0.021	-0.026	-0.020	-0.039
92-Μυτιλήνη	-0.024	-0.005	0.001	0.015	0.019
95-Νάξος	0.065	0.067	0.067	0.061	0.072
103-Πάρος	-0.052	-0.058	-0.057	-0.059	-0.049
105-Πάτρα	-0.215	-0.208	-0.208	-0.210	-0.197
106-Πέραμα	0.191	0.185	0.184	0.178	0.170
108-Παλούκια Σαλαμίνας	0.003	-0.008	-0.010	-0.015	-0.018
122-Ρόδος	0.183	0.178	0.177	0.170	0.175
151-Χίος	-0.161	-0.161	-0.157	-0.141	-0.130

Οι λιμένες Πειραιάς (ID 1), Πέραμα (ID 106), Ρόδος (ID 122), Νάξος (ID 95) και Θεσσαλονίκη (ID 53) εμφάνισαν σταθερά (εκτός από το τελευταίο σενάριο RCP8.5, 2100) τις υψηλότερες βαθμολογίες, υποδηλώνοντας ότι είναι ταυτόχρονα πιο κοινωνικο-οικονομικά σημαντικοί και ευάλωτοι στους κλιματικούς κινδύνους, ως εκ τούτου, βρίσκονται υψηλότερα στην προτεραιότητα για την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής. Γενικά, η κατάταξη των λιμένων παραμένει σε μεγάλο βαθμό σταθερή τόσο υπό τις ιστορικές συνθήκες όσο και στα διαφορετικά μελλοντικά σενάρια που εξετάστηκαν. Η σχετική σταθερότητα πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι, σύμφωνα με τις κρίσεις των εμπειρογνομόνων, δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα στα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια, τα οποία διατηρούν σταθερή τιμή ανεξαρτήτως σεναρίου. Μια αξιοσημείωτη ανατροπή σημειώνεται μεταξύ του Περάματος και της Ρόδου στο σενάριο RCP8.5 για το 2100, όπου το Πέραμα υποχωρεί στην 3η θέση και η Ρόδος ανεβαίνει στη 2η. Αντίστοιχα, η Μυτιλήνη (ID 92), η οποία βρισκόταν στην 8η θέση υπό ιστορικές συνθήκες, αναβαθμίζεται στην 6η θέση για τα μελλοντικά σενάρια, ενώ τα Παλούκια Σαλαμίνας (ID 108) ακολουθούν την αντίστροφη πορεία. Επιπλέον, στο απαισιόδοξο σενάριο για το 2100, ο λιμένας του Βόλου (ID 30) πέφτει από τη 13η στη 14η θέση, ενώ η Χίος (ID 151) παρουσιάζει την αντίθετη τάση. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται κυρίως στις αλλαγές της έκθεσης των λιμένων σε κλιματικούς κινδύνους, όπως προβλέπονται από τα εκάστοτε σενάρια. Οι αλλαγές αυτές αντανακλούν τη διαφοροποίηση στην προβλεπόμενη έκθεση των λιμένων στους κλιματικούς κινδύνους, καθώς αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο, επηρεάζοντας τη σχετική τους τρωτότητα και συνεπώς την τελική κατάταξη.



3 Σύνοψη και συμπεράσματα

Το Παραδοτέο Π3.4 παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση αξιολόγησης της ανθεκτικότητας των ελληνικών λιμένων απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, στηριζόμενο σε δύο συμπληρωματικές μεθοδολογίες, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη φιλοσοφία και το σκοπό τους, τη μεθοδολογική τους εφαρμογή και το είδος των αποτελεσμάτων που παράγουν - αλλά που σε κάθε περίπτωση συνδυάζονται αρμονικά και συμπληρωματικά, καθώς και σε ένα καινοτόμο ψηφιακό εργαλείο.

Μέσω των Living Labs σε Χίο, Βόλο και Ηράκλειο, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία AHP σε πέντε βασικούς άξονες: υποδομές, λειτουργικότητα–εφοδιαστική αλυσίδα, ψηφιακή επάρκεια, κοινωνικοοικονομικοί–περιβαλλοντικοί παράγοντες και διακυβέρνηση. Η προσέγγιση αυτή απέδωσε τον Δείκτη Ανθεκτικότητας Λιμένα (Port Resilience Index), ενσωματωμένο στον “Resilience Estimator” βασικό στοιχείο και εργαλείο του Συστήματος Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (ΣΥΛΑ).

