



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών
Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΕΘΝΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

ΠΕΡΟΓΙΑΝΝΑΚΗ ΧΡΥΣΗ

Επιβλέπων καθηγητής:

Σίσκος Ελευθέριος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Δούμπος Μιχαήλ,
Παπαεθυμίου Σπυρίδων

Χανιά, 2025

*Η παρούσα διπλωματική εργασία
αφιερώνεται σε όλους όσοι
πίστεψαν σε εμένα, ακόμη και στις
στιγμές που εγώ η ίδια αμφέβαλλα.*

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, ο οποίος ήταν δίπλα μου σε κάθε βήμα αυτής της διπλωματικής προσφέροντας αδιάκοπα και υπομονετικά, την καθοδήγησή και τις συμβουλές του. Ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη κατανόηση και την υποστήριξή τους, τόσο στις εύκολες όσο και στις πιο απαιτητικές στιγμές. Χάρη σε όλους εσάς και στην πολύτιμη βοήθεια σας αυτό το εγχείρημα μετατράπηκε από όραμα σε πραγματικότητα, ξεπερνώντας κάθε προσδοκία.

Περίληψη

Η διατήρηση και η ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και ανθεκτικότητας αποτελούν στρατηγικές εθνικές προτεραιότητες, ενώ παράλληλα αποτελούν κρίσιμα στοιχεία στη γεωπολιτική διάταξη, επηρεάζοντας την ενεργειακή εξάρτηση και την παγκόσμια σταθερότητα. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή ασφάλεια και ανθεκτικότητα αφορούν στην αδιάλειπτη, οικονομικά προσιτή και περιβαλλοντικά βιώσιμη παροχή ενέργειας, καθώς και στην ικανότητα ενός ενεργειακού συστήματος να προβλέπει, να αντέχει, να προσαρμόζεται και να ανακάμπτει από διάφορες διαταραχές, όπως φυσικές καταστροφές, γεωπολιτικές κρίσεις, τεχνολογικές βλάβες ή κυβερνοεπιθέσεις. Σημαντικός παράγοντας επίτευξης ενεργειακής ασφάλειας σε εθνικό επίπεδο αποτελεί η κατάλληλα σχεδιασμένη γεωγραφική διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, καθώς αποτρέπει τη συγκέντρωσή τους σε ευάλωτα σημεία, μειώνει την ευπάθεια του δικτύου και αποτρέπει τον κίνδυνο εκτεταμένων διακοπών ηλεκτροδότησης. Επιπλέον, η διασπορά διευκολύνει την ενσωμάτωση αποκεντρωμένων ανανεώσιμων πηγών και ενισχύει συνολικά τη σταθερότητα και βιωσιμότητα των ενεργειακών υποδομών. Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη κατάλληλων δεικτών μέτρησης της διασποράς μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και αξιολόγησης της επάρκειάς τους να διαχειριστούν ετερογενή γεωγραφικά δεδομένα. Για την ποσοτική εκτίμηση της διασποράς χρησιμοποιούνται δείκτες χωρικής ανάλυσης, όπως το Convex Hull για τη χαρτογράφηση του γεωγραφικού περιβλήματος και ο Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα (Nearest Neighbor Index, R), ο οποίος ανιχνεύει τη συγκέντρωση ή διασπορά των δεδομένων. Επίσης, εφαρμόζεται και η συνάρτηση K του Ripley, η οποία υπολογίζει πώς μεταβάλλεται ο μέσος αριθμός μονάδων εντός μιας δεδομένης ακτίνας σε σύγκριση με μια τυχαία κατανομή, γεγονός που επιτρέπει τον εντοπισμό αποστάσεων όπου η πυκνότητα των μονάδων είναι ασυνήθιστα υψηλή ή χαμηλή. Στη συνέχεια, οι δείκτες αξιολογούνται αναλυτικά μέσω της εφαρμογής τους σε πραγματικά γεωχωρικά δεδομένα μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, μεσαίας ή μεγάλης δυναμικότητας, με τη χρήση τεχνικών κριτηρίων. Η εφαρμογή γίνεται σε περιβάλλον MATLAB και δοκιμάζεται σε δεδομένα ετερογενών γεωχωρικών χωρών, όπως η Ελλάδα και την Ελβετία. Η αξιολόγηση των δεικτών αποσκοπεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων και την πρόταση των πιο κατάλληλων εξ' αυτών σε πραγματικές εφαρμογές αξιολόγησης της ενεργειακής ασφάλειας. Απώτερος σκοπός της εργασίας είναι η ευαισθητοποίηση των φορέων χάραξης πολιτικής στο μείζονα ρόλο της διασποράς ηλεκτροπαραγωγής και τη διαμόρφωση κατευθυντήριων γραμμών για τη μέτρηση και ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας.

Λέξεις κλειδιά: Ενεργειακή ασφάλεια, εθνική ανθεκτικότητα, γεωγραφική διασπορά, δείκτες χωρικής ανάλυσης, Ripley's K-function

Abstract

The maintenance and enhancement of energy security and resilience constitute strategic national priorities, while also serving as critical elements in the geopolitical landscape, influencing energy dependence and global stability. Specifically, energy security and resilience pertain to the uninterrupted, economically affordable, and environmentally sustainable supply of energy, as well as to the ability of an energy system to anticipate, withstand, adapt to, and recover from various disruptions such as natural disasters, geopolitical crises, technological failures, or cyberattacks. A key factor in achieving national energy security is the meticulously designed geographic dispersion of power generation units, which prevents their concentration in vulnerable locations, reduces the network's susceptibility, and mitigates the risk of widespread power outages. Moreover, dispersion facilitates the integration of decentralized renewable sources and overall reinforces the stability and sustainability of energy infrastructure. The present thesis aims to develop appropriate indicators for measuring the dispersion of power generation units and evaluating their capacity to manage heterogeneous geographic data. For the quantitative estimation of dispersion, spatial analysis metrics are employed, such as the Convex Hull for mapping the geographic envelope and the Nearest Neighbor Index (R), which detects data clustering or dispersion. Additionally, Ripley's K-function is applied to calculate how the average number of units within a given radius deviates from a random distribution, thereby enabling the identification of distances at which unit density is unusually high or low. Subsequently, these indicators are rigorously evaluated through their application to real geospatial data of medium- and large-capacity power generation units, using technical criteria. The implementation is carried out in a MATLAB environment and evaluated on geospatially heterogeneous datasets from countries such as Greece and Switzerland. The evaluation seeks to draw conclusions and recommend the most suitable indicators for real-world applications in assessing energy security. The goal of this work is to raise policymakers' awareness of the pivotal role of power generation dispersion and to formulate guidelines for measuring and strengthening energy security.

Keywords: Energy security, Resilience of the energy system, Geographical dispersion, Spatial analysis indices, Ripley's K-function

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	11
1.1. Το Ενεργειακό Σύστημα και η σημασία του	11
1.2. Από την Ενεργειακή Ασφάλεια στη Βιωσιμότητα και την Ανθεκτικότητα	11
1.3. Η διασπορά μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ως νέος δείκτης	12
2. Ενεργειακή Ανθεκτικότητα και Ασφάλεια: Ορισμοί και Θεωρητικές Προσεγγίσεις.....	14
2.1. Ενεργειακή ανθεκτικότητα και ενεργειακή ασφάλεια	14
2.2. Δείκτες Αξιολόγησης Ενεργειακής Ασφάλειας.....	18
2.3. Σκοπός και σημασία διασποράς μονάδων ηλεκτροπαραγωγής	20
2.4. Η διασπορά ως μέτρο ενεργειακής ανθεκτικότητας και ασφάλειας	22
2.5. Βιβλιογραφικό Κενό	23
3. Μέτρηση διασποράς στο χώρο και κριτική αξιολόγηση των δεικτών	25
3.1. Μεθοδολογική προσέγγιση	25
3.2. Η έννοια της διασποράς	27
3.3. Μέθοδοι και δείκτες μέτρησης διασποράς στο χώρο	27
3.3.1. Convex Hull.....	29
3.3.2. Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα - Nearest Neighbor Index (R).....	33
3.3.3. Η συνάρτηση K του Ripley	34
3.3.4. Ο δείκτης I του Moran και ο λόγος C του Geary	42
3.4. Επιλογή και Αξιοποίηση Δεικτών Διασποράς στην Ενεργειακή Ασφάλεια	44
4. Πειραματική εφαρμογή των δεικτών σε πραγματικά γεωγραφικά δεδομένα	46
4.1. Περιγραφή χωρικών δεδομένων συνόρων και δεδομένων των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.....	46
4.2. Εφαρμογή του δείκτη του Εγγύτερου Γείτονα - Nearest Neighbor Index (R)	48
4.2.1. Μελέτη περίπτωσης: Ελβετία	48
4.2.2. Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα.....	56
4.2.3. Μελέτη περίπτωσης: Γαλλία	63

4.3. Εφαρμογή του δείκτη Ripley's K.....	64
4.3.1. Αρχική πειραματική υλοποίηση, δοκιμαστικά δεδομένα	65
4.3.2. Μελέτη περίπτωσης: Ελβετία	68
4.3.3. Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα.....	75
4.3.4. Μελέτη περίπτωσης: Γαλλία	83
5. Εφαρμογή των Δεικτών Διασποράς ως δείκτες Ενεργειακής Ασφάλειας και	
Ανθεκτικότητας	85
5.1. Τιμές του Δείκτη Εγγύτερου Γείτονα (R)	85
5.2. Προτεινόμενη μεθοδολογία για τον δείκτη Ripley's K	86
5.3. Συζήτηση αποτελεσμάτων	90
6. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	93
Βιβλιογραφία	95

1. Εισαγωγή

1.1. Το Ενεργειακό Σύστημα και η σημασία του

Το ενεργειακό σύστημα αποτελεί τη ραχοκοκαλιά κάθε σύγχρονης κοινωνίας. Περιλαμβάνει τις πηγές ενέργειας, τις τεχνολογίες μετατροπής, τις υποδομές μεταφοράς και διανομής, καθώς και τους μηχανισμούς αγοράς και διακυβέρνησης που εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη παροχή ενέργειας. Η σημασία του είναι ζωτικής φύσεως, καθώς η ενέργεια δεν αποτελεί μόνο έναν οικονομικό συντελεστή παραγωγής αλλά και βασικό αγαθό για την καθημερινή ζωή, την κοινωνική συνοχή και την εθνική ασφάλεια. Οι κύριοι πυλώνες σε ένα ενεργειακό σύστημα είναι η αξιοπιστία (να καλύπτει σταθερά τη ζήτηση), η προσιτότητα (να παραμένει σε ανεκτό κόστος για πολίτες και επιχειρήσεις), η βιωσιμότητα (να περιορίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις) και η κοινωνική αποδοχή (να ανταποκρίνεται στις ανάγκες και τις προτεραιότητες της κοινωνίας). Ένα ενεργειακό σύστημα που αποτυγχάνει σε κάποιο από αυτά τα στοιχεία εκθέτει τη εν λόγω χώρα σε σοβαρούς κινδύνους.

Κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, τα ενεργειακά συστήματα των περισσότερων χωρών δομήθηκαν γύρω από τα ορυκτά καύσιμα. Η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 ανέδειξε για πρώτη φορά την τρωτότητα της εξάρτησης από λίγους προμηθευτές. Σήμερα, παρόμοια διλήμματα επανεμφανίζονται. Η ενεργειακή κρίση που προκλήθηκε από την εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς στις εισαγωγές ρωσικού φυσικού αερίου και πετρελαίου, ανέδειξε τους κινδύνους της υπερβολικής εξάρτησης από έναν μόνο προμηθευτή και τόνισε την ανάγκη διαφοροποίησης των πηγών εφοδιασμού [53],[54]. Παράλληλα, το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο μετασχηματίζεται μέσα από την ενεργειακή μετάβαση (Energy transition). Η αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί αναπόφευκτη επιλογή για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, όμως φέρνει νέες προκλήσεις: διαλείπουσα παραγωγή, ανάγκη για αποθήκευση και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη διαχείριση του συστήματος [55]. Έτσι, ο στόχος δεν είναι μόνο η «καθαρή ενέργεια», αλλά και η σταθερότητα και ανθεκτικότητα των συστημάτων που καλούνται να ενσωματώσουν αυτές τις νέες τεχνολογίες.

1.2. Από την Ενεργειακή Ασφάλεια στη Βιωσιμότητα και την Ανθεκτικότητα

Η ενεργειακή ασφάλεια (Energy security), όπως θα αναλυθεί περισσότερο και στο κεφάλαιο 2.1, αποτελεί έναν όρο με ιστορικό βάθος και πολυδιάστατο περιεχόμενο. Δεν περιορίζεται μόνο στη φυσική διαθεσιμότητα πόρων, αλλά περιλαμβάνει οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις, καθώς και την ικανότητα ενός συστήματος να αντέχει και να ανακάμπτει από διαταραχές. Εξού και η στενή της σχέση με την έννοια της ενεργειακής ανθεκτικότητας: την ικανότητα πρόβλεψης,

αντοχής, προσαρμογής και ανάκαμψης απέναντι πλήγματα, είτε αυτά είναι γεωπολιτικά, φυσικά ή τεχνολογικά[56].

Η αξιολόγηση της ενεργειακής ασφάλειας είναι εξαιρετικά περίπλοκη, καθώς δεν έχει θεσπιστεί ένας αμοιβαία αποδεκτός δείκτης ούτε κάποια κοινώς αποδεκτή πρότυπη μεθοδολογία αξιολόγησης. Στη βιβλιογραφία συναντώνται ποικίλες προσεγγίσεις: από σύνθετους δείκτες βασισμένους σε στατιστικά δεδομένα, έως πολυκριτηριακές μεθοδολογίες (Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων - MCDA), λ.χ. η σταθμισμένη άθροιση, η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA), η μέθοδος DEA, ή πιο προχωρημένα μοντέλα όπως το ολοκλήρωμα Choquet [57], που επιτρέπει την ενσωμάτωση αλληλεπιδράσεων μεταξύ κριτηρίων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα και η ετερογένεια δεδομένων, καθώς και η δυναμικότητα του ίδιου του ορισμού της ενεργειακής ασφάλειας, καθιστούν δύσκολη τη σύγκριση και την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων [58].

Από την άλλη πλευρά, η συζήτηση για το μέλλον των ενεργειακών συστημάτων δεν μπορεί να αγνοήσει τη βιωσιμότητα. Η απανθρακοποίηση και η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής συνδέονται άμεσα με την ασφάλεια, αφού η εξάρτηση από μη ανανεώσιμες και εισαγόμενες πηγές δημιουργεί διπλό ρίσκο: περιβαλλοντικό και γεωπολιτικό. Έτσι, η ασφάλεια και η βιωσιμότητα δεν είναι αντίθετες, αλλά αλληλένδετες έννοιες. Υπό αυτό το πρίσμα η ενεργειακή ανθεκτικότητα αναδεικνύεται σε κομβικό ζητούμενο. Δεν αρκεί ένα σύστημα να είναι «σταθερό» ή «πράσινο»· πρέπει να μπορεί να αντέξει και να ανακάμψει όταν προκύψουν σοβαρές κρίσεις, είτε πρόκειται για διακοπές τροφοδοσίας, ακραία καιρικά φαινόμενα, είτε στοχευμένες φυσικές ή ψηφιακές επιθέσεις.

1.3. Η διασπορά μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ως νέος δείκτης

Παρά την πληθώρα μεθόδων και δεικτών που χρησιμοποιούνται, μια διάσταση παραμένει σχετικά ανεκμετάλλευτη: η γεωγραφική διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής [59]. Ένα ενεργειακό σύστημα με μονάδες συγκεντρωμένες σε λίγες περιοχές είναι περισσότερο εκτεθειμένο σε τοπικούς κλυδωνισμούς (σεισμούς, πλημμύρες, τεχνικές βλάβες, εχθρικές ενέργειες). Αντίθετα, ένα σύστημα με ευρεία και ισορροπημένη διασπορά θα δεχθεί μεν σοβαρά πλήγματα σε μεμονωμένες του δομές τοπικά αλλά ενδεχομένως δε θα καταρρεύσει, καθώς δε θα συμπαρασυρθεί η διαταραχή σε πολλαπλά στοιχεία του.

Η διασπορά των κρίσιμων ενεργειακών υποδομών, όπως οι κύριες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί, συνεπώς, να αποτελέσει δείκτη ενεργειακής ανθεκτικότητας σε εθνικό επίπεδο. Μέχρι σήμερα παρατηρείται πολύ περιορισμένη συσχέτιση της διασποράς των υποδομών με την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια, επομένως η παρούσα εργασία επιδιώκει να την εντάξει σε ένα

συνεκτικό πλαίσιο αξιολόγησης, αναδεικνύοντας τον ρόλο της ως συμπληρωματικό εργαλείο στις υπάρχουσες προσεγγίσεις.

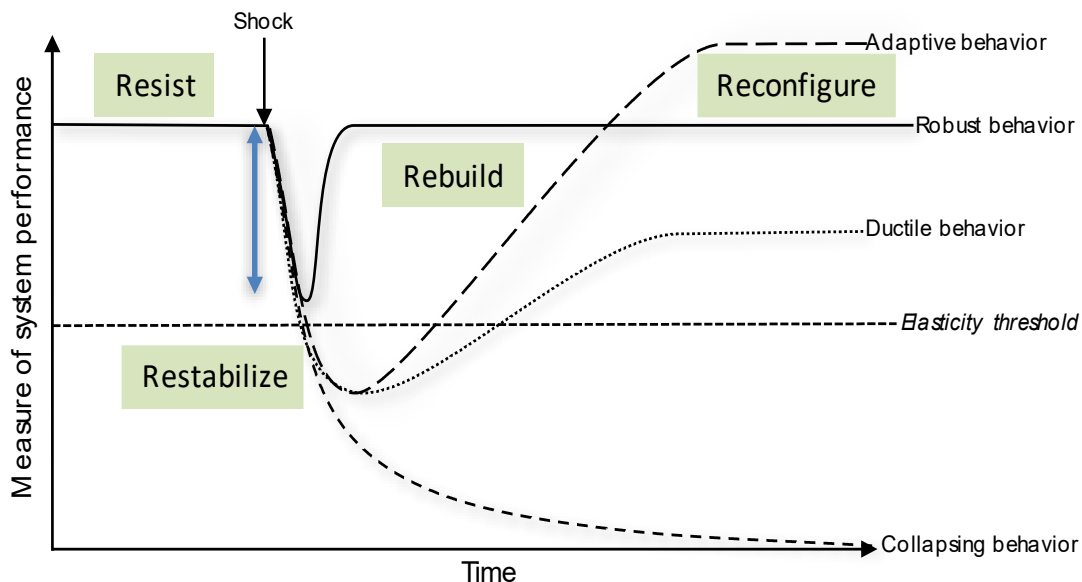
Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία επιχειρεί να συνδέσει το θεωρητικό πλαίσιο της ενεργειακής ασφάλειας και ανθεκτικότητας με μια πρακτική και μετρήσιμη διάσταση που μπορεί να υποστηρίξει τον ενεργειακό σχεδιασμό σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν ως μελέτες περίπτωσης τρεις χώρες: η Ελβετία, λόγω της απλής γεωμετρικής οριοθέτησης χωρίς νησιωτικά συμπλέγματα, η Ελλάδα, με ιδιαίτερα περίπλοκη συνοριακή γραμμή που αυξάνει σημαντικά τον δείκτη δυσκολίας της ανάλυσης, και τέλος η Γαλλία, λόγω της ιδιαίτερης χωρικής κατανομής των πυρηνικών της μονάδων, δεδομένου ότι η Ελλάδα δε διαθέτει τέτοιες εγκαταστάσεις.

Οι τρεις αυτές χώρες λειτουργούν ως καμβάς για την εφαρμογή των δεικτών μέτρησης της γεωγραφικής διασποράς που θα αναπτυχθούν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Κατόπιν, η αξιοπιστία και η ευκολία εφαρμογής των δεικτών θα εκτιμηθεί, με σκοπό να δοθούν κατευθυντήριες γραμμές στο ακαδημαϊκό κοινό που επιθυμεί να εντάξει αντίστοιχους δείκτες στην έρευνα του. Τέλος, οι δείκτες διασποράς ποσοτικοποιούνται για κάθε μελέτη περίπτωσης και καθεμιά από τις τρεις χώρες, και προτείνονται ευριστικοί τρόποι για την μετάφραση τους σε δείκτες ενεργειακής ανθεκτικότητας.

2. Ενεργειακή Ανθεκτικότητα και Ασφάλεια: Ορισμοί και Θεωρητικές Προσεγγίσεις

2.1. Ενεργειακή ανθεκτικότητα και ενεργειακή ασφάλεια

Η ενεργειακή ανθεκτικότητα και η ενεργειακή ασφάλεια αποτελούν δύο βασικές παραμέτρους στη διαχείριση και τον σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων. Η ενεργειακή ανθεκτικότητα έχει περιγραφεί ως η επιστήμη της πρόβλεψης και διαχείρισης εκπλήξεων [4] και ουσιαστικά αναφέρεται στην ικανότητα ενός ενεργειακού συστήματος να προβλέπει, να αντέχει, να προσαρμόζεται και να ανακάμπτει από διαταραχές [61], [5]. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να προκύπτουν από φυσικές καταστροφές, γεωπολιτικές συγκρούσεις, τεχνολογικές αστοχίες ή κυβερνοεπιθέσεις. Επομένως, η ύπαρξη ενός ανθεκτικού ενεργειακού συστήματος διασφαλίζει τη σταθερότητα της παροχής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις τέτοιων γεγονότων στην οικονομία και την κοινωνία.



Εικόνα 2.1. Οι τέσσερις φάσεις της ενεργειακής ανθεκτικότητας [60].

Στην Εικόνα 2.1 που παρατίθεται, απεικονίζονται οι τέσσερις θεμελιώδεις φάσεις της ενεργειακής ανθεκτικότητας (resilience), όπως αυτές περιγράφονται σε συστημικά μοντέλα [60]. Αποτυπώνεται η πολυδιάστατη φύση της ανθεκτικότητας, η οποία δεν περιορίζεται στην απλή επαναφορά της λειτουργικότητας ενός ενεργειακού συστήματος, αλλά επεκτείνεται και στην ικανότητά του να μαθαίνει και να εξελίσσεται μέσα από τις κρίσεις. Οι τέσσερις φάσεις που αποτυπώνονται στο σχήμα (με πράσινο χρώμα) είναι οι εξής:

- **Resist (Αντίσταση):** Η πρώτη φάση αφορά την ικανότητα του συστήματος να αντέξει ή να μετριάσει τις συνέπειες ενός πλήγματος ή μιας διαταραχής, χωρίς να οδηγηθεί σε κατάρρευση. Στο πλαίσιο αυτό, κρίσιμη σημασία έχουν τα προληπτικά μέτρα, ο ασφαλής σχεδιασμός των υποδομών καθώς και η ύπαρξη λειτουργικών εφεδρειών.
- **Restabilize (Επανασταθεροποίηση):** Η φάση αυτή αντιστοιχεί στην περίοδο αμέσως μετά τη διαταραχή, κατά την οποία το σύστημα επιδιώκει να ανακτήσει ένα ελάχιστο επίπεδο σταθερότητας, όσο πιο σύντομα είναι εφικτό. Επομένως, κεντρικός δείκτης εδώ είναι η ταχύτητα με την οποία το σύστημα επανέρχεται σε λειτουργική κατάσταση, στοιχείο που αναδεικνύει τη δυναμική του στην άμεση απόκριση.
- **Rebuild (Αποκατάσταση):** Η τρίτη φάση αναφέρεται στην οργανωμένη διαδικασία αποκατάστασης, η οποία μπορεί να είναι πλήρης ή μερική, των λειτουργικών δυνατοτήτων του συστήματος. Περιλαμβάνει την επισκευή ή ανακατασκευή κρίσιμων υποδομών και την επαναφορά της κανονικής επιχειρησιακής λειτουργίας.
- **Reconfigure (Επαναδιαμόρφωση / Προσαρμογή):** Στην τελική φάση, το σύστημα αξιοποιεί τις εμπειρίες που αποκόμισε από το συμβάν για να επαναδιαμορφώσει τις δομές και τις διαδικασίες του. Η προσαρμογή αυτή μπορεί να συνίσταται στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, στην αναθεώρηση του σχεδιασμού ή στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι σε μελλοντικές προκλήσεις.