Στην περίπτωση του λιμένα Χίου διαπιστώθηκε υψηλή λειτουργική ανθεκτικότητα ($OSCRI \approx 2,8$), αλλά σχετικά χαμηλή ψηφιακή ($DRI \approx 1,0$) και κοινωνικοοικονομική–περιβαλλοντική ανθεκτικότητα ($SERI < 1,0$), υποδεικνύοντας την ανάγκη ενίσχυσης της ψηφιακής υποδομής και των τοπικών πολιτικών. Για την περίπτωση του λιμένα Βόλου ανέδειξε ισχυρό δίκτυο υποδομών ($IRI \approx 3,9$) με πιο αδύναμη διάσταση τον κοινωνικοοικονομικό–περιβαλλοντικό τομέα ($SERI \approx 3,4$), ενώ για ο λιμένας Ηρακλείου παρουσίασε ομοιογενή απόδοση σε όλους τους άξονες ($IRI \approx 3,0$, $SERI$ & $GCRI \approx 2,5$), αφήνοντας περιθώρια βελτίωσης κυρίως στους κοινωνικούς και διακυβερνητικούς δείκτες.

Σε εθνικό επίπεδο, εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή ανάλυση δύο σταδίων: Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, χρησιμοποιείται η μέθοδος TOPSIS για την ταξινόμηση 137 λιμένων με βάση κοινωνικοοικονομικά κριτήρια, όπως το μέγεθος, οι διακινήσεις και η συνδεσιμότητα, ώστε να επιλεγούν οι 10–15 πιο κρίσιμοι λιμένες για περαιτέρω ανάλυση. Στο δεύτερο στάδιο, οι επιλεγμένοι λιμένες αξιολογούνται με τη μέθοδο PROMETHEE II, λαμβάνοντας υπόψη τόσο κοινωνικοοικονομικά κριτήρια όσο και την ευπάθεια τους σε κλιματικούς κινδύνους, ενώ εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια μελλοντικών κλιματικών συνθηκών (RCP 4.5 και RCP 8.5 για τα έτη 2050 και 2100). Για την ανάθεση συντελεστών βαρύτητας και στα 2 στάδια της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AHP λαμβάνοντας υπόψη τις κρίσεις 20 εμπειρογνομόνων. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι λιμένες όπως ο Πειραιάς, το Πέραμα και η Ρόδος καταλαμβάνουν σταθερά τις υψηλότερες θέσεις στην κατάταξη, γεγονός που καταδεικνύει την ταυτόχρονη κοινωνικοοικονομική σημασία και την τρωτότητα τους στους μελλοντικούς κλιματικούς κινδύνους. Η δεύτερη αυτή μέθοδος στοχεύει στην ιεράρχηση της κρισιμότητας/τρωτότητας των ελληνικών λιμένων σε περιφερειακή και εθνική κλίμακα, προκειμένου να εντοπιστούν εκείνοι που χρήζουν προτεραιότητας για την υλοποίηση μέτρων προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή.

Η εφαρμογή των δύο μεθόδων αναδεικνύει τη σημασία της πολυεπίπεδης αξιολόγησης. Η πρώτη προσφέρει εις βάθος, ποιοτική και ποσοτική εικόνα της παρούσας κατάστασης κάθε λιμένα, αναδεικνύοντας τις εσωτερικές του δυνατότητες και ανάγκες. Η δεύτερη παρέχει ένα εργαλείο προτεραιοποίησης που υποστηρίζει τον σχεδιασμό εθνικών πολιτικών και την αποτελεσματική κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Επομένως, οι δύο μέθοδοι είναι συμπληρωματικές: η μία βοηθά στον **τοπικό σχεδιασμό στρατηγικών βελτίωσης**, ενώ η άλλη στον **στρατηγικό σχεδιασμό και προγραμματισμό σε εθνικό επίπεδο**. Η συνδυαστική τους αξιοποίηση ενισχύει την ικανότητα λήψης αποφάσεων και βελτιώνει τη συνολική προσαρμοστικότητα του ελληνικού λιμενικού συστήματος απέναντι στην Κλιματική Μεταβλητότητα και Αλλαγή.