Συνολικά, οι τέσσερις φάσεις της ενεργειακής ανθεκτικότητας αποδεικνύουν ότι η διαχείριση κρίσεων στα ενεργειακά συστήματα δεν αποτελεί μια γραμμική διαδικασία, αλλά αντιθέτως μια κυκλική και εξελικτική πορεία. Η ανθεκτικότητα δεν εξαντλείται στην άμεση απόκριση ή στην απλή αποκατάσταση, αλλά προϋποθέτει τη διαρκή μάθηση και την προσαρμογή σε νέες συνθήκες, διασφαλίζοντας έτσι τη βιωσιμότητα και τη σταθερότητα του ενεργειακού τομέα σε βάθος χρόνου.

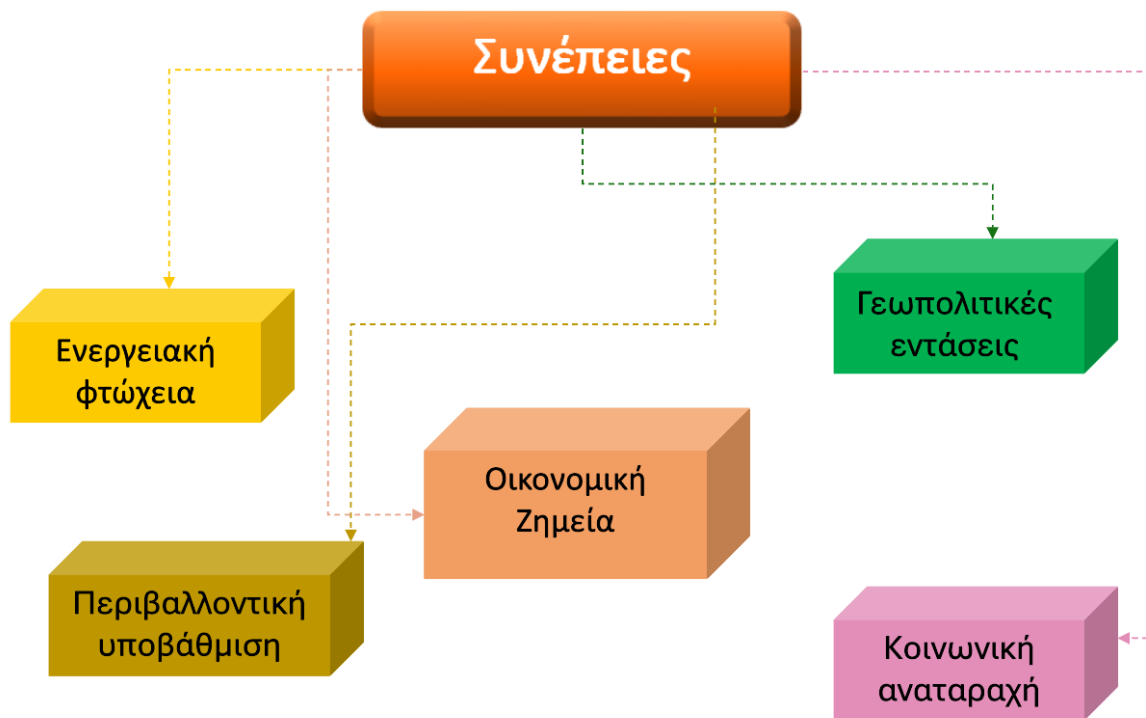
Η ενεργειακή ασφάλεια, έχει ανά τα χρόνια λάβει διάφορους ορισμούς. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA) ορίζεται ως «την αδιάλειπτη διαθεσιμότητα ενεργειακών πηγών σε προσιτή τιμή» [38], ενώ το NREL (National Renewable Energy Laboratory), επεκτείνει αυτή τη φράση σε «η αδιάλειπτη διαθεσιμότητα πηγών ενέργειας σε προσιτή τιμή, με στόχο την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνεπειών από τη χρήση ενέργειας και συμπεριλαμβανομένων της αποδοτικότητας και των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και γεωπολιτικών παραγόντων» [39]. Με βάση το World Energy Council (WEC), ορίζεται ως «την ικανότητα ενός συστήματος να ικανοποιεί με αξιοπιστία την τρέχουσα και μελλοντική ζήτηση ενέργειας, να αντέχει και να ανακάμπτει γρήγορα από διαταράξεις

(system shocks), και να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τους εγχώριους και εξωτερικούς πόρους, διασφαλίζοντας τη λειτουργική αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα των ενεργειακών υποδομών». Στον Δείκτη Ενεργειακού Τριλήμματος (World Energy Trilemma Index) του 2020, το WEC αποσαφηνίζει ότι η διάσταση «Energy Security» μετρά ακριβώς αυτήν τη δυνατότητα ανθεκτικότητας/ανάκαμψης, καθώς και την αποτελεσματικότητα διαχείρισης πηγών και την αξιοπιστία/ανθεκτικότητα υποδομών. Στο εννοιολογικό πλαίσιο του «Ενεργειακού Τριλήμματος», η ενεργειακή ασφάλεια αποτελεί έναν από τους τρεις ισότιμους πυλώνες μαζί με την ενεργειακή ισότητα (equity/affordability) και τη περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Το WEC τονίζει ότι οι τρεις διαστάσεις πρέπει να ισορροπούνται συνδυαστικά και όχι αποσπασματικά [36].

Το Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC, 2007) εισήγαγε ένα αναλυτικό πλαίσιο για την ασφάλεια του ενεργειακού συστήματος, γνωστό ως «οι τέσσερις Α» (*Four A's*). Το συγκεκριμένο σχήμα κριτηρίων αποσκοπεί στην αποτύπωση των κρίσιμων διαστάσεων που συνθέτουν την έννοια της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, υπερβαίνοντας τις παραδοσιακές προσεγγίσεις που περιορίζονταν κυρίως στη διαθεσιμότητα των πόρων [37]. Το πρώτο κριτήριο αφορά τη Διαθεσιμότητα (Availability) και αναφέρεται στην επάρκεια των ενεργειακών πόρων, είτε εγχώριων είτε εισαγόμενων, καθώς και στη διαφοροποίηση των πηγών και προμηθευτών. Σε αυτό υπάγονται έννοιες όπως η ενεργειακή εξάρτηση (% εισαγωγών στο σύνολο κατανάλωσης) και η τοποθέτηση της παραγωγής έναντι κατανάλωσης. Η Προσβασιμότητα (Accessibility) σχετίζεται με τη γεωγραφική, τεχνική και θεσμική δυνατότητα πρόσβασης στους πόρους μέσω κατάλληλων υποδομών μεταφοράς, αποθήκευσης και τεχνολογίας. Εδώ εξετάζονται τομείς όπως οι διασυνδέσεις με γειτονικά δίκτυα, οι υποδομές αποθήκευσης και εισαγωγής, ακόμα και ο χρόνος αποκατάστασης μετά από κάποια διακοπή. Το τρίτο κριτήριο, η Προσιτότητα (Affordability), δίνει έμφαση στη σταθερότητα και το επίπεδο των τιμών ενέργειας, επιδιώκοντας την οικονομική βιωσιμότητα τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις εθνικές οικονομίες. Αποτελείται από αξιολογήσεις για την μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά και την βιομηχανία, την ενεργειακή φτώχεια (το % νοικοκυριών που δαπανούν περισσότερο από 10 % του εισοδήματος σε ενέργεια), καθώς και την σχέση των τιμών ενέργειας με το ΑΕΠ. Τέλος, η Αποδοχή (Acceptability) εστιάζει στις κοινωνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, εξετάζοντας κατά πόσο οι μορφές ενέργειας είναι φιλικές προς το περιβάλλον και κοινωνικά αποδεκτές. Οι εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο ή ανά μονάδα ΑΕΠ, η συμμόρφωση με διεθνείς περιβαλλοντικούς στόχους αλλά και η κοινωνική αποδοχή έργων (π.χ. ανεμογεννήτριες, πυρηνικά) είναι μόνο μερικά από τα κριτήρια που πρέπει να τεθούν υπό εξέταση, σε επίπεδο χώρας.

Επιπλέον, η ενεργειακή ασφάλεια αφορά και άλλα ζητήματα όπως η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, η γεωπολιτική σταθερότητα, η διατήρηση στρατηγικών αποθεμάτων και η επάρκεια των

ενεργειακών υποδομών [6], [7]. Ένα ασφαλές ενεργειακό σύστημα προστατεύει τους καταναλωτές από απρόβλεπτες διακοπές, εξασφαλίζοντας ότι η ζήτηση για ενέργεια μπορεί να καλυφθεί αποτελεσματικά και βιώσιμα. Συνεπώς, η έλλειψη ενεργειακής ασφάλειας, επιφέρει ένα σύνολο αλυσιδωτών επιπτώσεων, οι οποίες καταδεικνύονται σχηματικά στην Εικόνα 2.2. Συγκεκριμένα, η αδυναμία εξασφάλισης σταθερής και αξιόπιστης πρόσβασης σε ενεργειακούς πόρους οδηγεί σε ενεργειακή φτώχεια, περιβαλλοντική υποβάθμιση και σοβαρές οικονομικές ζημίες, ενώ παράλληλα ενισχύει τις γεωπολιτικές εντάσεις και τροφοδοτεί την κοινωνική αναταραχή. Οι παράμετροι αυτοί, αλληλοσυνδεόμενοι και αλληλοτροφοδοτούμενοι, υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο της ενεργειακής ασφάλειας ως θεμελιώδους προϋπόθεσης για τη σταθερότητα, τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη διατήρηση της σύγχρονης κοινωνικής συνοχής.



Εικόνα 2.2. Συνέπειες έλλειψης Ενεργειακής ασφάλειας [Πηγή: Σίσκος, Ε. 2025].

Συνολικά, η ενεργειακή ανθεκτικότητα και η ενεργειακή ασφάλεια αποτελούν έννοιες αλληλένδετες, οι οποίες εξελίσσονται δυναμικά για να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Από τη μία πλευρά, η ανθεκτικότητα επικεντρώνεται στην ικανότητα πρόβλεψης, προσαρμογής και ανάκαμψης απέναντι σε απρόβλεπτες διαταραχές, ενώ από την άλλη, η ασφάλεια ενσωματώνει ένα πολυδιάστατο πλέγμα παραμέτρων που ξεκινούν από τη διαθεσιμότητα και φτάνουν έως την κοινωνική αποδοχή και τη βιωσιμότητα. Η σύνδεσή τους καθιστά σαφές ότι η μακροπρόθεσμη σταθερότητα των ενεργειακών συστημάτων δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσα από

μονοδιάστατες πολιτικές, αλλά απαιτεί συνδυασμένη στρατηγική που ενώνει την επάρκεια, την οικονομική προσιτότητα, την κοινωνική και περιβαλλοντική αποδοχή, καθώς και την ικανότητα απορρόφησης και υπέρβασης κρίσεων. Με τον τρόπο αυτό, η ενεργειακή ασφάλεια δεν ορίζεται μόνο από την κάλυψη της ζήτησης, αλλά και από την ικανότητα του συστήματος να διασφαλίζει ένα αξιόπιστο, προσιτό και βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

2.2. Δείκτες Αξιολόγησης Ενεργειακής Ασφάλειας

Η θεωρητική κατανόηση της ενεργειακής ασφάλειας αποκτά πρακτική αξία όταν μεταφράζεται σε μετρήσιμους δείκτες, μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση της απόδοσης ενός ενεργειακού συστήματος, η σύγκρισή του με άλλα και η παρακολούθηση της εξέλιξής του στον χρόνο. Αφού παρουσιάστηκαν οι βασικοί ορισμοί και τα εννοιολογικά πλαίσια που έχουν διαμορφώσει διεθνείς οργανισμοί και ερευνητικά κέντρα, ακολουθεί η αποσαφήνιση του τρόπου με τον οποίο η έννοια αυτή μετριέται και αξιολογείται στην πράξη. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί πολυδιάστατα συστήματα αξιολόγησης, τα οποία κατηγοριοποιούν τους δείκτες σε πέντε βασικές ενότητες [36],[37]:

- I. Διαθεσιμότητα και Προσβασιμότητα,
- II. Οικονομική διάσταση,
- III. Υποδομές,
- IV. Περιβαλλοντική διάσταση, και
- V. Διακυβέρνηση και Κοινωνία.

Η ομαδοποίηση αυτή αναδεικνύει την πολυπλοκότητα της ενεργειακής ασφάλειας και καθιστά εφικτή την ανάλυσή της από διαφορετικές οπτικές.

Η πρώτη διάσταση αφορά την ασφάλεια του εφοδιασμού σε πρωτογενείς και δευτερογενείς πηγές ενέργειας. Ενδεικτικοί δείκτες είναι το ποσοστό εισαγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο, η ύπαρξη και η επάρκεια στρατηγικών αποθεμάτων, καθώς και ο δείκτης διαφοροποίησης των προμηθευτών (Herfindahl–Hirschman Index, HHI, [44]). Η υψηλή εξάρτηση από έναν μόνο προμηθευτή ή καύσιμο αυξάνει την τρωτότητα, ενώ η διαφοροποίηση και η ύπαρξη αποθηκευτικών δυνατοτήτων, μειώνει με την σειρά της, την έκθεση σε γεωπολιτικούς και τεχνικούς κινδύνους.

Η δεύτερη διάσταση σχετίζεται με την προσιτότητα και τη βιωσιμότητα της ενέργειας ως οικονομικού αγαθού. Η ενεργειακή παραγωγικότητα (ΑΕΠ ανά τόνο ισοδύναμου πετρελαίου) δείχνει την αποδοτικότητα χρήσης ενέργειας στην οικονομία [47]. Παράλληλα, η μεταβλητότητα των τιμών ενέργειας (π.χ. φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού) επηρεάζει άμεσα την ανταγωνιστικότητα των

επιχειρήσεων και την ευημερία των νοικοκυριών [46]. Δείκτες όπως το ποσοστό δαπανών για ενέργεια στο διαθέσιμο εισόδημα ή η σταθερότητα των τιμών αποτελούν αδιαμφισβήτητα κρίσιμα στοιχεία της οικονομικής διάστασης [45].

Η τρίτη διάσταση αποτυπώνει την αξιοπιστία και ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος. Δείκτες όπως το SAIDI (System Average Interruption Duration Index) [48], μετρούν τη μέση διάρκεια διακοπών ηλεκτροδότησης ανά καταναλωτή, ενώ ο δείκτης εφεδρικής ισχύος (reserve margin) αποτυπώνει την επάρκεια του συστήματος να ανταποκριθεί σε αιχμές ζήτησης [50], [49]. Επιπλέον, η ύπαρξη επαρκούς τεχνικού προσωπικού (π.χ. αριθμός αποφοίτων μηχανικών ενέργειας) και η δυνατότητα ανάπτυξης νέων δικτύων και διασυνδέσεων αποτελούν βασικούς παράγοντες για τη λειτουργική ασφάλεια των ενεργειακών υποδομών.

Η τέταρτη διάσταση αφορά τις περιβαλλοντικές συνέπειες και τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος. Η ενεργειακή και περιβαλλοντική φορολογία δείχνει τον βαθμό ενσωμάτωσης των εξωτερικών επιδράσεων στην τιμή της ενέργειας [47], ενώ η κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο συνδέεται με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την ενεργειακή αποδοτικότητα [46], [52]. Επιπλέον, η χρήση κρίσιμων πρώτων υλών για ΑΠΕ (π.χ. σπάνιες γαίες) [52], και η ένταση εκπομπών στον τομέα των μεταφορών αποτελούν σημαντικούς δείκτες [46], που συνδέουν την ενεργειακή ασφάλεια με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης και κλιματικής ουδετερότητας.

Η πέμπτη διάσταση εστιάζει στο θεσμικό και κοινωνικό πλαίσιο που στηρίζει την ενεργειακή ασφάλεια. Δείκτες όπως ο δείκτης πολιτικής σταθερότητας, ο δείκτης διαφθοράς και η ποιότητα του ρυθμιστικού πλαισίου αποτυπώνουν το περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το ενεργειακό σύστημα [32], [49]. Παράλληλα, η κοινωνική αποδοχή των ενεργειακών έργων και η συμμετοχή των πολιτών στη διαμόρφωση ενεργειακής πολιτικής επηρεάζουν άμεσα την υλοποίηση επενδύσεων και την επίτευξη στόχων ανθεκτικότητας [49].

Συνοψίζοντας, οι δείκτες αξιολόγησης της ενεργειακής ασφάλειας αποτυπώνουν την πολύεδρη φύση της έννοιας και επιτρέπουν την ανάλυσή της μέσα από διαφορετικά πρίσματα: τον εφοδιασμό και τη διαφοροποίηση πηγών, την οικονομική βιωσιμότητα, την αξιοπιστία των υποδομών, την περιβαλλοντική επίδραση και το θεσμικό πλαίσιο διακυβέρνησης. Η ένταξη αυτών των διαστάσεων παρέχει μια σφαιρική εικόνα του επιπέδου ασφάλειας ενός ενεργειακού συστήματος, ενισχύοντας τόσο τη δυνατότητα συγκριτικών αναλύσεων όσο και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Ωστόσο, παρά τη χρησιμότητά τους, οι δείκτες αυτοί εστιάζουν κυρίως σε μακρο-οικονομικά, περιβαλλοντικά και θεσμικά χαρακτηριστικά, αφήνοντας σε δεύτερο πλάνο τον χωρικό παράγοντα. Σε αυτό το σημείο, η παρούσα εργασία έρχεται να προτείνει τη

διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ως έναν συμπληρωματικό δείκτη ενεργειακής ανθεκτικότητας, ικανό να ενισχύσει τις υφιστάμενες προσεγγίσεις και να προσδώσει μια νέα διάσταση στη μελέτη της ενεργειακής ασφάλειας.

2.3. Σκοπός και σημασία διασποράς μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

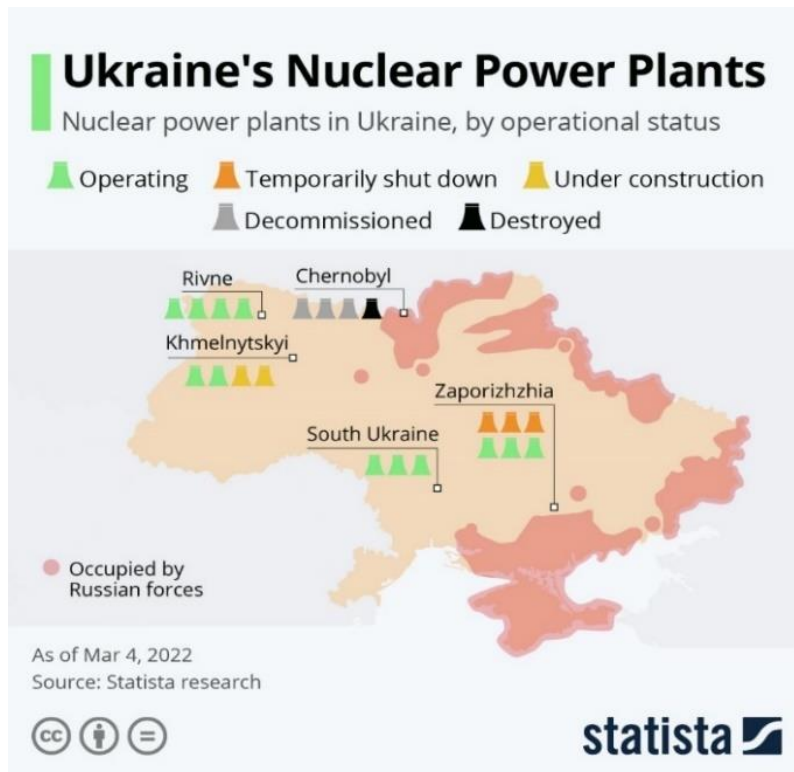
Με την χρήση του όρου «διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής» γίνεται αναφορά στη γεωγραφική κατανομή (διασπορά) των σταθμών παραγωγής ενέργειας σε διάφορες τοποθεσίες μέσα στο προς εξέταση γεωγραφικό πλαίσιο (για παράδειγμα, μια χώρας), αντί της συγκέντρωσής τους σε περιορισμένες περιοχές. Αυτή η προσέγγιση είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της ενεργειακής ανθεκτικότητας και ασφάλειας.

Η διασπορά συμβάλλει, σε αυτό το σημείο, με το να μειώσει την ευπάθεια του ενεργειακού συστήματος, καθώς περιορίζει τις επιπτώσεις από βλάβες, αστοχίες και γενικότερες καταστροφές (περιβαλλοντολογικές, εθνικές-συνοριακές και άλλες) σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Επιπλέον, η ύπαρξη πολλαπλών σημείων παραγωγής μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα του δικτύου, να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο διακοπών, και να διευκολύνει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (για παράδειγμα, αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα), που είναι συχνά χωρικά διάσπαρτες, επιτρέποντας έτσι σε περισσότερες απομονωμένες αγροτικές περιοχές ή περιοχές με ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια όπως επαρχιακοί αυτοκινητόδρομοι, να έχουν ευκολότερη πρόσβαση στο δίκτυο.

Η σημασία της διασποράς ενισχύεται σε περιόδους κρίσεων, καθώς επιτρέπει την αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και μειώνει την εξάρτηση από κεντρικές υποδομές που είναι ευάλωτες σε στοχευμένες επιθέσεις ή φυσικές καταστροφές, ενώ παράλληλα θα πρέπει να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη συγκέντρωση των μονάδων σε περιοχές στρατηγικά ευάλωτες όπως τα σύνορα μεταξύ χωρών. Μερικές περιπτώσεις μη πετυχημένης διασποράς μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, που να αναδεικνύουν την σημαντικότητα της, αποτελούν :

- η περιοχή γύρω από το μεγαλύτερο πυρηνικό εργοστάσιο στην Ευρώπη, Zaporizhzhia στην Ουκρανία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3, η οποία όντας πλέον κοντά στα σύνορα με την Ρωσία έχει γίνει στόχος, ηθελημένων και μη, στρατιωτικών συγκρούσεων. Αυτό το γεγονός, εκτός από την μεγάλη επικινδυνότητα που κρύβει για το μέλλον όλης της Ευρώπης, σε μια ενδεχόμενη καταστροφή του, απειλεί και το ενεργειακό δίκτυο της χώρας που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυρηνική ενέργεια. Σύμφωνα με τον επικεφαλής της IAEA

(International Atomic Energy Agency) Rafael Grossi, «Για περισσότερο από δύο χρόνια τώρα, η πυρηνική ασφάλεια και προστασία στην Ουκρανία βρίσκονται συνεχώς σε κίνδυνο¹.»



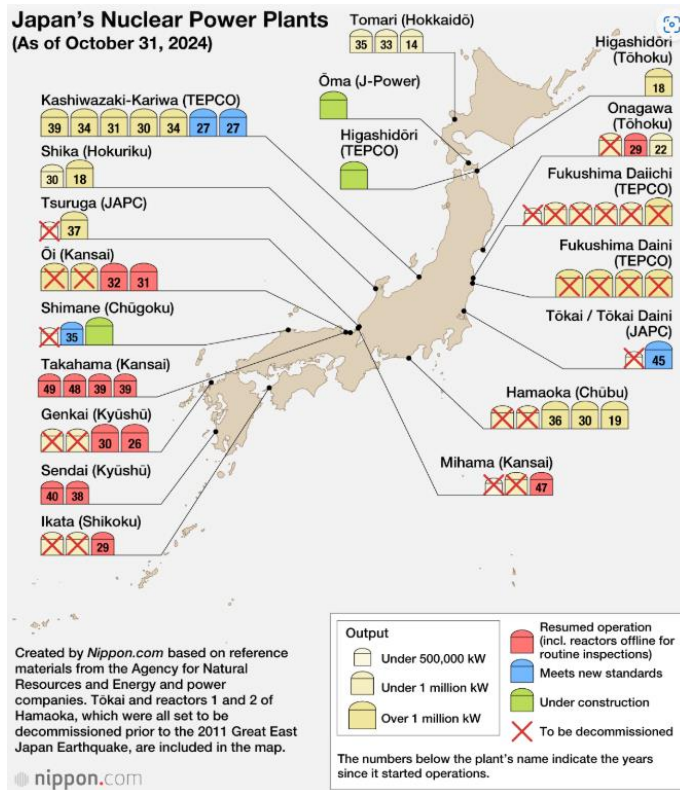
Εικόνα 2.4. Χάρτης Πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής Ουκρανίας [πηγή: [Chart: Ukraine's Nuclear Power Plants / Statista](#)].