4 Βιβλιογραφία

- Abdullah, M. F., Siraj, S., & Hodgett, R. E. (2021). An overview of multi-criteria decision analysis (Mcdca) application in managing water-related disaster events: Analyzing 20 years of literature for flood and drought events. *Water*, 13(10), 1358. <https://doi.org/10.3390/w13101358>
- Andreadis, O., Chatzipavlis, A., Hasiotis, T., Monioudi, I., Manoutsoglou, E., & Velegrakis, A. (2021). Assessment of and adaptation to beach erosion in islands: An integrated approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 859. <https://doi.org/10.3390/jmse9080859>
- de Oliveira, E. L., da Silva Portugal, L., & Junior, W. P. (2016). Indicators of reliability and vulnerability: Similarities and differences in ranking links of a complex road system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.04.004>
- Ducruet, C., Lee, S.W., Ng, A.K.Y., 2010. Centrality and vulnerability in liner shipping networks: revisiting the northeast asian port hierarchy. *Marit. Policy Manag.* 37, 17–36. <https://doi.org/10.1080/03088830903461175>
- Hwang, C.L., Yoon, K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 186. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Jafino, B. A., Kwakkel, J., & Verbraeck, A. (2020). Transport network criticality metrics: a comparative analysis and a guideline for selection. *Transport Reviews*, 40(2), 241-264. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1703843>
- Jenelius, E., Petersen, T., & Mattsson, L. G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), 537-560. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.11.003>
- Jenelius, E., & Mattsson, L. G. (2015). Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, environment and urban systems*, 49, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.02.003>
- Jiang, J., Lee, L. H., Chew, E. P., & Gan, C. C. (2015). Port connectivity study: An analysis framework from a global container liner shipping network perspective. *Transportation research part E: Logistics and transportation review*, 73, 47-64. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.10.012>
- Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A., & Seto, Y. (2009). Network evaluation based on connectivity vulnerability. In *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee: Papers selected for presentation at ISTTT18, a peer reviewed series since 1959* (pp. 637-649). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0820-9_31
- Lam, J. S. L., & Yap, W. Y. (2011). Dynamics of liner shipping network and port connectivity in supply chain systems: analysis on East Asia. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1272-1281. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.06.007>
- Luathap, P., Sumalee, A., Ho, H. W., & Kurauchi, F. (2011). Large-scale road network vulnerability analysis: a sensitivity analysis based approach. *Transportation*, 38, 799-817. <https://doi.org/10.1007/s11116-011-9350-0>
- Maity, S. R., & Chakraborty, S. (2015). Tool steel material selection using PROMETHEE II method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9–12), 1537–1547. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6760-0>
- Mateo, J. R. S. C. (2012). Multi-Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry. In *Green Energy and Technology* (Vol. 83). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2346-0>



- Notteboom, T. E., & de Langen, P. W. (2014). Container port competition in Europe. In *Handbook of Ocean Container Transport Logistics: Making Global Supply Chains Effective* (pp. 75-95). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11891-8_3
- Sullivan, J. L., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., & Scott, D. M. (2010). Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 323-336. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.003>
- Tang, L. C., Low, J. M., & Lam, S. W. (2011). Understanding port choice behavior—a network perspective. *Networks and Spatial Economics*, 11, 65-82. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9081-8>
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b11032>
- UNCTAD (2024). Port liner shipping connectivity index, quarterly. <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.PLSCI>
- Wang, J. J., & Ng, A. K. Y. (2011). The geographical connectedness of Chinese seaports with foreland markets: a new trend?. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 102(2), 188-204. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9663.2010.00600.x>
- Wang, G. W., Zeng, Q., Li, K., & Yang, J. (2016). Port connectivity in a logistic network: The case of Bohai Bay, China. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95, 341-354. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.009>
- Wang, Y., Cullinane, K., (2016). Determinants of port centrality in maritime container transportation. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 95, 326–340. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.002>
- Wu, Z., & Abdul-Nour, G. (2020). Comparison of Multi-Criteria Group Decision-Making Methods for Urban Sewer Network Plan Selection. *CivilEng*, 1(1), 26–48. <https://doi.org/10.3390/civileng1010003>
- Zavadskas, E. K., Mardani, A., Turskis, Z., Jusoh, A., & Nor, K. M. (2016). Development of TOPSIS Method to Solve Complicated Decision-Making Problems — An Overview on Developments from 2000 to 2015. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(3), 645–682. <https://doi.org/10.1142/S0219622016300019>