- το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα, Ιαπωνία, το 2011 λόγω του σεισμού και του τσουνάμι που ακολούθησε, υπογραμμίζει πώς η συγκέντρωση της παραγωγής ενέργειας σε ευάλωτες περιοχές, όπως οι παράκτιες, καθιστά τις υποδομές εξαιρετικά επικίνδυνες σε περίπτωση φυσικών καταστροφών². Η διασπορά των μονάδων παραγωγής ενέργειας σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, μπορεί να μειώσει σημαντικά τις συνέπειες ενός τέτοιου καταστροφικού γεγονότος, καθώς θα κατανεμηθούν οι κίνδυνοι και επιπλέον δεν θα είναι εξαρτημένες περιοχές ή πόλεις από μία μόνο μονάδα. Όπως παρατηρείται όμως από την Εικόνα 2.5, όλοι οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής της Ιαπωνίας, αν και διασκορπισμένοι σε όλο το γεωγραφικό μήκος και πλάτος τα χώρας βρίσκονται σε παράλιες περιοχές της. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην απαίτηση των σταθμών για μεγάλες ποσότητες

¹ [Ukraine war: UN body urges restraint after Zaporizhzhia nuclear plant hit](#)

² [Σεισμός στην Ιαπωνία: Ασφαλή τα πυρηνικά εργοστάσια αλλά... - Ecotec](#)

νερού ώστε να γίνεται η ψύξη των αντιδραστήρων, ή και στην διαθεσιμότητα χώρου των παράκτιων αυτών περιοχών, για την κατασκευή μεγάλων εγκαταστάσεων, αλλά δεν παύει να καθιστά αυτές τις μονάδες ευάλωτες σε φυσικές καταστροφές όπως αυτή του 2011.



Εικόνα 2.5. Χάρτης Πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής Ιαπωνίας [πηγή: [Japan's Nuclear Power Plants in 2024 | Nippon.com](#)].

Επομένως, η διασπορά αποτελεί βασική παράμετρο στον σχεδιασμό πολιτικών ενεργειακής ασφάλειας, και διαθέτει αρκετές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, τις οποίες αυτή η διπλωματική στοχεύει να αναλύσει, ώστε να διασφαλιστεί μια πιο αξιόπιστη παροχή ενέργειας και βιώσιμη ανάπτυξη αυτών των υποδομών.

2.4. Η διασπορά ως μέτρο ενεργειακής ανθεκτικότητας και ασφάλειας

Στο πλαίσιο της εθνικής ενεργειακής πολιτικής, η διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί μια στρατηγική προσέγγιση για τη διασφάλιση της συνεχούς και αδιάλειπτης παροχής ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από κεντρικά σημεία αποτυχίας. Όπως διαπιστώθηκε και από την προηγούμενη ενότητα τα ενεργειακά συστήματα αντιμετωπίζουν συνεχώς ρίσκο το οποίο μπορεί να πηγάζει και από διάφορους παράγοντες, όπως απότομες διακυμάνσεις στις τιμές της ενέργειας, ακραία καιρικά φαινόμενα, ανισορροπίες στην προσφορά και τη ζήτηση ενέργειας, και γεωπολιτικά ζητήματα [2].

Επομένως χάρη στην διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής είναι εφικτή η ενίσχυση της ενεργειακής ανθεκτικότητας με διάφορους τρόπους. Μειώνεται ο κίνδυνος εκτεταμένων διακοπών παροχής λόγω τοπικών ή περιφερειακών βλαβών. Επιπλέον διαφοροποιώντας και διασκορπίζοντας τις τοποθεσίες παραγωγής ενέργειας, το σύστημα γίνεται λιγότερο ευάλωτο σε ακραία καιρικά τοπικά φαινόμενα, φυσικές καταστροφές ή και πιθανές επιθέσεις. Ένας ακόμα ωφέλιμος παράγοντας είναι η πλέον ευκολία στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες συνήθως έχουν χωρικά διάσπαρτη διαθεσιμότητα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και τη διαφοροποίηση της παραγωγής.

Συνολικά, η διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο για την επίτευξη εθνικής ενεργειακής ανθεκτικότητας, διασφαλίζοντας την ασφάλεια εφοδιασμού, τη μείωση των κινδύνων και την ενίσχυση της αειφορίας των ενεργειακών υποδομών.

2.5. Βιβλιογραφικό Κενό

Παρά την ύπαρξη πληθώρας ερευνών που εξετάζουν τη χωρική διάσταση των ενεργειακών υποδομών, εντοπίζεται ένα σημαντικό κενό στη διεθνή βιβλιογραφία: η γεωγραφική διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής δεν έχει μελετηθεί συστηματικά ως δείκτης εθνικής ενεργειακής ανθεκτικότητας. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται είτε στην περιγραφική ανάλυση τοποθεσιών και τεχνολογιών, είτε στη συσχέτιση με περιβαλλοντικούς ή κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, χωρίς ωστόσο να εντάσσουν τα αποτελέσματα σε ένα συνεκτικό πλαίσιο ενεργειακής ασφάλειας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες έρευνες:

«Παγκόσμια σύνολα τοποθεσιών και ισχύος αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων» [40]: Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται το πρώτο ενοποιημένο παγκόσμιο σύνολο δεδομένων τοποθεσίας και εκτιμώμενης ισχύος αιολικών και φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, αξιοποιώντας δεδομένα OpenStreetMap. Περιλαμβάνει εφαρμογή της συνάρτησης Ripley's K για τη διερεύνηση χωρικής συσσώρευσης ή διασποράς σε διάφορες κλίμακες, προσφέροντας πολύτιμη βάση δεδομένων, χωρίς όμως να συνδέει τη διασπορά με ζητήματα ενεργειακής ανθεκτικότητας.

«Κατανόηση της χωρικής κατανομής των ανανεώσιμων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για την πρόβλεψη μελλοντικών σωρευτικών επιπτώσεων στο περιβάλλον» (Πολωνία) [41]: Εξετάζεται η χωρική κατανομή και η σχέση της εγκατεστημένης ισχύος με τοπικούς κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, μέσω συντελεστών συσχέτισης Spearman, με στόχο να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο διευκόλυνσης σε μελέτες εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ιδικά αν σχετίζονται με την αξιολόγηση του σωρευτικού αντίκτυπου των φωτοβολταϊκών και αιολικών σταθμών. Παρά τη συμβολή της σε επίπεδο περιφερειακής πολιτικής, η μελέτη δεν συνδέει ευθέως τα αποτελέσματα με δείκτες ανθεκτικότητας ή ασφάλειας.

«Χωρική κατανομή λιγνιτικών και ανθρακικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής» (Κίνα) [42]: Αναλύει τους οικονομικούς και θεσμικούς παράγοντες που διαμορφώνουν τη χωρική κατανομή των θερμικών μονάδων παραγωγής. Η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως σε περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις, χωρίς να αξιοποιεί μετρικούς δείκτες ενεργειακής ανθεκτικότητας.

«Επισκόπηση της χωρικής κατανομής μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε παγκόσμιο, εθνικό και περιφερειακό επίπεδο.» [43]: Παρέχει εκτεταμένα δεδομένα εκπομπών μέσω του EDGAR v8.0 και αναπτύσσει proxies υψηλής ανάλυσης για τη χωρική κατανομή εκπομπών και εγκαταστάσεων. Παρότι τα δεδομένα αυτά είναι χρήσιμα για περιβαλλοντική και κλιματική πολιτική, ούτε αυτά εντάσσονται σε πλαίσιο αξιολόγησης ενεργειακής ασφάλειας ή ανθεκτικότητας.

Συνολικά, οι παραπάνω μελέτες αναδεικνύουν τη σημασία της χωρικής διάστασης στον σχεδιασμό και την ανάλυση των ενεργειακών υποδομών, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αξιοποιείται μάλιστα και η ίδια μεθοδολογική προσέγγιση που επιλέγεται ως κεντρικό εργαλείο στην παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή η συνάρτηση K του Ripley. Ωστόσο καμία δεν αναλύει συστηματικά τη διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ως αυτόνομο δείκτη εθνικής ενεργειακής ανθεκτικότητας. Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό, προτείνοντας μεθοδολογίες μέτρησης και αξιολόγησης που συνδέουν άμεσα τη γεωγραφική κατανομή με τη σταθερότητα και την ασφάλεια των εθνικών ενεργειακών συστημάτων.

3. Μέτρηση διασποράς στο χώρο και κριτική αξιολόγηση των δεικτών

Η μελέτη της χωρικής διασποράς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την κατανόηση της ανθεκτικότητας και της ασφάλειας ενός ενεργειακού συστήματος. Η χωρική κατανομή δεν επηρεάζει μόνο την αποδοτικότητα της παραγωγής, αλλά και την ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται σε ακραία γεγονότα, διαταραχές ή μεταβαλλόμενες συνθήκες ζήτησης. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάλυση της διασποράς μέσω δεικτών χωρικής στατιστικής καθίσταται απαραίτητη, καθώς παρέχει ποσοτικά εργαλεία για την αποτύπωση και ερμηνεία των χωρικών προτύπων.

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται για την κάλυψη του υφιστάμενου βιβλιογραφικού κενού, παρουσιάζοντας μια σειρά από δείκτες που αξιοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία για την εκτίμηση της διασποράς. Η επιλογή των δεικτών δεν είναι τυχαία, αλλά βασίζεται στην ικανότητά τους να αποτυπώνουν διαφορετικές πτυχές της χωρικής δομής: από την απλή γεωμετρική αποτύπωση έως την πολλών κλιμάκων ανάλυση. Παράλληλα, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε ζητήματα μεθοδολογικών προκλήσεων, με σκοπό να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, όπως *confidence envelopes* (διαστήματα εμπιστοσύνης), *edge effects* (οριακά φαινόμενα) και διάφορες τεχνικές διόρθωσης που απαιτούνται.

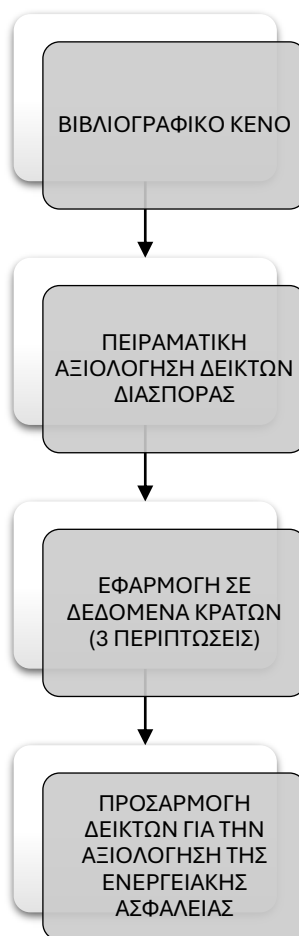
Μέσα από μια εξελικτική παρουσίαση που ξεκινά από βασικούς δείκτες, όπως το Convex Hull και τον Δείκτη Εγγύτερου Γείτονα, και προχωρά σε πιο σύνθετες μεθόδους, όπως η συνάρτηση K του Ripley και οι δείκτες χωρικής αυτοσυσχέτισης Moran's I και Geary's C, το κεφάλαιο επιχειρεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα των διαθέσιμων εργαλείων. Η ανάλυση πλαισιώνεται από θεωρητικές επεξηγήσεις, αναλυτικά παραδείγματα και εικόνες που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης αλλά και ποικιλία αναφορών στη διεθνή βιβλιογραφία, με στόχο να καταστεί προσβάσιμη τόσο σε ερευνητές του χώρου της ενέργειας όσο και σε επιστήμονες που ενδιαφέρονται γενικότερα για την ανάλυση σημειακών δεδομένων.

3.1. Μεθοδολογική προσέγγιση

Για την κάλυψη του βιβλιογραφικού κενού, η μεθοδολογία εστιάζει στη χρήση δεικτών χωρικής ανάλυσης, προκειμένου να αποτιμηθεί ποσοτικά η διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Οι αλγόριθμοι - δείκτες που παρουσιάζονται (Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα, Ripley's K-function, Moran's I και Geary's C) έχουν επιλεγεί καθώς παρέχουν πληροφορίες για τη χωρική δομή: την τυχαιότητα, τη συσσώρευση ή την ομοιόμορφη κατανομή των σημείων. Η ανάλυση υλοποιείται σε περιβάλλον MATLAB, επιτρέποντας την ανάπτυξη προσαρμοσμένων αλγορίθμων και την εφαρμογή τεχνικών διόρθωσης για γεωγραφικά σύνθετες περιοχές.

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε πραγματικά γεωχωρικά δεδομένα δύο χωρών με διαφορετικά χαρακτηριστικά: την Ελλάδα, με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και γεωγραφική πολυπλοκότητα λόγω των νησιών, την Ελβετία, με αισθητά πιο απλά σύνορα, έντονη αξιοποίηση υδροηλεκτρικών και παρουσία πυρηνικών μονάδων, και τέλος την Γαλλία, εστιάζοντας μόνο στις πυρηνικές μονάδες της, μιας και η Ελλάδα δεν διαθέτει. Η επιλογή αυτών των περιπτώσεων μελέτης επιτρέπει τη διερεύνηση της προσαρμοστικότητας των δεικτών σε διαφορετικά εθνικά πλαίσια.

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας μελέτης αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 3.1. Στάδια της ερευνητικής μεθοδολογίας, το οποίο παρουσιάζει τη λογική ακολουθία των επιμέρους βημάτων. Συνολικά, η διπλωματική δεν περιορίζεται σε περιγραφική χαρτογράφηση, αλλά επιχειρεί να αναδείξει τη διασπορά ως δείκτη ενεργειακής ανθεκτικότητας και ασφάλειας, καθώς και να προτείνει μια κατευθυντήρια οδό, πάνω στην οποία μπορούν να βασιστούν μελλοντικές αναλύσεις και συγκριτικές αξιολογήσεις ενεργειακών συστημάτων.



Διάγραμμα 3.1. Στάδια της ερευνητικής μεθοδολογίας.

3.2. Η έννοια της διασποράς

Για τον ορισμό της στατιστικής διασποράς, θα πρέπει να οριστεί μια συνεχής τυχαία μεταβλητή (τ.μ.) T με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) $f(t)$ και πεπερασμένες τις δύο πρώτες ροπές, ο μέσος όρος (πρώτη ροπή) και η αναμενόμενη τιμή του T^2 (δεύτερη ροπή) να είναι επίσης πεπερασμένη. Με βάση αυτό, θα οριστεί η διασπορά ως ένα μέτρο της «μεταβλητότητας» ή του «εύρους» της κατανομής της τ.μ. T . Αυτό το μέτρο θα έχει τις ίδιες φυσικές μονάδες με το T [1].

Με τον όρο «μέτρα διασποράς», γίνεται αναφορά στα μέτρα που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο «κατά πόσο οι τιμές μιας σειράς ή μιας κατανομής διασπείρονται δεξιά και αριστερά από ένα κεντρικό μέτρο τους» δηλαδή από τη διάμεσο M ή από τον αριθμητικό μέσο ομαδοποιημένου πληθυσμού \bar{X} [3]. Τέτοια μέτρα υπάρχουν αρκετά, όπως το εύρος μεταβολής (E), η μέση απόκλιση, η σχετική τυπική απόκλιση (ή συντελεστής μεταβλητότητας) (CV), η τεταρτημοριακή απόκλιση (Q) και το πιο ευρέως συνηθισμένο, η τυπική απόκλιση (σ), η οποία ορίζεται ως

$$\sigma = \sqrt{E([T - E(T)]^2)} \quad (1)$$

Η διασπορά αναφορικά με ένα γεωμετρικό χώρο έχει παραπλήσια ερμηνεία, που ουσιαστικά αναφέρεται ξανά στην κατανομή ενός συνόλου σημείων εντός του συγκεκριμένου χώρου, προσδιορίζοντας την κατανομή τους ως προς ένα κεντρικό σημείο αναφοράς ή μια γενική δομή. Μπορεί να περιγραφεί μέσω διαφορετικών μαθηματικών εργαλείων, ανάλογα με το πλαίσιο εφαρμογής.

3.3. Μέθοδοι και δείκτες μέτρησης διασποράς στο χώρο

Στο παρόν κεφάλαιο επιλέγεται να παρουσιαστεί μια σειρά από μεθοδολογίες που προσεγγίζουν το ζήτημα της μέτρησης της γεωγραφικής διασποράς, από διαφορετικές οπτικές γωνίες, ακολουθώντας μια εξελικτική πορεία από τους πιο απλούς και περιγραφικούς δείκτες προς πιο σύνθετους και εξειδικευμένους, οι οποίοι να μπορούν να αποτυπώσουν με ποσοτικό τρόπο τη χωρική τους κατανομή. Η διάρθρωση αυτή δεν είναι τυχαία, ξεκινά από θεμελιώδεις γεωμετρικές προσεγγίσεις και οδηγείται σταδιακά σε πιο προηγμένα στατιστικά εργαλεία.

Αρχικά, εξετάζεται ο δείκτης Convex Hull, ο οποίος προσφέρει μια βασική εικόνα της έκτασης που καταλαμβάνουν οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής στο χώρο. Αν και πρόκειται για έναν ιδιαίτερα απλό δείκτη, η σημασία του έγκειται στο ότι παρέχει μια πρώτη περιγραφική αποτύπωση των γεωγραφικών ορίων του συστήματος, επιτρέποντας την κατανόηση της χωρικής κλίμακας και την εκτίμηση της μέγιστης δυνατής «εξάπλωσης» των μονάδων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα (Nearest Neighbor Index, R), ο οποίος εστιάζει στην κατανομή αποστάσεων μεταξύ των σημείων. Με απλό αλλά ισχυρό τρόπο δείχνει αν οι μονάδες είναι συγκεντρωμένες, τυχαία διασκορπισμένες ή ομοιόμορφα κατανεμημένες. Η μετάβαση από το Convex Hull στον δείκτη R σηματοδοτεί τη στροφή από μια καθαρά γεωμετρική αποτίμηση σε μια πιο στατιστική ανάλυση, που εισάγει πλέον στοιχεία τυχαιότητας και κανονικότητας.

Ακολούθως, εξετάζεται σε βάθος η συνάρτηση K του Ripley, η οποία εισάγει την πολυκλιμακική διάσταση στη μελέτη της διασποράς, και αποτελεί τον κύριο δείκτη που αξιοποιείται στην παρούσα εργασία. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους δείκτες που αποδίδουν μια συνολική, ενιαία εικόνα, η συνάρτηση K επιτρέπει την ανάλυση των χωρικών προτύπων σε διαφορετικές ακτίνες απόστασης, αποκαλύπτοντας έτσι περιοχές όπου οι μονάδες εμφανίζουν συσσωρευτικά ή αποσυγκεντρωτικά χαρακτηριστικά. Πρόκειται για έναν πιο πολύπλοκο δείκτη, ο οποίος ωστόσο προσφέρει σημαντικά βαθύτερη κατανόηση της χωρικής δομής, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να τον προσαρμόσει στις ανάγκες του ανάλογα με την κλίμακα που επιθυμεί να εξετάσει.

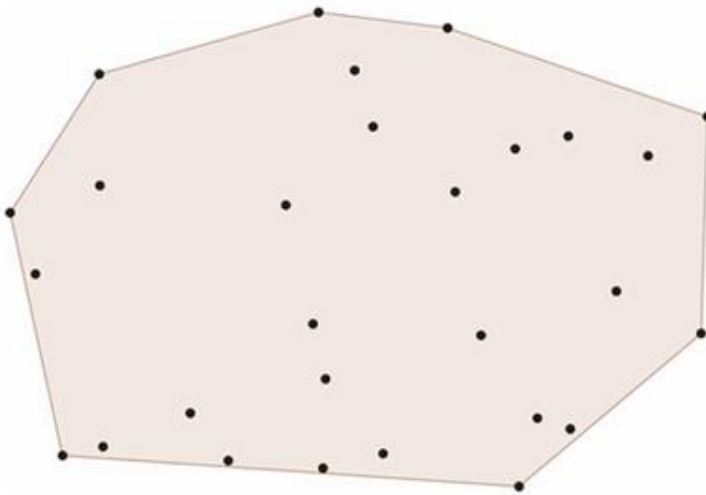
Η παρουσίαση του δείκτη συνοδεύεται από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα, με αναφορές σε θεμελιώδεις μελέτες αλλά και σύγχρονες εφαρμογές, γεγονός που επιτρέπει την κατανόηση τόσο της θεωρητικής βάσης όσο και της πρακτικής χρησιμότητάς του. Παράλληλα, η εργασία αναλύει λεπτομερώς τα βήματα υπολογισμού, τα πιθανά προβλήματα (όπως τα οριακά φαινόμενα) και τις μεθόδους διόρθωσής τους, παρέχοντας στον αναγνώστη παραδείγματα και επεξηγήσεις που καθιστούν τον δείκτη κατανοητό ακόμη και σε μη ειδικούς. Έτσι, πέρα από τη συμβολή του στη μελέτη της ενεργειακής ασφάλειας, το συγκεκριμένο κεφάλαιο μπορεί να αποτελέσει αυτοτελές εγχειρίδιο για κάθε ερευνητή ή επαγγελματία που επιθυμεί να εφαρμόσει τον έλεγχο διασποράς σε σύνολα σημείων, ανεξάρτητα από το πεδίο ενδιαφέροντος του. Με αυτόν τον τρόπο, η διπλωματική εργασία δεν περιορίζεται στη σύνδεση της διασποράς με την ενεργειακή ανθεκτικότητα, αλλά αναδεικνύει τον δείκτη Ripley ως ένα γενικό εργαλείο ανάλυσης σημειακών δεδομένων, προτείνοντάς τον ως μια εξαιρετική επιλογή όταν απαιτείται σε βάθος εξέταση της χωρικής κατανομής.

Τέλος, παρουσιάζονται οι δείκτες Moran's I και Geary's C, οι οποίοι προέρχονται από την οικογένεια των μέτρων χωρικής αυτοσυσχέτισης. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους δείκτες που εστιάζουν σε αποστάσεις και γεωμετρικές κατανομές, οι εν λόγω δείκτες αναλύουν το βαθμό στον οποίο οι τιμές που αποδίδονται σε κάθε σημείο (π.χ. ισχύς, χωρητικότητα) σχετίζονται χωρικά με τις τιμές των γειτονικών σημείων. Πρόκειται δηλαδή για δείκτες που αποτυπώνουν περισσότερο τη σχέση «ομοιότητας» μεταξύ ομάδων σημείων, παρά απλώς να βασίζονται στις αποστάσεις τους.

Η ακολουθία αυτή – από το Convex Hull έως τους δείκτες αυτοσυσχέτισης – αποσκοπεί στο να δείξει την ποικιλία εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της διασποράς σημείων στον χώρο, ενώ ταυτόχρονα να αιτιολογήσει γιατί η επιλογή των τελικών δεικτών της εργασίας βασίζεται στην ικανότητά τους να παράγουν μετρήσιμα και συγκρίσιμα αποτελέσματα που συνδέονται άμεσα με την έννοια της ενεργειακής ασφάλειας.

3.3.1. Convex Hull

Το convex hull (κυρτό περίβλημα) ενός συνόλου σημείων σε έναν Ευκλείδειο χώρο είναι το μικρότερο κυρτό σύνολο που περιέχει όλα τα σημεία. Έστω ένα σύνολο σημείων $A \subseteq \mathbb{R}^n$, όπου n η διάσταση του χώρου. Το κυρτό περίβλημα του A , συμβολιζόμενο ως $conv(A)$, είναι το μικρότερο κυρτό σύνολο που περιέχει όλα τα σημεία του A . Ένα σύνολο είναι κυρτό αν για κάθε δύο σημεία του, το ευθύγραμμο τμήμα που τα συνδέει βρίσκεται επίσης μέσα στο σύνολο. Ένας επίσημος ορισμός είναι: το κυρτό περίβλημα (convex hull) ενός υποσυνόλου A ενός αφινικού χώρου X , $A \subseteq X$, είναι η τομή όλων των κυρτών συνόλων που περιέχουν το A όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1[8] (για διευκρινιστικούς σκοπούς, ο αφινικός χώρος θεωρείται παρόμοιος με τον γνωστό ευκλείδειο, μόνο που σε αυτή την περίπτωση παραμένουν αποκλειστικά τα σημεία, οι ευθείες και τα ευθύγραμμα τμήματα, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι αποστάσεις και οι γωνίες, όπως θα ήταν αν γινόταν αναφορά σε ευκλείδειο χώρο).

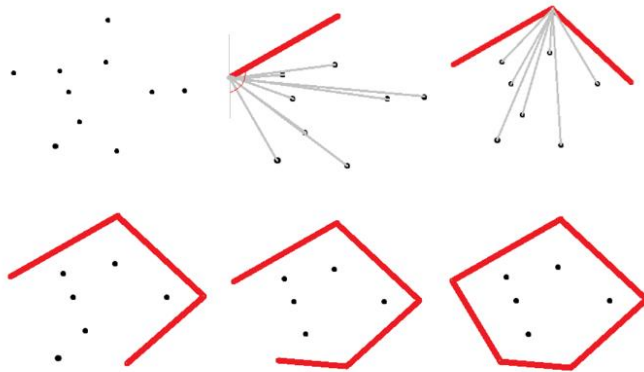


Εικόνα 3.1. Το κυρτό περίβλημα (Convex Hull) ενός συνόλου σημείων στο επίπεδο [8].

Επομένως, με τη χρήση του Convex Hull για το σύνολο των σημείων, γίνεται εφικτή η ευρύτερη ιδέα της έκτασης των σημείων πάνω στο χώρο. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η περιοχή, τόσο μεγαλύτερη αναμένεται και η διασπορά των εν λόγω σημείων.

Υπάρχουν πολλές επιλογές αλγορίθμων, δισδιάστατων ή τρισδιάστατων, ανάλογα με διαστάσεις του χώρου στις οποίες εφαρμόζονται. Γνωστοί δισδιάστατοι αλγόριθμοι είναι οι Gift Wrapping (Jarvis's March Algorithm), Graham Scan, Divide and Conquer, QuickHull, TORCH, Kirkpatrick–Sediel και Chan's algorithms, ενώ τρισδιάστατοι είναι οι NAW, randomized insertion, καθώς και εκδόσεις που να εκτελούν παράλληλες επεξεργασίες, όπως οι CudaHull και CudaChain [17].

Για το δισδιάστατο επίπεδο, στο οποίο εστιάζει η παρούσα διπλωματική, ένας από τους πιο γνωστούς είναι ο αλγόριθμος Jarvis's March [27], γνωστός και ως Gift Wrapping algorithm. Στόχος του είναι να βρει το μικρότερο κυρτό περίβλημα H , που θα περικλείει όλα τα n σημεία $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$. Ο αλγόριθμος ξεκινάει από το πιο αριστερό σημείο (το οποίο θεωρεί ως αρχικό σημείο του περιβλήματος H), και σταδιακά εξετάζει και μεταβαίνει και στο επόμενο σημείο του περιβλήματος, με το κριτήριο της μεγαλύτερης αριστερόστροφης γωνίας (δηλαδή αντίθετα από την φορά των δεικτών του ρολογιού) από το σημείο που βρίσκεται εκείνη την στιγμή, όπως φαίνεται και Εικόνα 3.2. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος δεν επηρεάζεται αν δεν επιλεγθεί το πιο αριστερό σημείο ως αρχικό, αρκεί να είναι ακραίο σημείο (προς τα πάνω, κάτω ή δεξιά), και τα επόμενα βήματα θα είναι αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνολικά h φορές, όσες και τα σημεία που ανήκουν στο κυρτό περίβλημα. Όταν φτάσει στο αρχικό/τελικό σημείο τότε ολοκληρώνεται η διαδικασία [17].



Εικόνα 3.2. Βήματα αλγορίθμου Jarvis's March

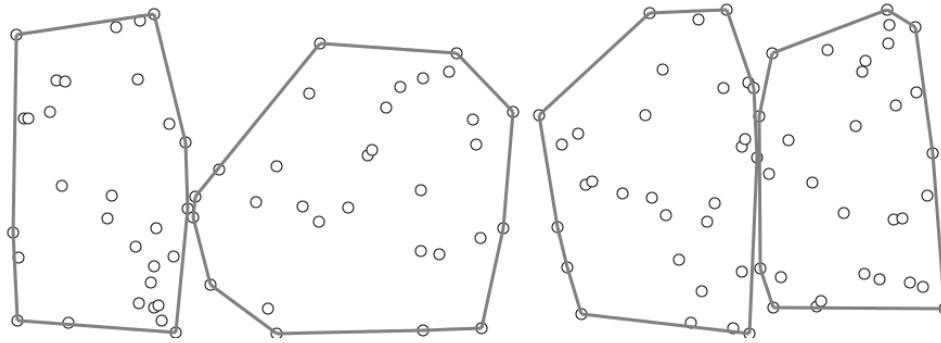
Συνολικά θεωρείται ένας πολύ απλός και αποτελεσματικός αλγόριθμος όσο έχει να κάνει με μικρά πακέτα δεδομένων ή όταν τα σημεία που αποτελούν το κυρτό περίβλημα είναι λίγα. Ωστόσο μειωμένη απόδοση παρουσιάζει όταν είναι πολύ περισσότερα τα δεδομένα, γεγονός που οφείλεται στην γραμμική πολυπλοκότητα του, καθώς ο χρόνος εκτέλεσης του εξαρτάται σχεδόν γραμμικά, από το πλήθος των σημείων n και το πλήθος των σημείων του κυρτού περιβλήματος h . Ο όρος «σχεδόν» τοποθετείται γιατί ενώ η πολυπλοκότητα του είναι $O(nh)$, αν τα σημεία h , που ανήκουν στο

περίβλημα, είναι σχεδόν ίσα με το συνολικό πλήθος σημείων n , τότε η τιμή της πολυπλοκότητας μπορεί να πλησιάσει το $O(n^2)$.

Αυτό το πρόβλημα έρχεται να βελτιώσει ο αλγόριθμος Graham Scan, ο οποίος χρησιμοποιεί μια γεωμετρική μέθοδο, με όνομα αύξουσα κατασκευή (incremental construction)¹⁷, κατά την οποία το γεωμετρικό σχήμα (το κυρτό περίβλημα στην συγκεκριμένη περίπτωση) δημιουργείται βήμα – βήμα. Σε αυτό τον αλγόριθμο το αρχικό σημείο θεωρείται αυτό με την ελάχιστη τιμή στον άξονα y , κάθε άλλο σημείο ταξινομείται με βάση τη γωνία του από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο. Ο χρόνος εκτέλεσης αυτού του βήματος είναι $O(n \log(n))$. Με το που ολοκληρωθεί η ταξινόμηση όλων των σημείων σε μια στοίβα (stack), επεξεργάζονται διαδοχικά τα ταξινομημένα σημεία. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η διασφάλιση ότι οι στροφές που γίνονται μεταξύ των διαδοχικών σημείων είναι πάντα αριστερής φοράς, ώστε να διατηρείται το κυρτό περίβλημα. Εάν ανιχνευθεί κάποια δεξιά στροφή, τότε ο αλγόριθμος αφαιρεί το σημείο που μόλις έχει προηγηθεί από τη στοίβα, εξασφαλίζοντας έτσι ότι παραμένουν μόνο οι αριστερές στροφές. Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία της στοίβας, τα σημεία που θα έχουν απομείνει σε αυτήν θα είναι και τα σημεία h του κυρτού περιβλήματος [17].

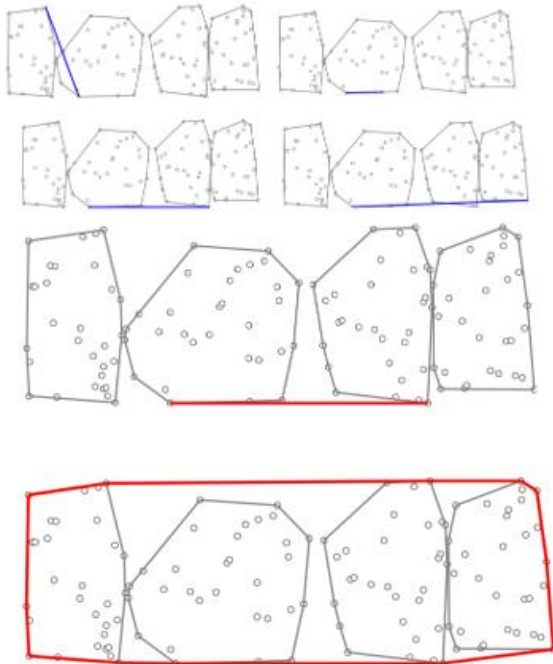
Η πολυπλοκότητα αυτού του αλγορίθμου $O(n \log(n))$ είναι χαμηλή, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου το n είναι μεγάλο. Ο αλγόριθμος εκτελείται με ακόμα μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην περίπτωση που πολλά σημεία ανήκουν στο περίβλημα (σε αντίθεση με τον Jarvis's March), καθώς αυτή η τιμή (h), δεν επηρεάζει καθόλου το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Πιο πρόσφατα, το 2016, ο Chan ανέπτυξε τον Chan's algorithm, ο οποίος συνδυάζει τους δυο προηγούμενους (Graham Scan και Jarvis's March), με στόχο την επίτευξη μιας ακόμα πιο αποδοτικής χρονικής πολυπλοκότητας: $O(n \log h)$. Πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι να χωρίσει τα n σημεία του χώρου σε $\frac{n}{h}$ υποσύνολα σημείων, όπου το κάθε ένα θα περιέχει συνολικά h σημεία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3. Να σημειωθεί ότι καθώς το h είναι αρχικά άγνωστος αριθμός, γίνεται για αυτόν μια πρόβλεψη τιμής h^* [18]. Αν αυτή η τιμή είναι πολύ μεγάλη θα προκύψει $O(n \log n)$, ενώ αν είναι πολύ μικρή δε θα γίνει εφικτή η κάλυψη όλου του περιβλήματος. Για αυτό το λόγο, ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ότι $h \leq h^* \leq 2h$, με μια μέθοδο επανειλημμένης αύξησης της εικασίας, που ξεκινάει με μια μικρή σχετικά πρόβλεψη και διπλασιάζει την τιμή του h^* , αν με το πέρας του αλγορίθμου η αρχική εικασία είναι άστοχη. Έπειτα, υπολογίζεται το κυρτό περίβλημα για κάθε υποσύνολο με χρήση του Graham Scan, οπότε η πολυπλοκότητα αυτού του βήματος είναι $O(h \log h)$, και αν αυτό γίνει για όλα τα υποσύνολα, προκύπτει $O(n \log h)$.



Εικόνα 3.3. Μικρο-περιβλήματα με χρήση Graham Scan. [Πηγή: Ji, Shiyu. A 2D demo for Chan's algorithm, 2016]

Στη συνέχεια πρέπει τα μικρο-περιβλήματα (mini-hulls) να συγχωνευτούν σε ένα συνολικό κυρτό περίβλημα με τη χρήση του αλγορίθμου, Jarvis's March, που μπορεί να "διατρέξει" όλα τα mini-hulls και να βρει τα πιο εξωτερικά σημεία τους με τοπικές συγκρίσεις όπως δείχνει και η Εικόνα 3.4. Σε αυτό το σημείο, υπολογίζεται ο κοινός εφαπτόμενος (common tangent) με χρήση δυαδικής αναζήτησης σε χρόνο $O(\log h)$. Η δυαδική αναζήτηση προτιμάται καθώς αν γινόταν χρήση εξαντλητικής αναζήτησης (να εξεταστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί) θα οδηγούσε σε υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν $\frac{n}{h}$ μικρο-περιβλήματα, άρα ο συνολικός χρόνος για το ολικό βήμα συγχώνευσης θα είναι $O(n \log h)$. Έτσι, αυτή είναι και η συνολική χρονική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου του Chan's [17].



Εικόνα 3.4. Σταδιακή κατασκευή κυρτού περιβλήματος Jarvis's March και τελικό αποτέλεσμα [Πηγή: Ji, Shiyu. A 2D demo for Chan's algorithm, 2016]

3.3.2. Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα - Nearest Neighbor Index (R)

Ένας δείκτης εύκολος στον υπολογισμό και στην ερμηνεία του που αναλύει αν τα σημεία στο χώρο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα ή τυχαία διασκορπισμένα είναι ο δείκτης του εγγύτερου γείτονα R . Υπολογίζεται ως το κλάσμα της μέσης απόστασης \bar{r}_o από κάθε σημείο στον πλησιέστερο γείτονά του σύμφωνα με τα δεδομένα, προς την αναμενόμενη μέση απόσταση \bar{r}_e αν τα σημεία κατανέμονταν τελείως τυχαία [19].

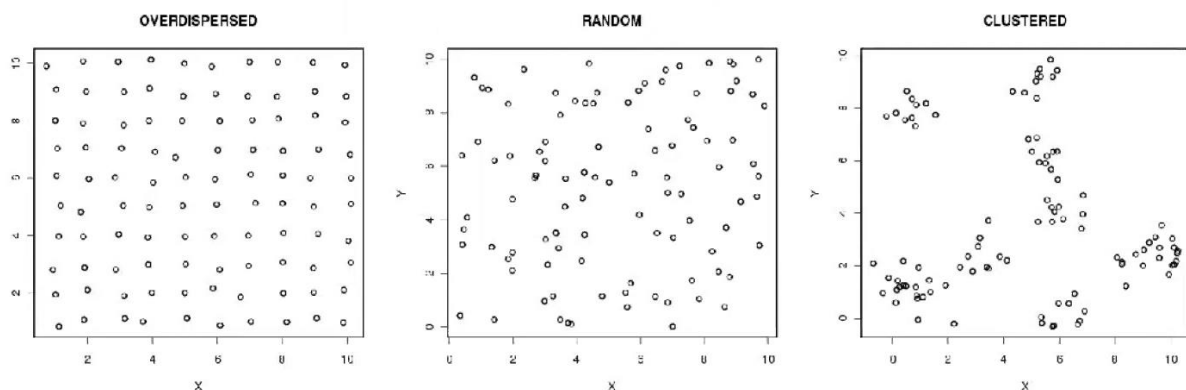
$$R = \frac{\bar{r}_o}{\bar{r}_e} \quad (2)$$

Σε τυχαία κατανομή η μέση απόσταση των σημείων μεταξύ τους υπολογίζεται ως:

$$\bar{r}_e = \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \quad (3)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα που έχουν τα σημεία στον χώρο, άρα ο συνολικός αριθμός τους προς την έκταση της περιοχής που εξετάζεται.

Ανάλογα με το αποτέλεσμα που δίνει ο υπολογισμός του R , αξιολογείται και η κατανομή των σημείων. Αν η τιμή είναι μικρότερη από την μονάδα, και πλησιάζει το 0, τότε τα σημεία σχηματίζουν συστάδες και υπάρχει μια συγκεντρωμένη κατανομή, αφού οι πραγματικές μέσες αποστάσεις μεταξύ τους πρακτικά εκμηδενίζονται. Σε περίπτωση που ισούται με ένα, ή είναι πολύ κοντά σε αυτό, τα σημεία δεν παρουσιάζουν κάποια σαφή δομή, άρα η κατανομή θεωρείται τυχαία. Εναλλακτικά, αν η τιμή είναι μεγαλύτερη της μονάδας, παρουσιάζεται μια ομοιόμορφη κατανομή όπου τα σημεία είναι τακτοποιημένα σε «ίσες» αποστάσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.5. Για την καλύτερη αξιολόγηση του δείκτη, προτείνεται συγκριτικός έλεγχος μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων, ώστε να εξασφαλιστεί ένα ελάχιστο και μέγιστο κατώφλι γύρω από την μονάδα. [32]



Εικόνα 3.5. Τρεις περιπτώσεις διασποράς σημείων [Πηγή: Boston University EE509 "Applied Environmental Statistics" Διαθέσιμο στο https://people.bu.edu/dietze/Bayes2018/Lesson33_Space.pdf].

3.3.3. Η συνάρτηση K του Ripley

Η συνάρτηση K του Ripley, παρουσιάστηκε αρχικά το 1976, ως εργαλείο για την ανάλυση της χωρικής κατανομής σημείων, και περιγράφει τα χαρακτηριστικά των διεργασιών σημείων σε πολλές κλίμακες αποστάσεων, επιτρέποντας τον εντοπισμό προτύπων όπως η συσσώρευση ή η ομοιόμορφη κατανομή [15], αλλά την παρουσίασε αναλυτικότερα σε επόμενες δημοσιεύσεις του [16]. Όπως και οι παραπάνω μέθοδοι έχει ως στόχο την αξιολόγηση αν τα σημεία σε έναν δισδιάστατο χώρο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα, συγκεντρωμένα - συσσωρευμένα ή τυχαία κατανεμημένα. Υπολογίζεται:

$$K(t_s) = \lambda^{-1}E \quad (4)$$

Όπου t_s η ακτίνα του κύκλου υπό εξέταση με s την τάξη των ακτινών από την μικρότερη στην μεγαλύτερη. Συμβολίζεται ως λ η πυκνότητα των σημείων στο χώρο, δηλαδή ο αριθμός των σημείων ανά μονάδα επιφάνειας που παρουσιάζεται και ως N/A , με N να είναι ο παρατηρούμενος αριθμός σημείων και A η επιφάνεια της περιοχής μελέτης. Τέλος, E είναι ο αναμενόμενος αριθμός σημείων μέσα στον κύκλο δεδομένης ακτίνας t_s για την απόλυτη τυχαία χωρική κατανομή [14].

Όταν γίνεται ο υπολογισμός $K(t_s)$, που ουσιαστικά είναι η έκταση του κύκλου με ακτίνα t_s , γίνεται η μέτρηση του αριθμού των σημείων που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από t από κάθε σημείο. Επομένως ο δείκτης K ορίζεται ως [24], [25]:

$$\hat{K}(t_s) = \frac{A}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N I(d_{ij} \leq t_s) \quad (5)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της περιοχής μελέτης, N το πλήθος των σημείων, d_{ij} είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του i -ου και του j -ου σημείου, και $I(x)$ είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση (indicator function), η οποία παίρνει τις τιμές [14]:

$$I(d_{ij} \leq t_s) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d_{ij} \leq t_s \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6)$$

Η διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός κύκλου ακτίνας t_s με κέντρο κάθε σημείο i , την καταμέτρηση των άλλων σημείων j που βρίσκονται εντός του κύκλου και την επανάληψη της διαδικασίας για όλα τα σημεία ως κέντρο. Στη συνέχεια η ακτίνα αυξάνεται και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται για νέες τιμές του t_s , ώστε να αναλυθεί η χωρική δομή σε πολλαπλές κλίμακες. Παρόλο που η Εξίσωση 5, μπορεί ουσιαστικά να εκτιμηθεί για οποιαδήποτε τιμή του t_s , είναι σύνηθες να εξετάζονται μόνο τιμές t_s μικρότερες από το ένα τέταρτο του μικρότερου διαστατικού μήκους της περιοχής μελέτης, αν αυτή είναι περίπου ορθογώνια. Εναλλακτικά, αν η περιοχή έχει γενικό σχήμα, χρησιμοποιείται το όριο:

$$t_s \leq \sqrt{A/2} \quad (7)$$

όπου A είναι η συνολική επιφάνεια της περιοχής μελέτης [14]. Ο Levine το 2002, [26] πρότεινε όταν η αύξηση της ακτίνας πραγματοποιείται με ένα μικρό βήμα Δt , για κάθε επανάληψη, ο τρόπος υπολογισμού του να είναι:

$$\Delta t = \frac{R}{100} \quad (8)$$

όπου R είναι η ακτίνα του κύκλου του οποίου η έκταση είναι ίση με την έκταση – εμβαδόν A της περιοχής μελέτης, επομένως υπολογίζεται ως:

$$t_s \leq R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (9)$$

Άρα αν από την Εξίσωση 9 κρατηθεί η ισότητα, προκύπτει ένα ζευγάρι τιμών t_s και Δt το οποίο είναι εξαρτώμενο μόνο από την μεταβλητή A η οποία οδηγεί τα συνολικά βήματα επανάληψης σε ένα σταθερό αριθμό καθώς επαλείφεται:

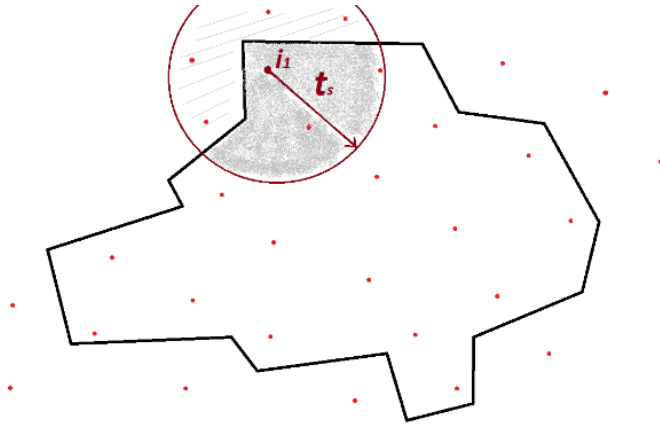
$$num_t = \left\lfloor \frac{t_s}{\Delta t} \right\rfloor = \left\lfloor 100 \cdot \frac{\sqrt{A/2}}{\sqrt{A/\pi}} \right\rfloor = \left\lfloor 100 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \right\rfloor = [125,33] = 125 \quad (10)$$

Συνεπώς, βάσει των ανωτέρω σχέσεων, ο αριθμός των επαναλήψεων παραμένει σταθερός στις 125, ανεξαρτήτως της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης ή του επιλεγμένου βήματος αύξησης της ακτίνας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν είναι δεσμευτική. Σε άλλη έρευνα [27] έχει χρησιμοποιηθεί ως μέγιστη τιμή της ακτίνας r το ήμισυ της μικρότερης πλευράς του ελάχιστου ορθογωνίου περιβλήματος της περιοχής μελέτης. Σε κάθε περίπτωση παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει διαφορετικό πλήθος αποστάσεων προς ανάλυση, εστιάζοντας σε επιμέρους μικρότερες ή μεγαλύτερες, και έπειτα να ορίσει ο ίδιος το βήμα που θα χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης και την λεπτομέρεια που επιθυμεί.

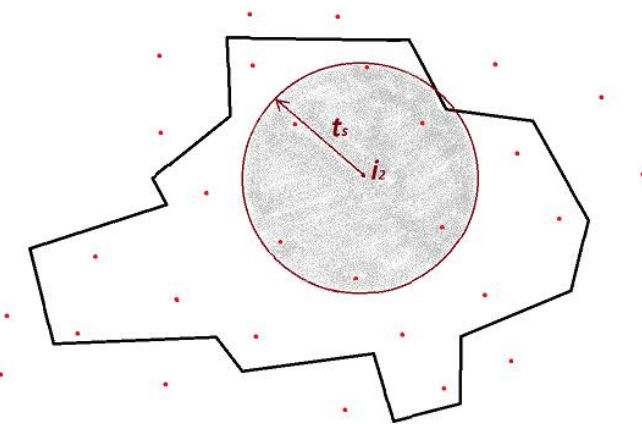
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, έχουν εξεταστεί και οι δύο προσεγγίσεις, με στόχο την αξιολόγηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε διαφορετικές παραμετροποιήσεις.

Προκειμένου να κατανοηθεί πληρέστερα και η επίδραση των ορίων, ας θεωρηθεί το σενάριο όπου υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή σε όλο τον χώρο και η περιοχή μελέτης είναι ένα τυχαίο πολύγωνο. Αν ένα σημείο βρίσκεται κοντά στο όριο της περιοχής όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6, ο κύκλος που σχηματίζεται με κέντρο αυτό και με ακτίνα t_s κόβεται από τα όρια της περιοχής μελέτης (μαύρο πολύγωνο) με αποτέλεσμα κάποιοι από τους πραγματικούς γείτονες του να μην καταγράφονται,

επειδή βρίσκονται εκτός, άρα δεν υπολογίζονται, ακόμα κι αν απέχουν απόσταση μικρότερη του t_s . Επομένως αυτό το σημείο φαίνεται να έχει μόνο 2 γειτονικά σημεία, σε αντίθεση με ένα κεντρικό σημείο που για την ίδια ακτίνα t_s έχει 6 γείτονες, όπως στην Εικόνα 3.7. Τα οριακά φαινόμενα (edge effects), όπως ονομάζονται, οδηγούν σε συστηματική μείωση (υποεκτίμηση) της $K(t_s)$, η οποία γίνεται ακόμα πιο έντονη όσο μεγαλώνουν οι τιμές που παίρνει η t_s .



Εικόνα 3.6. Ακριανό σημείο i_1 με κύκλο ακτίνας t_s .



Εικόνα 3.7. Κεντρικό σημείο i_2 με ακτίνα κύκλου t_s .

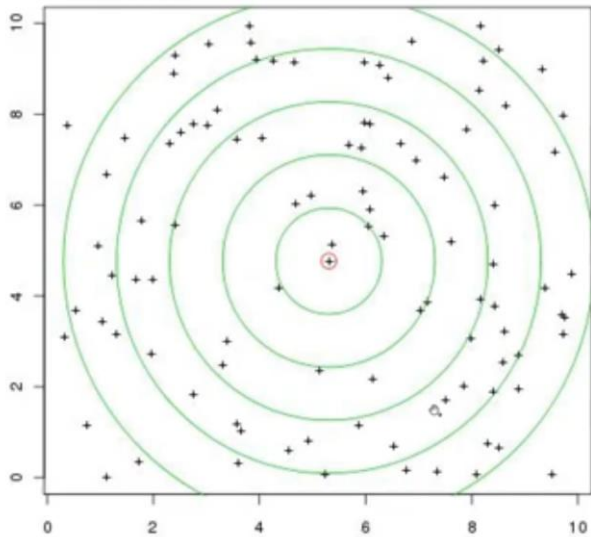
Με το πέρασμα των χρόνων έχουν γίνει διάφορες προτάσεις με στόχο τη διόρθωση των οριακών αυτών φαινομένων με μεθόδους που είτε χρησιμοποιούν στην ανάλυση της συνάρτησης K του Ripley και σημεία εκτός της περιοχής μελέτης (πραγματικά ή προσομοιωμένα) ή αποκλείουν οτιδήποτε βρίσκεται εκτός της περιοχής μελέτης. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν μέθοδοι όπως η «buffer zone method», που χρησιμοποιεί παρατηρήσεις από μια ζώνη γύρω από την περιοχή μελέτης για να διορθώσει τα οριακά φαινόμενα [29], [30] και η «toroidal method», που δημιουργεί καθρεπτικές εικόνες των σημείων γύρω από την περιοχή μελέτης, αναδιπλώνοντάς την όπως σε μια τοροειδή

επιφάνεια [31], [8]. Στην δεύτερη κατηγορία μια διαδεδομένη μέθοδος είναι η Ripley's circumference με weighting factor [15]:

$$\hat{K}(t_s) = \frac{A}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N (w(l_i l_j) I(d_{ij} \leq t_s)) \quad (11)$$

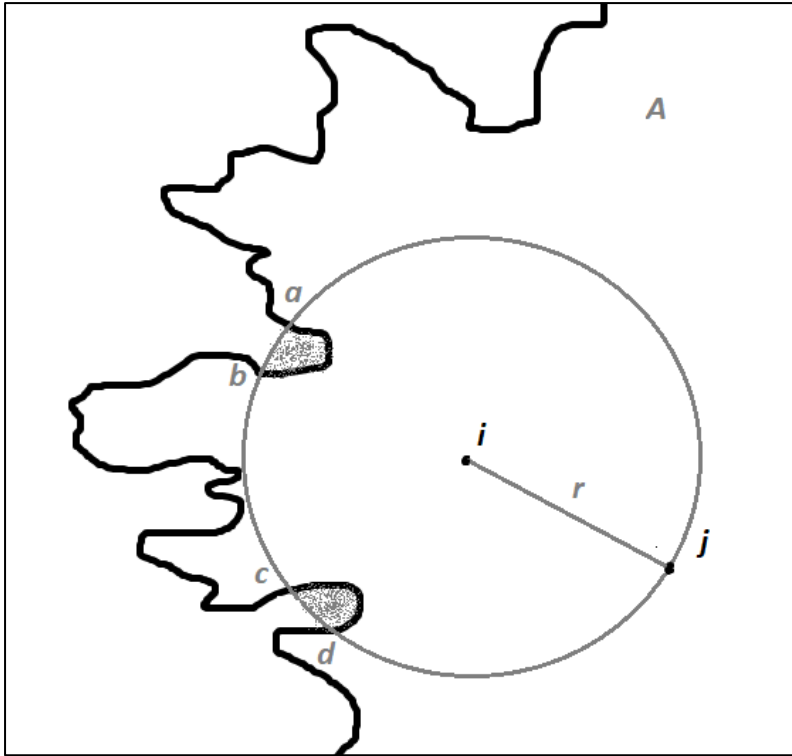
Όπου, ομοίως με την Εξίσωση 5, d_{ij} είναι η απόσταση από το i -ο σημείο προς το j -ου, και $I(x)$ είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση. Η διαφορά βρίσκεται στη συνάρτηση βάρους $w(l_i l_j)$, η οποία και προσφέρει την επιθυμητή διόρθωση για τα φαινόμενα που προκαλούνται από την εγγύτητα των σημείων στα όρια της περιοχής μελέτης. Αν το σημείο i απέχει αρκετά από τα όρια, τότε η απόσταση d_{ij} υπολογίζεται κανονικά, και αντίστοιχα το βάρος του θα παίρνει την τιμή 1. Αν όμως είναι κοντά στα όρια, είναι πιθανό ορισμένοι από τους δυνητικούς γείτονές του (σημεία j) να βρίσκονται εκτός της περιοχής μελέτης. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος isotropic correction προβλέπει ότι το βάρος $w(l_i l_j)$, πρέπει να ισούται με το αντίστροφο του ποσοστού της περιφέρειας του κύκλου ακτίνας t_s , ο οποίος επικεντρώνεται στο σημείο i , που βρίσκεται εντός των ορίων της περιοχής μελέτης.

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 3.8, εάν η ακτίνα που εξετάζεται αντιστοιχεί στον εξωτερικό κύκλο, τότε αυτός τέμνεται από τα όρια του τετραγώνου που ορίζει τη μελετώμενη περιοχή. Αν υποθεθεί ότι μόνο το 90% της περιφέρειας του κύκλου ακτίνας t_s , που περικλείει το σημείο αναφοράς (σημαδεμένο με κόκκινο), βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης, τότε το βάρος θα είναι $w = \frac{1}{0,9} \approx 1,11$, προκειμένου να αντισταθμιστεί η μείωση στην παρατηρησιμότητα των γειτονικών σημείων. Αν επιλεγεί κύκλος με μεγαλύτερη ακτίνα, το ποσοστό της περιφέρειας που βρίσκεται εντός των ορίων μειώνεται περαιτέρω, οπότε το βάρος αυξάνεται ανάλογα.



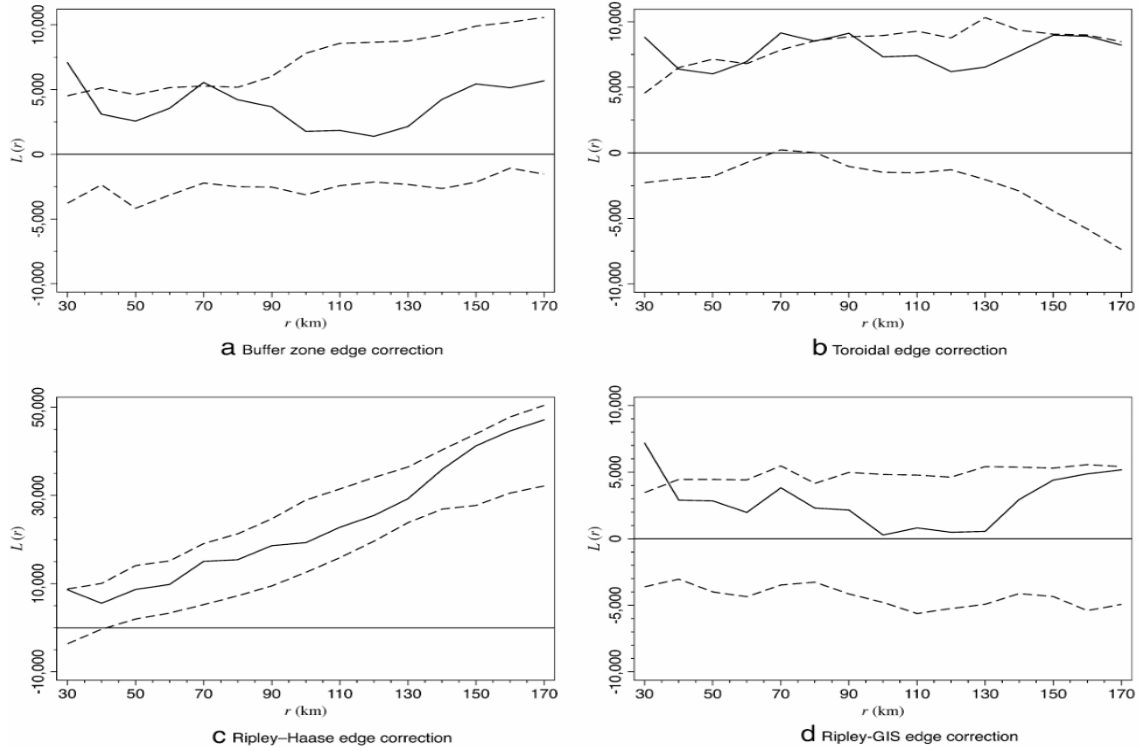
Εικόνα 3.8. Ripley's K-function: Ανάλυση χωρικής κατανομής σημείων με χρήση ακτινών απόστασης [Πηγή: Boston University EE509 "Applied Environmental Statistics" Διαθέσιμο στο https://people.bu.edu/dietze/Bayes2018/Lesson33_Space.pdf].

Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή και ως Ripley–Haase, καθώς ήταν ο πρώτος που εισήγαγε συστηματικά και περιέγραψε τη διορθωτική συνάρτηση βάρους για τη μέθοδο Ripley με στόχο τη διόρθωση των οριακών φαινομένων καθώς και πρότεινε ότι το βάρος πρέπει να είναι το αντίστροφο του ποσοστού της περιφέρειας του κύκλου που εμπίπτει στην περιοχή μελέτης [28]. Αυτή τη μέθοδο εξέλιξαν οι Ge Y., Sun M., και Pu Y. [27] και την ονόμασαν μέθοδο «Ripley–GIS» ώστε να μην χρησιμοποιείται μόνο σε τετραγωνικές περιοχές μελέτης όπως η Εικόνα 3.8, αλλά σε πολύπλοκα σχήματα (σύνορα χωρών και περιοχών γενικότερα) όπου θα μετρήσει ακριβώς τα τόξα της περιφέρειας του κύκλου που πέφτουν έξω και έτσι θα προσφέρει αληθινό γεωμετρικό βάρος για κάθε σημείο. Για παράδειγμα έστω σημείο i ως κεντρικό σημείο προς εξέταση ακτίνας r , που βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης A , και έχει γειτονικό του σημείο το j , όπως δείχνει η Εικόνα 3.9. Ο κύκλος περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα τόξα: το τόξο 1 από τα σημεία a , j και d , το τόξο 2 από το a έως το b , το τόξο 3 από το b έως το c , το τόξο 4 από το c και d . Με την χρήση της απλής μεθόδου Ripley–Haase συμπεριλαμβάνεται μόνο το τόξο 1 στον υπολογισμό του συντελεστή βάρους, και έτσι προκύπτει υπερεκτίμηση του στατιστικού μεγέθους, καθώς θα παρέλειπε να εντάξει το τόξο 3, παρά το γεγονός ότι βρίσκεται όλο εντός της περιοχής μελέτης. Εναλλακτικά με χρήση της μεθόδου Ripley–GIS υπολογίζονται με ακρίβεια τα γεωμετρικά τόξα του κύκλου που βρίσκονται εντός δηλαδή το 1 και το 3.



Εικόνα 3.9. Τομή του κύκλου ακτίνας εξέτασης r με την περιοχή μελέτης.

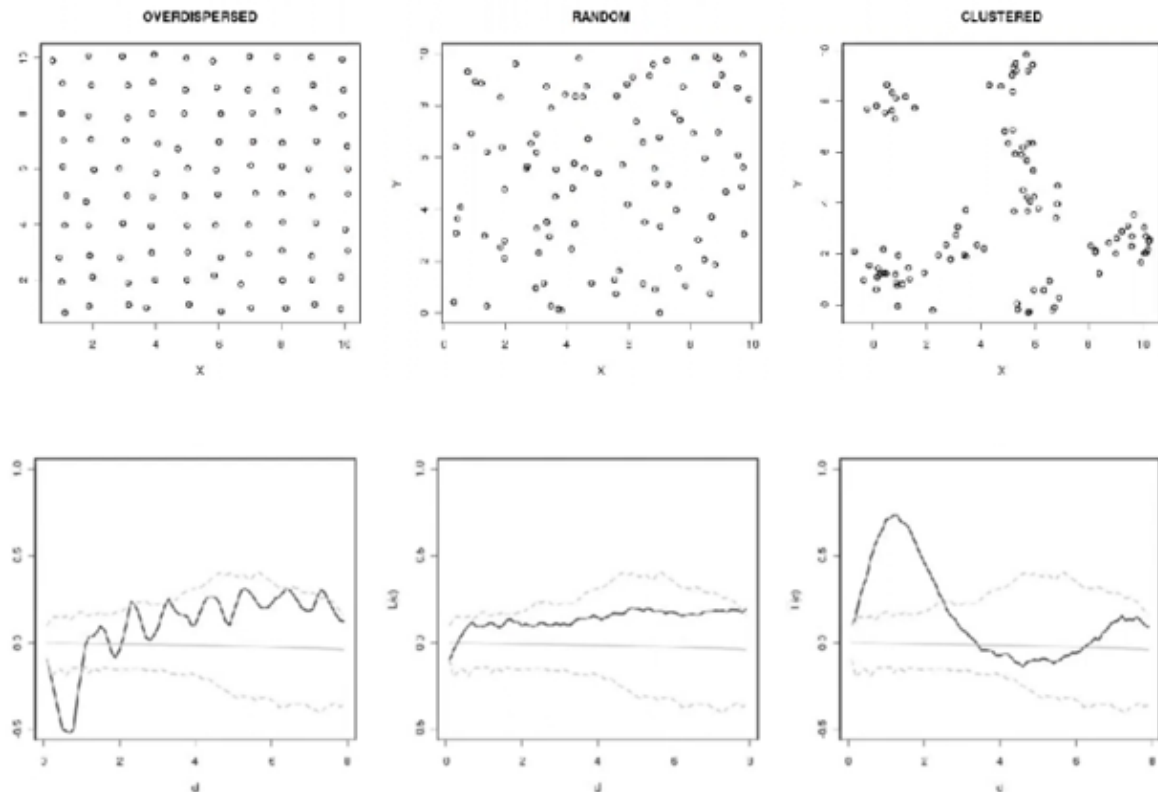
Έχει αποδειχθεί ότι σε περιοχές με ακανόνιστο σχήμα, η μέθοδος Ripley–GIS αποφεύγει τις στατιστικές μεροληψίες που προκαλούνται από τα οριακά φαινόμενα (edge effects) και παράγει στενότερες καμπύλες προσομοίωσης (simulation envelopes) σε σύγκριση με τις μεθόδους buffer zone, toroidal και Ripley–Haase, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.10 [27]. Οπότε αυτή η μέθοδος είναι που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή την έρευνα, στα σημεία όπου έχει εφαρμοστεί edge correction.



Εικόνα 3.10. Αναλύσεις ενός προσομοιωμένου τυχαίου προτύπου με διαφορετικές μεθόδους διόρθωσης οριακών φαινομένων [27].

Όσο αφορά τα γραφήματα που προκύπτουν ως αποτέλεσμα των μεθόδων, οι τιμές του K μπορούν να αναπαρασταθούν ως προς το μήκος της ακτίνας t_s , η γραφική παράσταση όμως αυξάνεται εκθετικά δίνοντας πολύ μεγάλες τιμές K όσο αυξάνεται η t_s . Για να είναι πιο εύκολα ερμηνεύσιμα τα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται και στην Εικόνα 3.11, υπολογίζεται το $L(t_s)$, μια τροποποιημένη μορφή του δείκτη $K(t_s)$, που εφαρμόζει ρίζα ώστε να φέρει πίσω τις μονάδες ως απόσταση (m) και όχι επιφάνεια (m^2) και έτσι να μπορέσει να συγκριθεί άμεσα με το t_s :

$$L(t_s) = \sqrt{\frac{K(t_s)}{\pi}} \quad (12)$$



Εικόνα 3.11. Διαφορετικές χωρικές κατανομές σημείων (πάνω σειρά) και οι αντίστοιχες Ripley's K-functions (κάτω σειρά) [Πηγή: Boston University EE509 "Applied Environmental Statistics" Διαθέσιμο στο https://people.bu.edu/dietze/Bayes2018/Lesson33_Space.pdf].

Στη συνέχεια, στα παραγόμενα γραφήματα απεικονίζεται η διαφορά $L(t_s) - t_s$, η οποία εκφράζει την απόκλιση της παρατηρούμενης κατανομής από την υπόθεση της πλήρους χωρικής τυχαιότητας (CSR). Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω διαφορά αποτυπώνει το κατά πόσο η μέση παρατηρούμενη απόσταση μεταξύ των σημείων διαφοροποιείται από την αναμενόμενη απόσταση t_s σε περίπτωση τυχαίας κατανομής. Ανάλογα με το είδος της χωρικής διασποράς που παρουσιάζουν τα σημεία (ομοιόμορφη, τυχαία ή συσσωρευμένη), μεταβάλλεται και η μορφή της καμπύλης στο γράφημα, ενώ για τις τιμές που παίρνει η διαφορά, σε περίπτωση που δεν έχει πραγματοποιηθεί στατιστικός έλεγχος όπως εξηγείται παρακάτω, ισχύουν οι εξής ερμηνευτικοί κανόνες:

- $L(t_s) - t_s > 0$: υπεραφθονία σημείων γεγονός που υποδηλώνει χωρική συσσώρευση (clustering)
- $L(t_s) - t_s < 0$: ο αριθμός των σημείων είναι μικρότερος από το αναμενόμενο, υποδηλώνοντας αποφυγή ή τάση προς ομοιόμορφη κατανομή
- $L(t_s) - t_s = 0$: τυχαία κατανομή, χωρική τυχαιότητα

Για παράδειγμα, έστω $t_s = 10$ km και $L(t_s) - t_s = 15$ km > 0 . Ισχύει ότι σε απόσταση έως 10 km, υπάρχουν πολύ περισσότερα γειτονικά σημεία από το αναμενόμενο για τυχαία κατανομή άρα παρατηρείται συσσώρευση.

Για να γίνει ο στατιστικός έλεγχος της τιμής $L(t_s) - t_s$, πραγματοποιείται μια προσομοίωση με τοποθέτηση τυχαίων σημείων στην περιοχή μελέτης. Επειδή είναι τυχαία αυτή η τοποθέτηση και μπορεί να προκύψουν συσσωρεύσεις ή διασκορπίσεις, εφαρμόζονται συνήθως τουλάχιστον 100 προσομοιώσεις για τις οποίες υπολογίζονται τα $L(t_s) - t_s$ για κάθε μήκος ακτίνας t_s , και καταγράφονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές που προκύπτουν, οι οποίες ονομάζονται φάκελοι ή περιθώρια εμπιστοσύνης (confidence envelopes). Η οριζόντια γραμμή είναι το μηδέν και αντιπροσωπεύει την τυχαία κατανομή (CSR – Complete Spatial Randomness), δηλαδή να ακολουθείται μια Poisson κατανομή ($K_{CSR}(r) = \pi r^2$) [14] ενώ τα διακεκομμένα όρια είναι τα περιθώρια εμπιστοσύνης. Όταν το $L(t_s) - t_s$ ξεπερνάει το κατώτερο όριο, τότε υποδηλώνεται η ομοιόμορφη κατανομή των σημείων, όπως στο πρώτο γράφημα της Εικόνα 3.11. Όταν ξεπερνάει το ανώτερο σημαίνει ότι τα σημεία συσσωρεύονται, όπως φαίνεται και στο τρίτο γράφημα, και όταν οι τιμές της συνάρτησης κυμαίνονται εντός των δυο ορίων τότε υπάρχει συμπεριφορά σαν τυχαία κατανομή.

Παρά το γεγονός ότι η συνάρτηση K του Ripley αποτελεί ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο για την πολυκλιμακική ανάλυση χωρικών προτύπων, η αξιοπιστία της εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του δείγματος. Σε περιπτώσεις μικρού πλήθους σημείων τα περιθώρια εμπιστοσύνης (confidence envelopes) τείνουν να είναι ιδιαίτερα ευρεία, η στατιστική ισχύς (power) των ελέγχων μειώνεται σημαντικά και η διακριτική ικανότητα της μεθόδου ως προς τον εντοπισμό αποκλίσεων από την πλήρη χωρική τυχειότητα (CSR) είναι περιορισμένη [34]. Συνεπώς, παρότι δεν υπάρχει επίσημα θεσμοθετημένο όριο, η χρήση της μεθόδου σε τόσο μικρά δείγματα μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα, καθώς οι παρατηρούμενες αποκλίσεις συχνά δεν είναι στατιστικά ανιχνεύσιμες [34],[35].

3.3.4. Ο δείκτης I του Moran και ο λόγος C του Geary

Υπάρχουν αρκετοί δείκτες χωρικής αυτοσυσχέτισης που δεν εστιάζουν στη χωρική μεταβλητή, αλλά αξιολογούν το βαθμό στον οποίο οι όμοιες παρατηρήσεις ή τιμές που παρουσιάζουν κάποια σημεία τείνουν να εμφανίζονται κοντά το ένα στο άλλο [10]. Ο πρώτος που ανέπτυξε ένα μέτρο χωρικής αυτοσυσχέτισης, ήταν ο Moran το 1948. Στόχος του ήταν η ανάλυση στοχαστικών φαινομένων που εκδηλώνονται σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις μέσα στον χώρο. Έπειτα, ο δείκτης Moran's I χρησιμοποιήθηκε στην πλειοψηφία των μελετών χωρικής αυτοσυσχέτισης [9].

Με τον όρο αυτοσυσχέτιση εννοείται η ταυτόχρονη μεταβολή των τιμών δύο αριθμητικά εκφρασμένων τυχαίων μεταβλητών, και η μέτρηση της, μεταξύ των γειτονικών παρατηρήσεων σε ένα χωρικό μοτίβο, που γίνεται μέσω αυτού του στατιστικού δείκτη, ο οποίος με τη σειρά του ορίζεται ως ένα μέτρο της συσχέτισης μεταξύ γειτονικών παρατηρήσεων σε ένα μοτίβο [10], [11]. Με απλά λόγια, για να υπολογιστεί ο δείκτης I του Moran πρέπει να γίνει η διαίρεση της χωρικής συνδιακύμανσης με τη συνολική διακύμανση και όντας μια παραγοντική στατιστική μέθοδος, τα αποτελέσματα που θα προκύπτουν (οι τιμές θα κυμαίνονται περίπου από το -1 έως το 1), πρέπει να ερμηνεύονται σε σχέση με μια «μηδενική υπόθεση». Στην περίπτωση αυτή, η υπόθεση δηλώνει ότι το χαρακτηριστικό που αναλύεται κατανέμεται τυχαία μεταξύ των στοιχείων της υπό μελέτη περιοχής. Ανάλογα με αυτό το πρόσημο, προκύπτει το συμπέρασμα για θετική χωρική αυτοσυσχέτιση (θετικό πρόσημο), αρνητική χωρική αυτοσυσχέτιση (αρνητικό πρόσημο) και απουσία χωρικής αυτοσυσχέτισης (όταν είναι το αποτέλεσμα ίσο με 0). Ο τύπος υπολογισμού του I είναι :

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων σε ολόκληρη την περιοχή, \bar{x} είναι ο μέσος όρος της μεταβλητής, x_i είναι η τιμή της μεταβλητής σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, x_j είναι η τιμή της μεταβλητής σε μια άλλη τοποθεσία και w_{ij} είναι το χωρικό βάρος μεταξύ των τοποθεσιών i και j [10].

Ο λόγος συνεκτικότητας C , που αναπτύχθηκε από τον Geary το 1954, είναι και αυτός ένας τρόπος μέτρησης της χωρικής αυτοσυσχέτισης (μια εναλλακτική προσέγγιση στον Moran's I), και θεωρείται από τους πιο πετυχημένους [12]. Διαφέρει, διότι χρησιμοποιείται σε καταστάσεις όπου η τοπική (ή κοντινή) αυτοσυσχέτιση έχει μεγαλύτερη σημασία (σύγκριση γειτονικών τιμών) και βασίζεται στις αποκλίσεις των αποκρίσεων της κάθε παρατήρησης – τιμής, με τις υπόλοιπες [13].

$$C = \frac{n-1}{2S_0} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - x_j)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

Οι τιμές που προκύπτουν αφού υπολογιστεί, βρίσκονται ανάμεσα στο 0 και στο 2 με το μηδέν να αντιστοιχεί σε ισχυρή θετική χωρική αυτοσυσχέτιση (οι τιμές είναι συσσωρευμένες) και το 2 να αντιπροσωπεύει ισχυρή αρνητική χωρική αυτοσυσχέτιση (οι τιμές είναι διασκορπισμένες). Το 1 υποδεικνύει απουσία αυτοσυσχέτισης άρα τυχαία κατανομή. Αν υπάρχει ανάγκη μετατροπής των τιμών σε κλίμακα αντίστοιχη με του Moran, δηλαδή -1 έως +1, γίνεται με την βοήθεια του τύπου:

$$C^* = 1 - C \quad (15)$$

Αυτές οι μέθοδοι είναι βασικά εργαλεία για την ανάλυση χωρικών δεδομένων και βοηθούν στην περαιτέρω κατανόηση των χωρικών μοτίβων και της διάρθρωσης του γεωγραφικού χώρου, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες για την κατανομή και τις σχέσεις των μεταβλητών στον χώρο.

3.4. Επιλογή και Αξιοποίηση Δεικτών Διασποράς στην Ενεργειακή Ασφάλεια

Μετά την ανάλυση των διαφορετικών δεικτών που παρουσιάστηκαν, είναι αναγκαίο να αποσαφηνιστεί ποιοι εξ αυτών αποτελούν τα πιο κατάλληλα εργαλεία για την ανάπτυξη δεικτών διασποράς κρίσιμων ενεργειακών υποδομών (μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), ως μέτρα αξιολόγησης της ενεργειακής ανθεκτικότητας σε εθνικό επίπεδο. Από την παραπάνω εκτεταμένη ανάλυση και παρουσίαση των δεικτών διασποράς, κρίνεται ότι κατάλληλοι δείκτες και αυτοί στους οποίους θα εστιάσει η παρούσα εργασία είναι: ο Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα (Nearest Neighbor Index, R) και η συνάρτηση K του Ripley.

Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης Nearest Neighbor παρέχει μια μοναδική αριθμητική τιμή που αποτυπώνει με σαφήνεια το επίπεδο συγκέντρωσης ή διασποράς. Αυτή η τιμή είναι εύκολα αξιοποιήσιμη σε συγκριτικές μελέτες ή έρευνες αξιολόγησης (οι οποίες χρησιμοποιούν εργαλεία της Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων), καθώς μπορεί να συνδυαστεί απευθείας με άλλους δείκτες ενεργειακής ασφάλειας (όπως διαφοροποίηση πηγών, κόστος ή αξιοπιστία υποδομών, κλπ.). Η απλότητα στην ερμηνεία του τον καθιστά πρακτικό και αποτελεσματικό για συγκρίσεις μεταξύ χωρών ή σεναρίων και εύκολο στον υπολογισμό του.

Η συνάρτηση K του Ripley, από την άλλη, παρέχει πολύ πιο λεπτομερή εικόνα της διασποράς, αλλά αποδίδει πολλαπλές τιμές για διαφορετικές ακτίνες. Για να καταστεί συγκρίσιμη και ικανή να χρησιμοποιηθεί σε πολυκριτηριακή ανάλυση, απαιτείται η επιλογή μιας κρίσιμης εμβέλειας αποστάσεων που θεωρείται πιο σημαντική για το υπό εξέταση σύστημα. Από το αντίστοιχο διάστημα μπορεί να εξαχθεί μια μέση τιμή που εκφράζει τη διασπορά σε συγκεκριμένη κλίμακα. Έτσι, ο δείκτης μετατρέπεται σε μια ενιαία τιμή, κατάλληλη για ένταξη σε πολυκριτηριακές μεθόδους αξιολόγησης ενεργειακής ασφάλειας.

Αντίθετα, ο αλγόριθμος Convex Hull και οι δείκτες Moran's I/Geary's C, παρότι χρήσιμοι ως συμπληρωματικά εργαλεία, δεν κρίθηκαν κατάλληλοι για την τελική αξιοποίηση. Ο Convex Hull αποδίδει απλώς την εξωτερική γεωμετρική έκταση, και προσφέρει μια σχεδίαση περιγράμματος του χώρου που καταλαμβάνουν τα σημείων προς εξέταση, εντός της περιοχής μελέτης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές σχέσεις ή τα μοτίβα κατανομής. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπερεκτιμήσει τη

διασπορά σε περιπτώσεις όπου οι μονάδες συγκεντρώνονται σε λίγα σημεία αλλά εντός μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής. Οι δείκτες Moran's I και Geary's C, από την άλλη, εξετάζουν τη χωρική αυτοσυσχέτιση με βάση επιπλέον ιδιότητες (π.χ. ισχύς των μονάδων), κάτι που δεν αποτελεί το επίκεντρο της παρούσας εργασίας, η οποία επικεντρώνεται καθαρά στη γεωγραφική κατανομή ανεξάρτητα από τεχνολογικές ή ποσοτικές παραμέτρους.

Συνολικά, η επιλογή του Ripley και του Nearest Neighbor επιτρέπει τη δημιουργία δεικτών που καλύπτουν με σαφήνεια και συγκρισιμότητα τον χωρικό παράγοντα της ενεργειακής ανθεκτικότητας. Η αξιοποίησή τους σε πολυκριτηριακές μεθόδους προσφέρει ένα πρόσθετο κριτήριο αξιολόγησης, το οποίο ενισχύει και συμπληρώνει την πληρότητα του συστήματος αξιολόγησης ενεργειακής ασφάλειας, συμβάλλοντας στην πιο τεκμηριωμένη υποστήριξη ενεργειακής πολιτικής και ενεργειακού σχεδιασμού.

4. Πειραματική εφαρμογή των δεικτών σε πραγματικά γεωγραφικά δεδομένα

Η μετάβαση από τη θεωρητική περιγραφή των δεικτών, στην εφαρμογή τους σε πραγματικά δεδομένα, αποτελεί καθοριστικό στάδιο για την αξιολόγηση της πρακτικής τους χρησιμότητας. Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, μέσα από την εφαρμογή τους σε χωρικά δεδομένα πραγματικών γεωγραφικών περιοχών και μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Η επιλογή διαφορετικών χωρών και κατηγοριών ενεργειακών εγκαταστάσεων επιτρέπει την ανάδειξη των δυνατοτήτων αλλά και των περιορισμών των δεικτών, υπό ποικίλες συνθήκες γεωγραφικής πολυπλοκότητας και ενεργειακής διαφοροποίησης.

Ειδικότερα, το κεφάλαιο περιγράφει αρχικά τη συλλογή και την προεπεξεργασία των απαραίτητων γεωγραφικών δεδομένων, καθώς και τη μεθοδολογική ταξινόμηση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ανά κατηγορία καυσίμου ή τεχνολογίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή δεικτών χωρικής ανάλυσης, τόσο σε εθνικό όσο και σε επιμέρους επίπεδο, με στόχο την κατανόηση των προτύπων χωρικής διάταξης και τη διατύπωση ερμηνειών σχετικά με τον βαθμό διασποράς των σημείων. Η προσέγγιση αυτή, καθιστά δυνατή τη σύνδεση των θεωρητικών υποθέσεων, που έχουν ήδη αναλυθεί και εξεταστεί σε βάθος, με εμπειρικά αποτελέσματα, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις της εφαρμογής του εκάστοτε δείκτη σε σύνθετα πραγματικά δεδομένα.

4.1. Περιγραφή χωρικών δεδομένων συνόρων και δεδομένων των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Για την υλοποίηση των βασικών αλγορίθμων, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση γεωγραφικών πλαισίων, τα οποία προκύπτουν από την αλληλουχία συντεταγμένων που ορίζουν τα διοικητικά όρια των υπό μελέτη χωρών. Για το σκοπό αυτό, αντλήθηκαν τα κατάλληλα shapefiles από την επίσημη ιστοσελίδα του GADM (Global Administrative Areas), η οποία παρέχει δωρεάν χάρτες και χωρικά δεδομένα για όλες τις χώρες, καθώς και για τις διοικητικές τους υποδιαίρεσεις (περιφέρειες, νομοί, δήμοι) [20]. Για την αποτύπωση των εθνικών συνόρων αξιοποιείται το shapefile επιπέδου 0 (level 0), ενώ η διάκριση σε μικρότερες διοικητικές ενότητες πραγματοποιείται μέσω των επιπέδων 1 (περιφέρειες), 2 (νομοί) και 3 (δήμοι). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εξετάστηκαν οι γεωγραφικές περιοχές της της Ελβετίας, της Ελλάδας, και μερικώς της Γαλλίας, με χρήση συγκεκριμένα του επιπέδου 0.

Ως αρχική μελέτη επιλέχθηκε η περίπτωση της Ελβετίας, δεδομένου ότι η απουσία νησιωτικών ή απομονωμένων γεωγραφικών τμημάτων καθιστά ευκολότερη τη γεωμετρική επεξεργασία και την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης. Σε επόμενο στάδιο, επιλέχθηκε η Ελλάδα, η οποία χαρακτηρίζεται

από ιδιαίτερα περίπλοκη συννοριακή γραμμή, καθώς περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό νησιών. Στην ανάλυση πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον αλγόριθμο αποκλειστικά οι χερσαίες εκτάσεις και όχι η θαλάσσια περιοχή που τις διαχωρίζει. Σε αυτό το σημείο, ο δείκτης δυσκολίας αυξάνεται σημαντικά, λόγω της ανάγκης ακριβούς αποτύπωσης και επεξεργασίας της γεωγραφικής πολυπλοκότητας. Τέλος, δεδομένου ότι η Ελλάδα δεν διαθέτει πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, καθίσταται αδύνατη η σύγκριση αυτής της κατηγορίας με την αντίστοιχη περίπτωση της Ελβετίας. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε μια τρίτη χώρα — η Γαλλία — με σκοπό την απομονωμένη εξέταση της χωρικής κατανομής των πυρηνικών μονάδων.

Παράλληλα με τα χωρικά δεδομένα, χρειάστηκαν και τα δεδομένα σχετικά με τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής όπως συντεταγμένες, κατηγορία μονάδας και χωρητικότητα. Σε αυτό βοήθησε η Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Μονάδων Ηλεκτροπαραγωγής (Global Power Plant Database), μια εκτενή, ανοικτής πρόσβασης βάση δεδομένων, που συγκεντρώνει και ενοποιεί πληροφορίες για μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Σχεδιάστηκε με σκοπό τη διευκόλυνση της ανάλυσης, της συγκριτικής αξιολόγησης και της εξαγωγής συμπερασμάτων μέσω μιας ενιαίας και δομημένης πλατφόρμας. Περιλαμβάνει περίπου 30.000 καταγεγραμμένες μονάδες από 164 χώρες, καλύπτοντας τόσο συμβατικές θερμικές τεχνολογίες (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, πυρηνικά, βιομάζα, απόβλητα, γεωθερμία) όσο και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (υδροηλεκτρικά, αιολικά, φωτοβολταϊκά). Κάθε εγγραφή που είναι καταχωρημένη, περιλαμβάνει τις συντεταγμένες και την χώρα της μονάδας και βασικά χαρακτηριστικά, όπως η ισχύς, η παραγωγή και ο τύπος καυσίμου [21].

Από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων πραγματοποιήθηκαν συγκεκριμένα βήματα προεπεξεργασίας και επιλογής. Αρχικά, αποκλείστηκαν οι μονάδες με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 2 MW, ώστε να περιοριστεί η επίδραση πολύ μικρής κλίμακας εγκαταστάσεων. Έπειτα, οι μονάδες ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες, βάσει του τύπου καυσίμου ή τεχνολογίας, ως εξής: Ορυκτά καύσιμα, Ελεγχόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Μεταβλητές ΑΠΕ, και Πυρηνικές μονάδες.

Οι ορυκτές μονάδες περιλαμβάνουν μονάδες που βασίζονται σε άνθρακα (coal), φυσικό αέριο (gas) και πετρέλαιο (oil). Οι ελεγχόμενες ΑΠΕ (dispatchable ή controllable renewables) περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως τα υδροηλεκτρικά (hydro) και η ενεργειακή αξιοποίηση αποβλήτων (waste-to-energy), οι οποίες θεωρούνται ελεγχόμενες και ευέλικτες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα στη ζήτηση κατόπιν εντολής των διαχειριστών του ηλεκτρικού δικτύου [22]. Οι μεταβλητές ΑΠΕ (non-dispatchable renewables) χαρακτηρίζονται από την διακοπτόμενη και μη ελεγχόμενη φύση τους, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για παροχή ενέργειας κατά παραγγελία [23], διότι περιλαμβάνουν τεχνολογίες που εξαρτώνται από εξωγενείς

παράγοντες, όπως η ηλιακή (solar) και η αιολική ενέργεια (wind). Τέλος, οι πυρηνικές μονάδες αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία θερμικής παραγωγής υψηλής ισχύος.

Συγκεκριμένα:

- Η Ελβετία περιλαμβάνει κυρίως ελεγχόμενες ΑΠΕ (hydro), μεταβλητές ΑΠΕ (solar) και πυρηνικές μονάδες.
- Η Ελλάδα διαθέτει μονάδες ορυκτών καυσίμων (coal, gas, oil), ελεγχόμενων ΑΠΕ (hydro, waste) και μεταβλητών ΑΠΕ (solar, wind).
- Η Γαλλία χαρακτηρίζεται από υψηλή εξάρτηση από πυρηνική ενέργεια, ενώ διαθέτει επίσης ελεγχόμενες και μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες δεν θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα έρευνα.

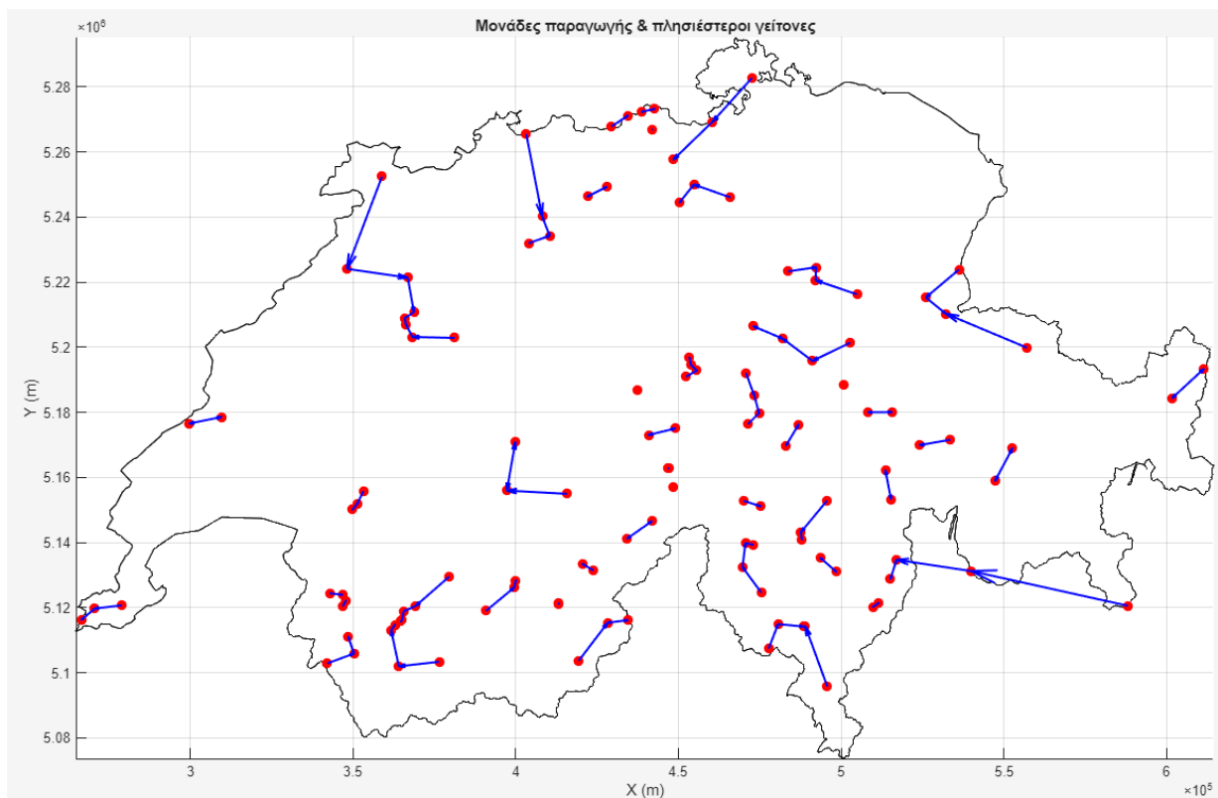
Ειδικά στην περίπτωση του Rippley, ακολουθήθηκε η ίδια πειραματική διαδικασία με ορισμένες διαφορές. Συγκεκριμένα, πριν τη μετάβαση στα πραγματικά δεδομένα των τριών χωρών, πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε μικρότερα πιλοτικά προβληματάκια (στημένα ώστε να προκύψουν συμπεράσματα και να εξεταστεί η συμπεριφορά του δείκτη ανάλογα την μορφή των σημείων στον χώρο, σε συστάδες ή τελείως διάσπαρτα) για να επιβεβαιωθεί η χρηστικότητα και ορθή εφαρμογή του αλγορίθμου βήμα προς βήμα.

4.2. Εφαρμογή του δείκτη του Εγγύτερου Γείτονα - Nearest Neighbor Index (R)

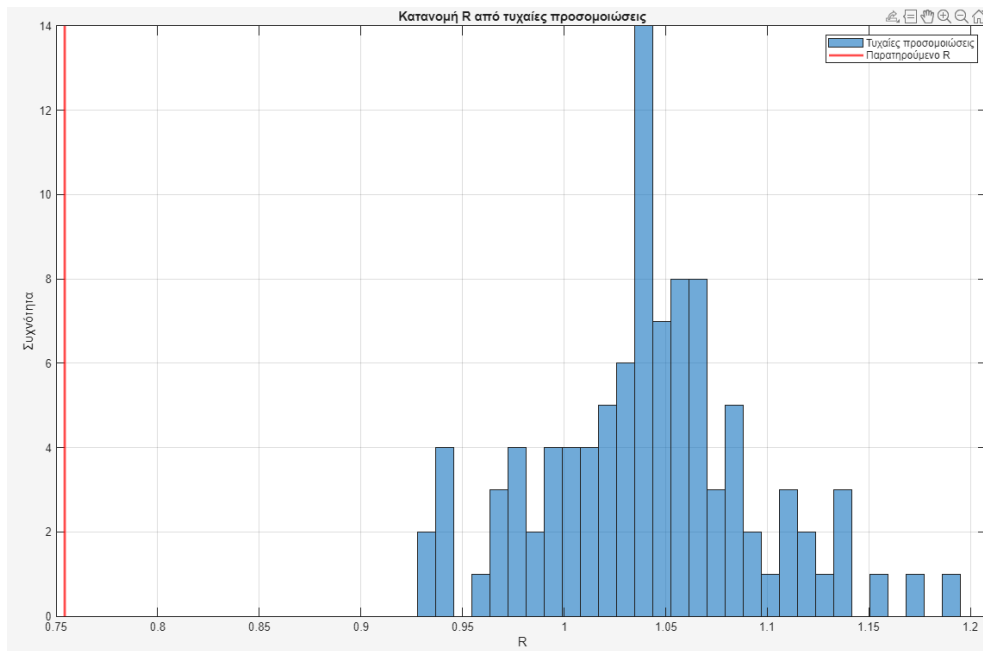
4.2.1. Μελέτη περίπτωσης: Ελβετία

Αρχικά, αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον MATLAB τρία διακριτά προγράμματα για την εφαρμογή του δείκτη Εγγύτερου Γείτονα (Nearest Neighbor Index) στην περίπτωση της Ελβετίας. Στο πρώτο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε το πλήρες σύνολο δεδομένων που αφορά μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 2 MW. Στο δεύτερο, πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτική επιλογή 40 μονάδων από το ίδιο σύνολο, με στόχο τη μελέτη εντονότερων χωρικών συσσωρεύσεων. Το τρίτο πρόγραμμα βασίστηκε σε ομαδοποίηση των μονάδων ανά κατηγορία παραγωγής — υδροηλεκτρικές, πυρηνικές και ηλιακές — ώστε να διερευνηθεί η χωρική διάταξη κάθε υποομάδας ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τρεις παραπάνω εφαρμογές παρουσιάζονται στη συνέχεια, τόσο σε αριθμητική μορφή όσο και μέσω γραφημάτων, ενώ έχουν εφαρμοστεί έκαστος 99 προσομοιώσεις Monte Carlo για στατιστική σύγκριση, με στόχο την πληρέστερη αποτύπωση της χωρικής συμπεριφοράς των σημείων.

Τα αποτελέσματα του πρώτου προγράμματος συμπέραναν συσταδοποίηση με την τιμή του δείκτη να είναι υψηλή χωρίς να περνάει όμως την μονάδα, 0.75. Μέσω του ιστογράμματος των προσομοιώσεων (Εικόνα 4.2), αυτό επαληθεύεται καθώς η τιμή του δείκτη (κόκκινη κάθετη γραμμή) προηγείται των περιοχών τιμών που βρέθηκαν κατά τις τυχαίες προσομοιώσεις. Κατά την εκτέλεση τους, ελάχιστη τιμή του δείκτη R είναι 0.93, και μέγιστη 1.19. Επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα είναι μικρότερη από το διάστημα 90% εμπιστοσύνης (από το 5^ο εκατοστημόριο έως το 95^ο): [0.93, 1.13] . Η μέση παρατηρούμενη απόσταση καταγράφηκε ως 6.66 km, ενώ η αναμενόμενη απόσταση σε μια τυχαία κατανομή υπολογίστηκε να είναι 8.83 km στην συγκεκριμένη περίπτωση για τα 138 σημεία. Η Εικόνα 4.1 απεικονίζει τα σημεία με κόκκινο, και με μπλε βέλος υποδηλώνεται ο πιο κοντινός γείτονας για το κάθε ένα από αυτά.

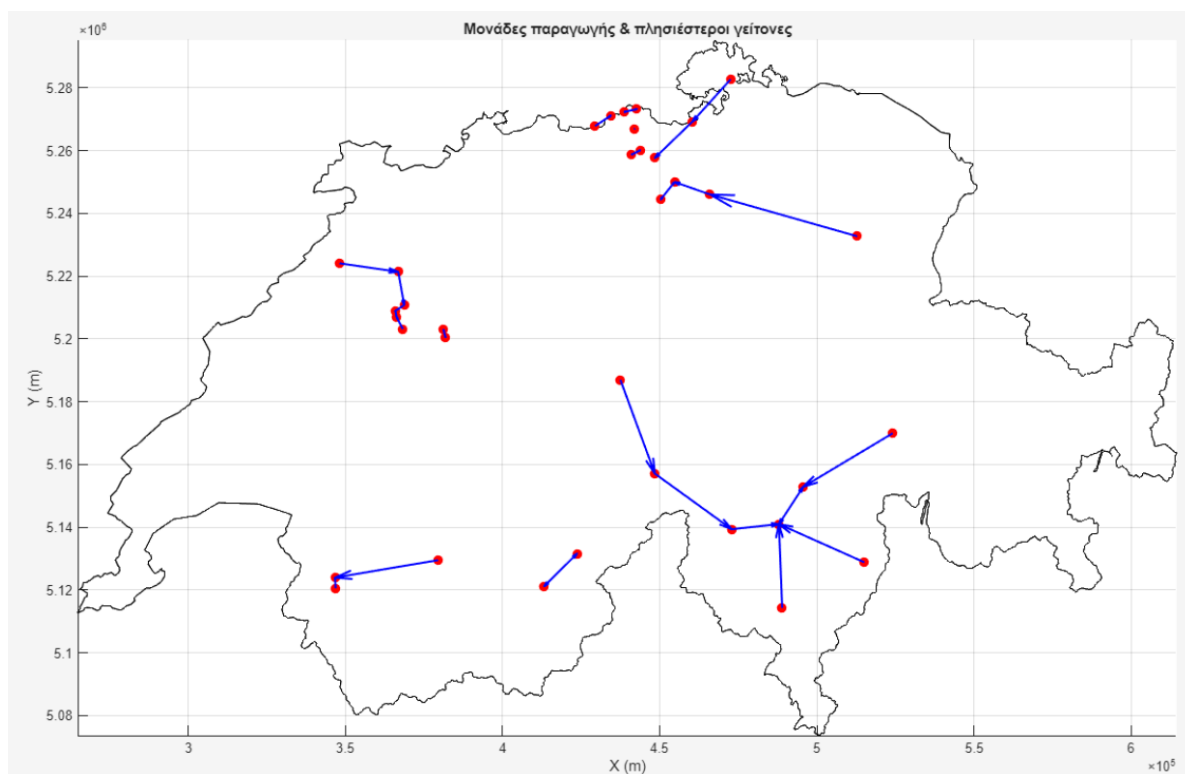


Εικόνα 4.1. Nearest Neighbor για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 2 MW Ελβετίας.

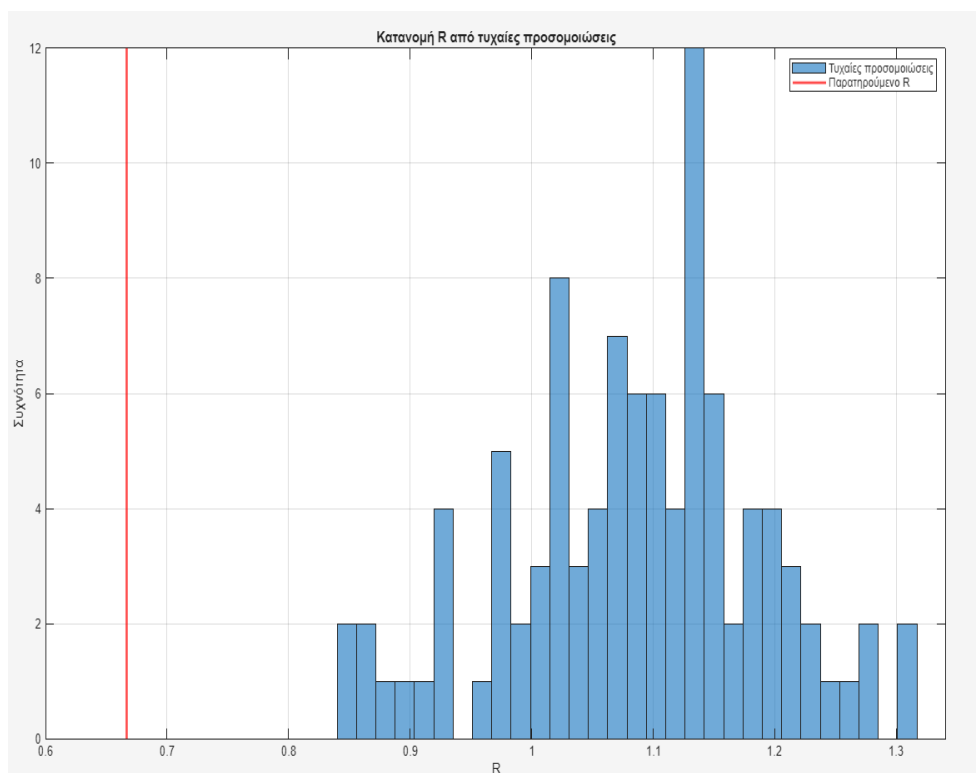


Εικόνα 4.2. Ιστογράμμο προσομοιώσεων για δείκτη R Ελβετίας (138 σημεία)

Τα αποτελέσματα του δεύτερου προγράμματος συμπέραναν και αυτά συσταδοποίηση, το οποίο ήταν και ο στόχος, μιας και τα σημεία ήταν επιλεγμένα για να αποτελούν μέρος δυο συστάδων. Η τιμή του δείκτη είναι μικρότερη άρα ανταποκρίνεται στην κατανομή των σημείων, 0.67. Πάλι αυτό επαληθεύεται, μέσω του ιστογράμματος των προσομοιώσεων (Εικόνα 4.2), καθώς η τιμή του δείκτη προηγείται των περιοχών τιμών που βρέθηκαν κατά τις τυχαίες προσομοιώσεις. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.84, και μέγιστη 1.32. Επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα είναι μικρότερη από το διάστημα 90% εμπιστοσύνης : [0.89, 1.26]. Θα μπορούσε να είναι και ακόμα μικρότερη αν δεν υπήρχαν τόσο μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των σημείων του νοτιότερου μισού της Ελβετίας, που αλλάζουν την τιμή της μέσης παρατηρούμενης απόστασης, 10.94 km. Η αναμενόμενη απόσταση σε μια τυχαία κατανομή για αυτή την περίπτωση των 40 σημείων, υπολογίστηκε να είναι 16.41 km. Η Εικόνα 4.3 δείχνει τις σχηματισμένες συστάδες και όπως στις προηγούμενη εικόνα με μπλε βέλος υποδηλώνεται ο πιο κοντινός γείτονας για το κάθε ένα σημείο.

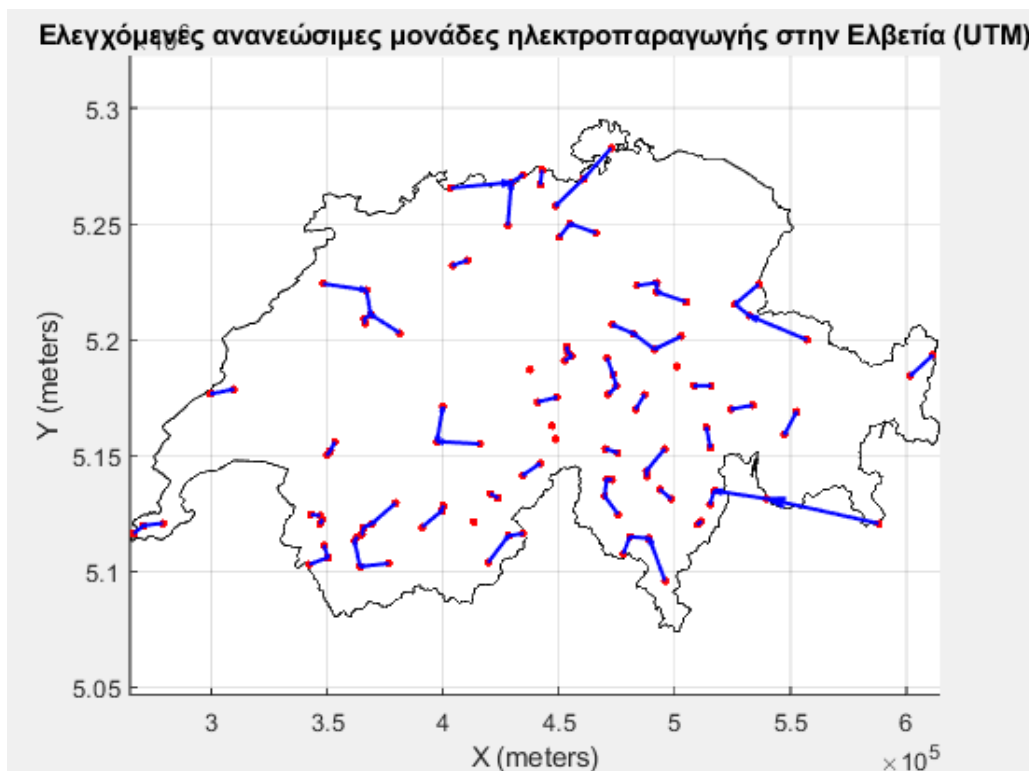


Εικόνα 4.3. Nearest Neighbor για 40 συσταδοποιημένες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας.

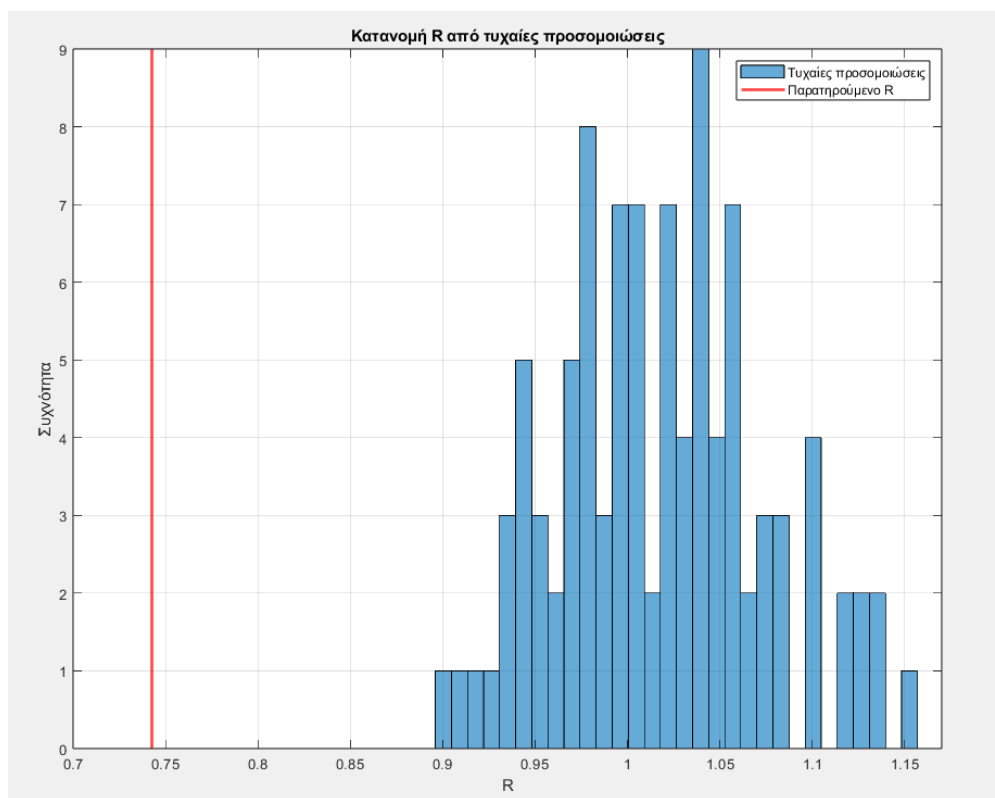


Εικόνα 4.4. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R Ελβετίας (40 σημεία)

Το τρίτο πρόγραμμα εκτελέστηκε 3 φορές (μία για κάθε κατηγορία που επιλέγεται σύμφωνα με την βούληση του χρήστη). Τα αποτελέσματα για την κατηγορία των ελεγχόμενων ανανεώσιμων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής συμπέραναν συσταδοποίηση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5 ο αριθμός των σημείων είναι πολύ κοντίνος με αυτόν του πρώτου προγράμματος (132 συνολικά) καθώς η πλειονότητα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής της Ελβετίας είναι υδροηλεκτρικές, επομένως η τιμή του δείκτη δεν διαφέρει πολύ, 0.74. Πάλι αυτό επαληθεύεται, μέσω του ιστογράμματος των προσομοιώσεων (Εικόνα 4.6), καθώς η τιμή του δείκτη προηγείται των περιοχών τιμών που βρέθηκαν κατά τις τυχαίες προσομοιώσεις. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.90, και μέγιστη 1.16. Επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα είναι μικρότερη από το διάστημα 90% εμπιστοσύνης : $[0.93, 1.12]$. Η τιμή της μέσης παρατηρούμενης απόστασης είναι στα 6.70 km, ενώ η αναμενόμενη απόσταση είναι 9.03 km.

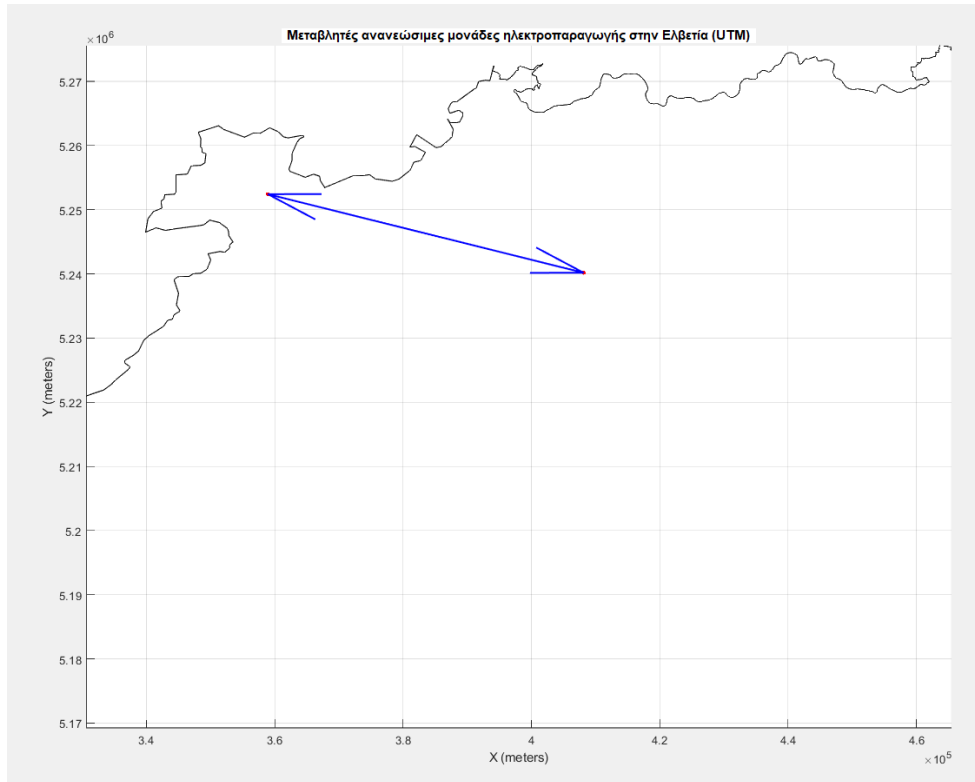


Εικόνα 4.5. Nearest Neighbor για ελεγχόμενες ανανεώσιμες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας.

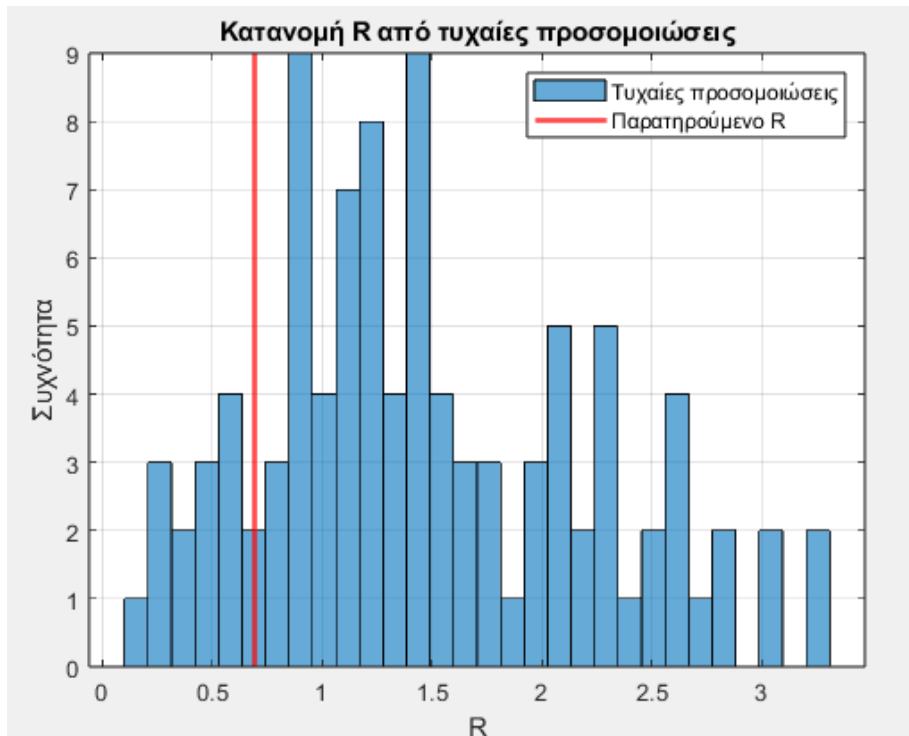


Εικόνα 4.6. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R ελεγχόμενων ανανεώσιμων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας (132 σημεία).

Τα σημεία για τις μεταβλητές ανανεώσιμες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι μόνο 2 (Εικόνα 4.7), και η τιμή του δείκτη, 0.69 υποδηλώνει και πάλι συσταδοποίηση, με μέση παρατηρούμενη απόσταση στα 5.07 χλμ. ενώ αναμενόμενη απόσταση 7.34 χλμ. Ωστόσο, η εκτέλεση των προσομοιώσεων τοποθέτησε την εν λόγω τιμή εντός του εύρους των προσομοιωμένων τιμών, όπως αποτυπώνεται και στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.8) Το γεγονός αυτό αναιρεί τον αρχικό ισχυρισμό περί συσσώρευσης και ενισχύει την ερμηνεία ότι η χωρική διάταξη των σημείων αντιστοιχεί πιθανώς πιο εύστοχα, σε τυχαία κατανομή. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.19, και μέγιστη 3.29, επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα βρίσκεται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης 90% : [0.36, 2.79].

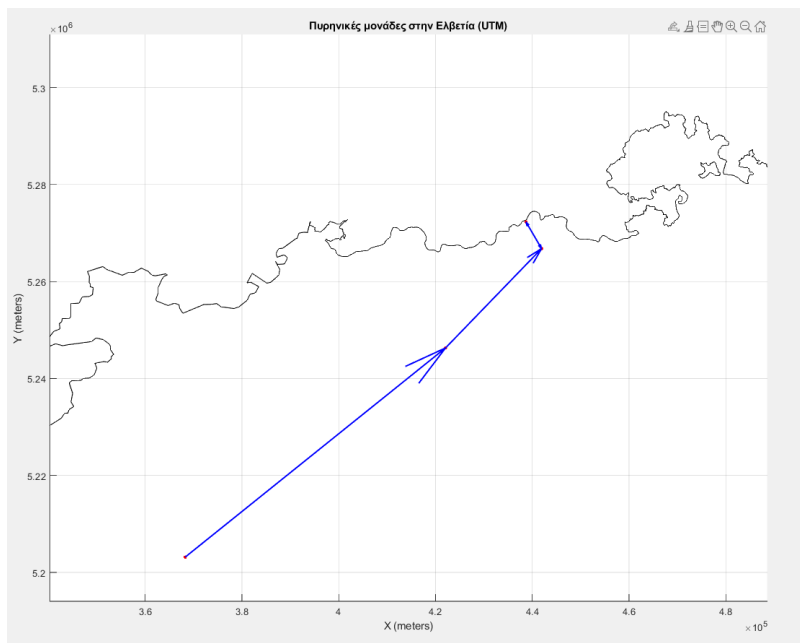


Εικόνα 4.7. Nearest Neighbor για μεταβλητές ανανεώσιμες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας.

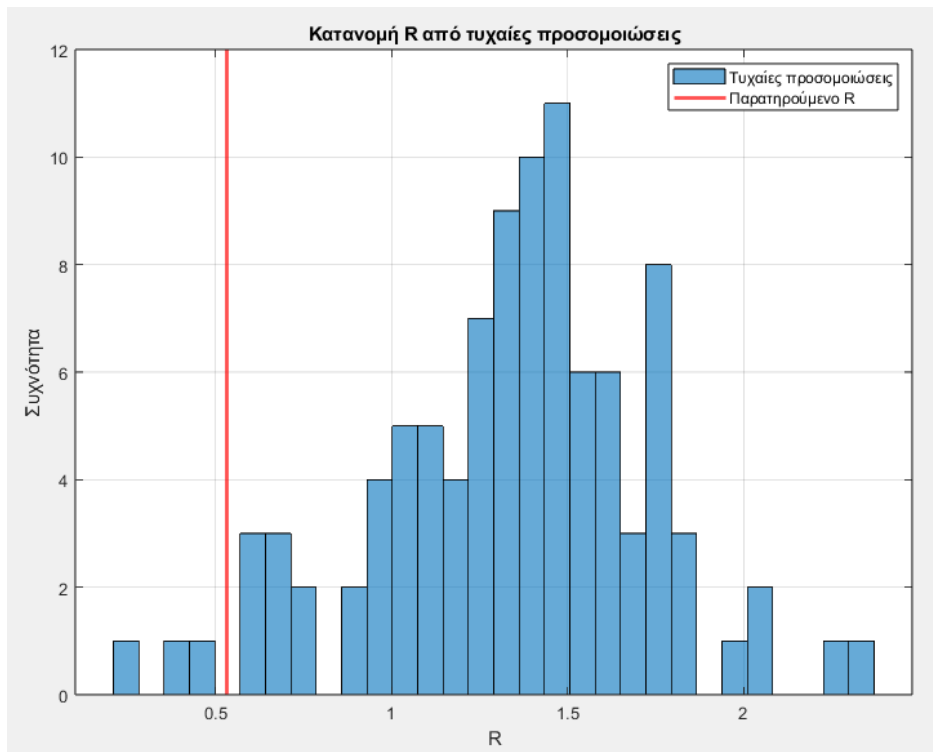


Εικόνα 4.8. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R μεταβλητών ανανεώσιμων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας (2 σημεία).

Τέλος οι τέσσερις πυρηνικές μονάδες της Ελβετίας (Εικόνα 4.9) υποδήλωσαν και αυτές συσσώρευση, με τον δείκτη τους να έχει την μικρότερη καταγεγραμμένη έως τώρα τιμή, 0.53. Πάλι αυτό επαληθεύεται, μέσω του ιστογράμματος των προσομοιώσεων (Εικόνα 4.10), καθώς η τιμή του δείκτη προηγείται των περιοχών τιμών του διαστήματος 90% που βρέθηκαν κατά τις τυχαίες προσομοιώσεις. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.30, και μέγιστη 2.55. Επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα είναι μικρότερη από το διάστημα 90% εμπιστοσύνης : [0.65, 2.13]. Η μέση παρατηρούμενη απόσταση μεταξύ των τεσσάρων σημείων είναι στα 2.76 χλμ. ενώ η αναμενόμενη (τυχαία) απόσταση είναι στα 5.19 χλμ.



Εικόνα 4.9. Nearest Neighbor για πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας.



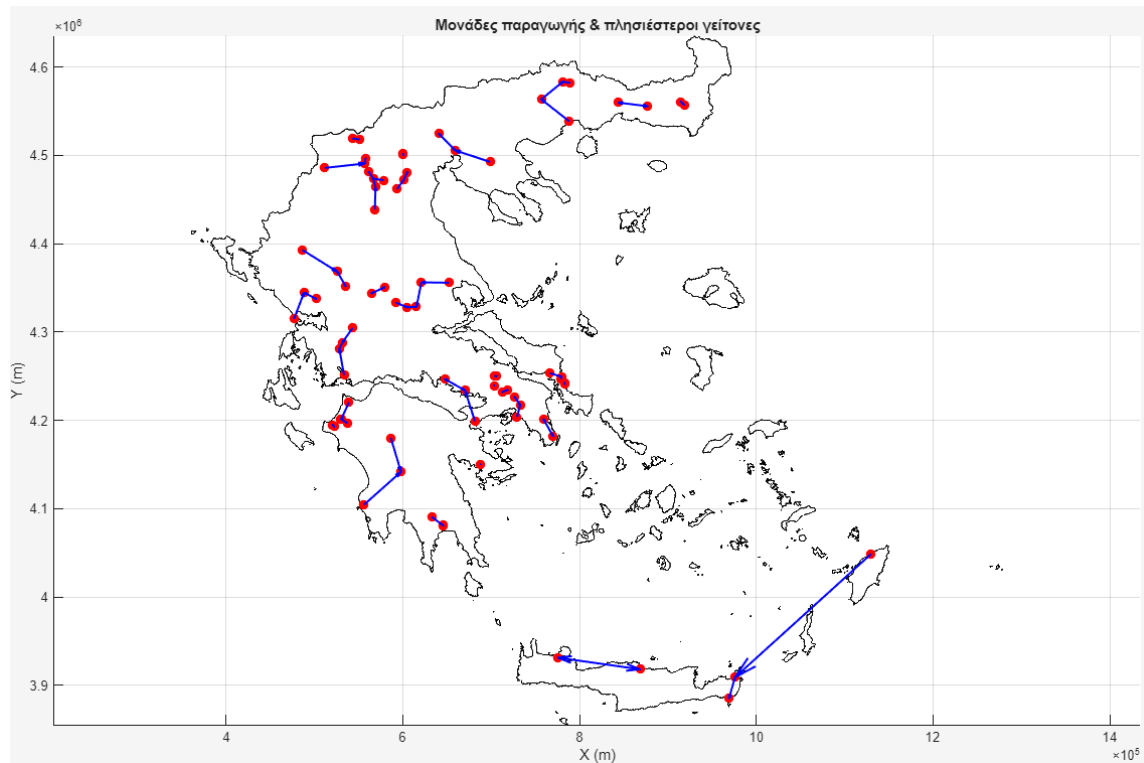
Εικόνα 4.10. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R πυρηνικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής Ελβετίας (4 σημεία).

4.2.2. Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα

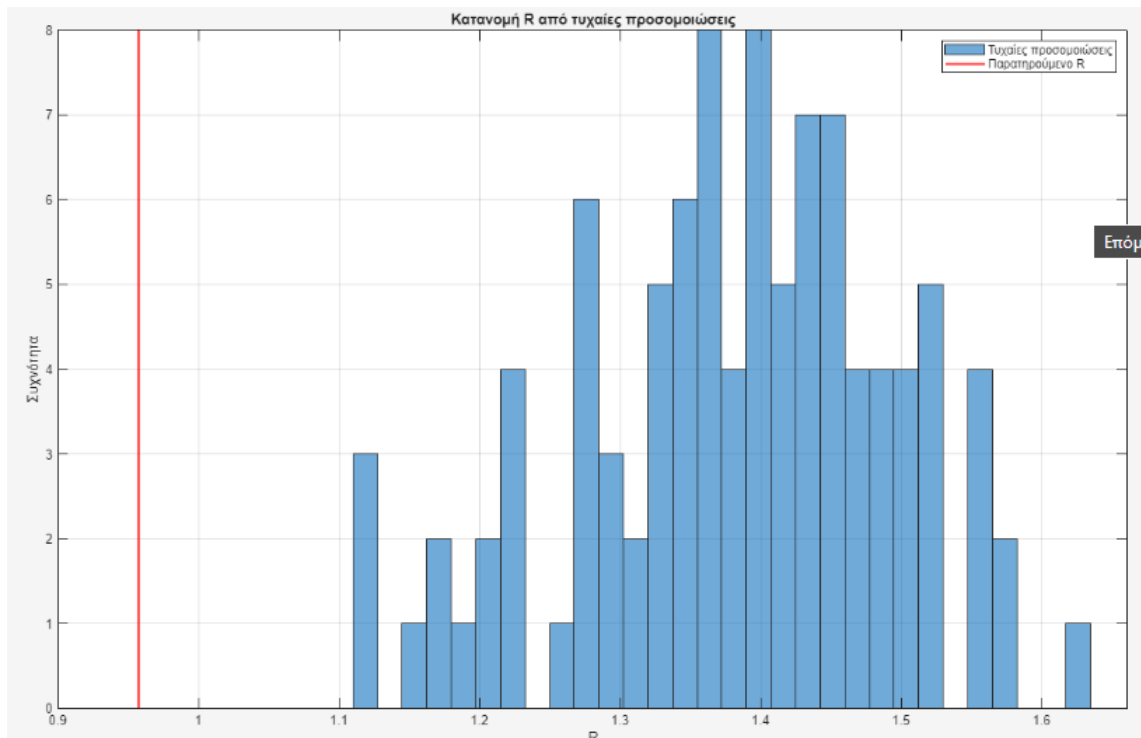
Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν παρόμοια προγράμματα και για την Ελλάδα. Στο πρώτο πρόγραμμα, όπως προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε το πλήρες σύνολο δεδομένων που αφορά μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 2 MW. Το δεύτερο, βασίστηκε σε ομαδοποίηση των μονάδων ανά κατηγορία παραγωγής (όπως έγινε και στο τρίτο για την Ελβετία) — ορυκτά καύσιμα, ελεγχόμενες ανανεώσιμες (υδροηλεκτρικές και αποβλήτων) και μεταβλητές ανανεώσιμες (ηλιακές και αιολικές) ώστε να διερευνηθεί η χωρική διάταξη κάθε υποομάδας ξεχωριστά.

Η Εικόνα 4.11 ανήκει στο πρώτο πρόγραμμα, όπου για 82 σημεία η τιμή του δείκτη οριακά προσεγγίζει την μονάδα με τιμή 0.96. Δεδομένου ότι η τιμή του δείκτη είναι μικρότερη της μονάδας, υποδηλώνεται θεωρητικά η ύπαρξη χωρικής συσσώρευσης. Ωστόσο, η εγγύτητα της τιμής αυτής προς το 1 επιτρέπει τον ισχυρισμό ότι ίσως, στην πράξη, τα σημεία δεν παρουσιάζουν σαφές χωρικό πρότυπο και, ως εκ τούτου, η κατανομή μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυχαία. Ιδίως σε τέτοιες περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο, καθώς συμβάλλουν στον καθορισμό ρεαλιστικών κατωφλίων γύρω από τη μονάδα, παρέχοντας μια σαφέστερη εικόνα για τη σύγκριση και αποτρέποντας την υιοθέτηση γενικεύσεων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανακριβή συμπεράσματα. Στην προκειμένη περίπτωση, η εκτέλεση των προσομοιώσεων κατέστησε σαφή την

κατηγοριοποίηση της τιμής ως ένδειξη συσσώρευσης, όπως αποτυπώνεται και στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.12). Η τιμή του δείκτη εντοπίζεται πριν από το εύρος τιμών που προέκυψε κατά τις τυχαίες προσομοιώσεις, γεγονός που ενισχύει την ερμηνεία περί χωρικής συσσώρευσης. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 1.11, και μέγιστη 1.6328, επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα είναι μικρότερη από το διάστημα 90% εμπιστοσύνης : [1.18, 1.55]. Η μέση παρατηρούμενη απόσταση που καταγράφηκε είναι στα 19.25 χλμ., ενώ η αναμενόμενη απόσταση 20.10 χλμ.



Εικόνα 4.11. Nearest Neighbor για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 2 MW Ελλάδας.



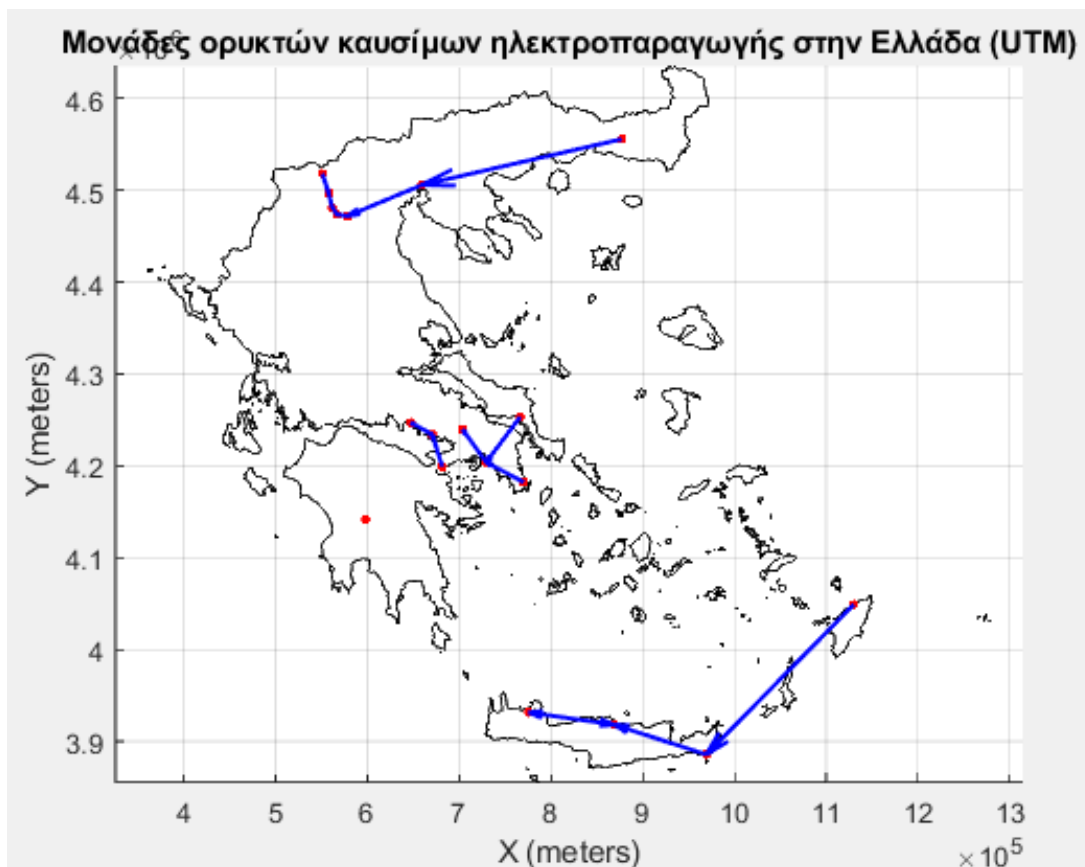
Εικόνα 4.12. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R Ελλάδας (82 σημεία)

Το δεύτερο πρόγραμμα εκτελέστηκε 3 φορές (μία για κάθε κατηγορία που επιλέγεται σύμφωνα με την βούληση του χρήστη). Τα αποτελέσματα της πρώτης εκτέλεσης, για την κατηγορία των 21 μονάδων ορυκτών καυσίμων (Εικόνα 4.13) υπέδειξαν αρχικά κατανομή περισσότερο ομοιόμορφη από την τυχαία, με τον δείκτη να λαμβάνει τιμή 1.37. Ωστόσο, η εκτέλεση των προσομοιώσεων τοποθέτησε την εν λόγω τιμή εντός του εύρους των προσομοιωμένων τιμών, όπως αποτυπώνεται και στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.14). Το γεγονός αυτό αναιρεί τον αρχικό ισχυρισμό περί ομοιόμορφης κατανομής και ενισχύει την ερμηνεία ότι η χωρική διάταξη των σημείων αντιστοιχεί σε τυχαία κατανομή. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.94, και μέγιστη 2.31, επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα βρίσκεται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης 90% : [1.02, 1.99]. Οι τιμές της μέσης παρατηρούμενης απόστασης και της αναμενόμενης απόστασης είναι στα 5.45 χλμ. και 3.97 χλμ. αντίστοιχα.

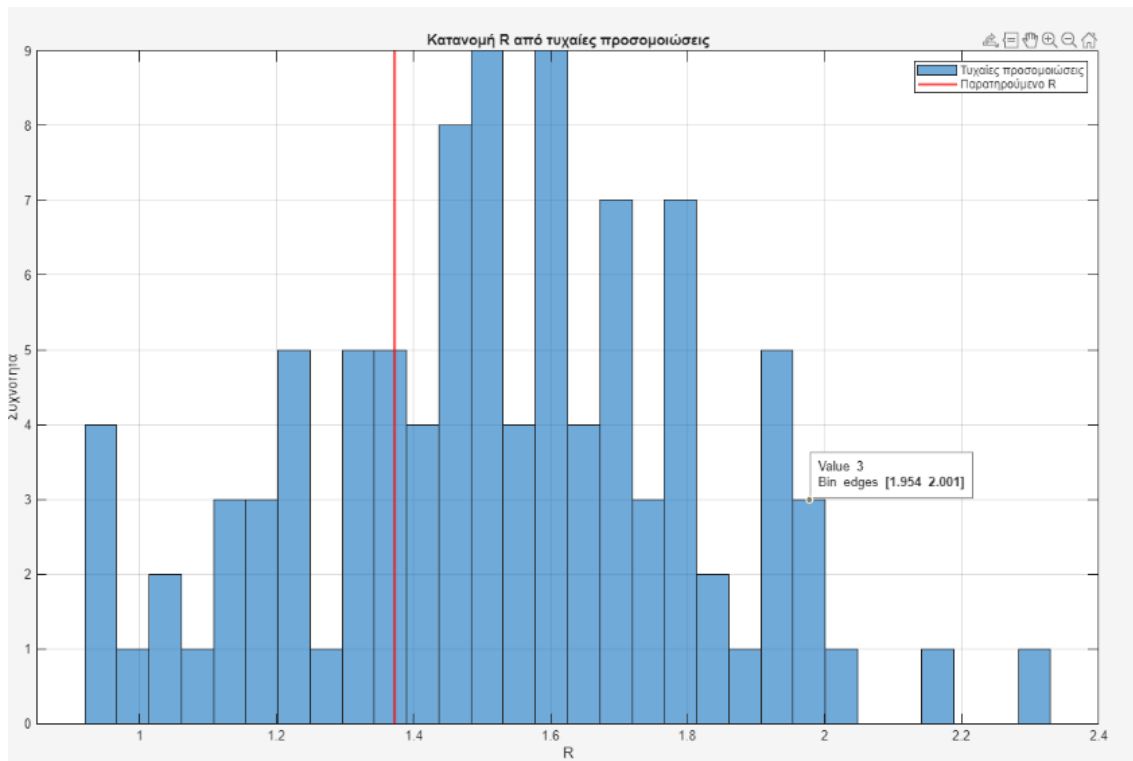
Στην Εικόνα 4.15, παρουσιάζονται οι ελεγχόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με συνολικό αριθμό μονάδων 19. Η τιμή του δείκτη υπολογίστηκε σε 0.76, γεγονός που υποδηλώνει συσσωρευμένη χωρική κατανομή, η οποία παρατηρείται σαφώς συγκεντρωμένη στην ηπειρωτική Ελλάδα. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τις προσομοιώσεις (Εικόνα 4.16), όπου η τιμή του δείκτη εντοπίζεται πριν από το εύρος τιμών που προέκυψε για την τυχαία κατανομή. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη μέσω των προσομοιώσεων είναι 0.98, ενώ η μέγιστη 2.66 συνεπώς, η τιμή που προέκυψε για τα πραγματικά δεδομένα είναι μικρότερη από το διάστημα εμπιστοσύνης 90%: [1.10, 2.12]. Σε αυτή

την περίπτωση οι τιμές της μέσης παρατηρούμενης απόστασης και της αναμενόμενης απόστασης είναι στα 3.19 χλμ. και 4.18 χλμ. αντίστοιχα.

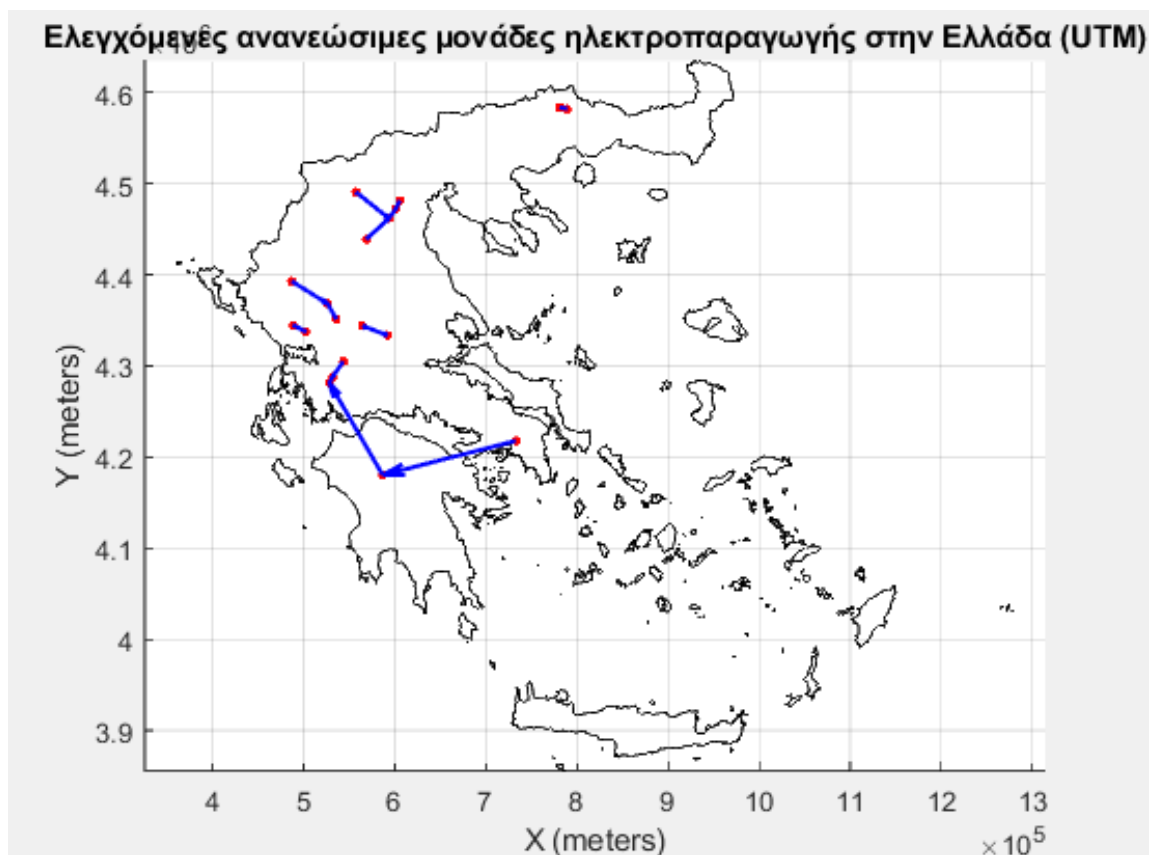
Τέλος, στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζονται οι μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με συνολικό αριθμό μονάδων 42. Η τιμή του δείκτη υπολογίστηκε σε 1.02, γεγονός που αρχικά θα μπορούσε να υποδηλώνει κατανομή περισσότερο ομοιόμορφη από την τυχαία. Ωστόσο, η εκτέλεση των προσομοιώσεων τροποποίησε την κατηγοριοποίηση αυτή, καθώς τοποθέτησε την εν λόγω τιμή πριν από το εύρος των προσομοιωμένων τιμών, όπως αποτυπώνεται και στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.18). Το γεγονός αυτό αναιρεί τον αρχικό ισχυρισμό περί ομοιόμορφης κατανομής και την αναταξινομεί ως συσσωρευμένη κατανομή. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.94, και μέγιστη 1.92, επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα βρίσκεται πριν του διαστήματος εμπιστοσύνης 90% : [1.17, 1.78]. Οι τιμές της μέσης παρατηρούμενης απόστασης και της αναμενόμενης απόστασης είναι στα 2.88 χλμ. και 2,80 χλμ. αντίστοιχα.



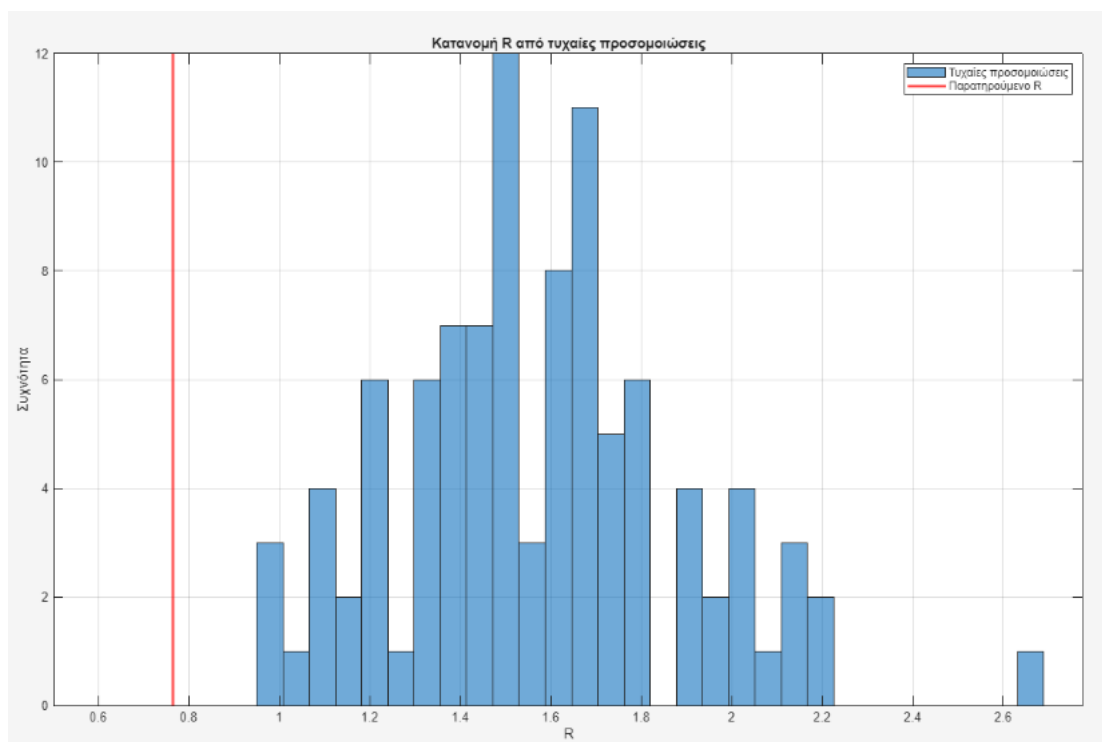
Εικόνα 4.13. Nearest Neighbor για μονάδες ορυκτών καυσίμων Ελλάδας.



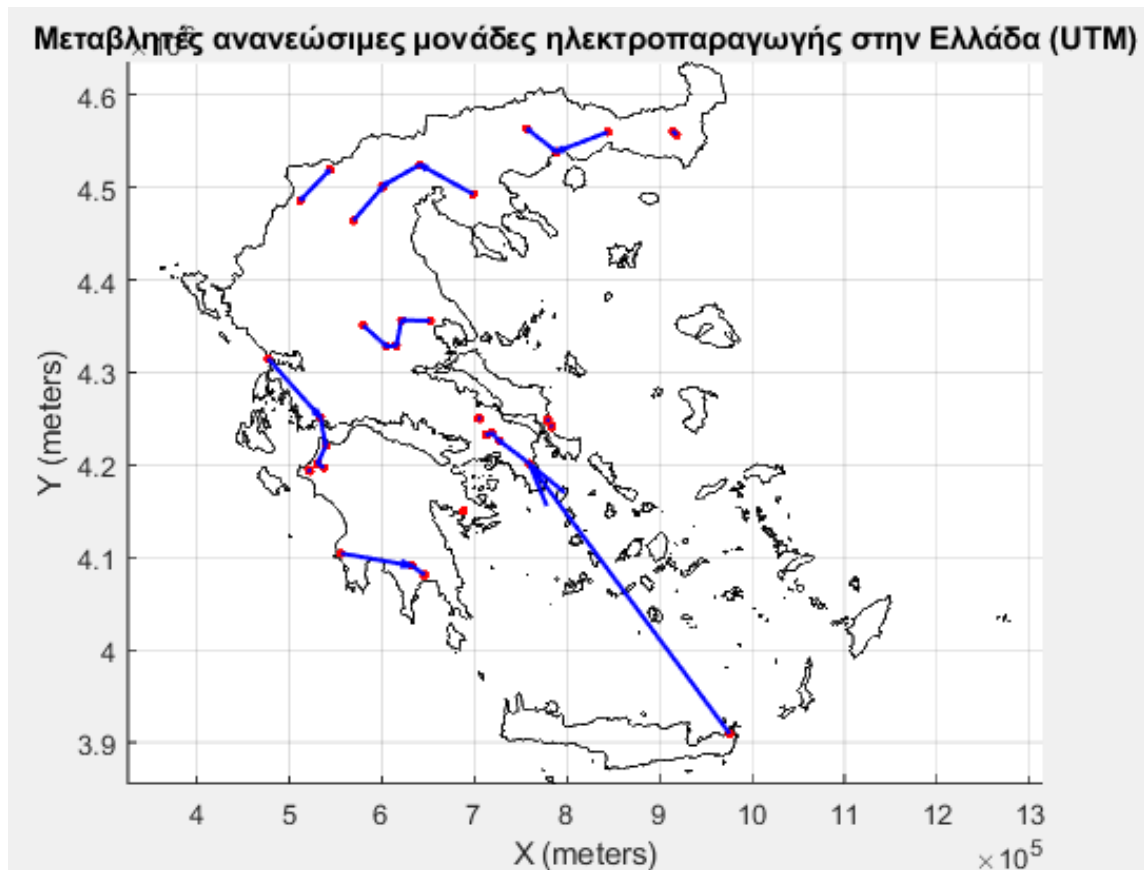
Εικόνα 4.14. Ιστογράμμο προσομοιώσεων για δείκτη R Ελλάδας των μονάδων ορυκτών καυσίμων (21 σημεία)



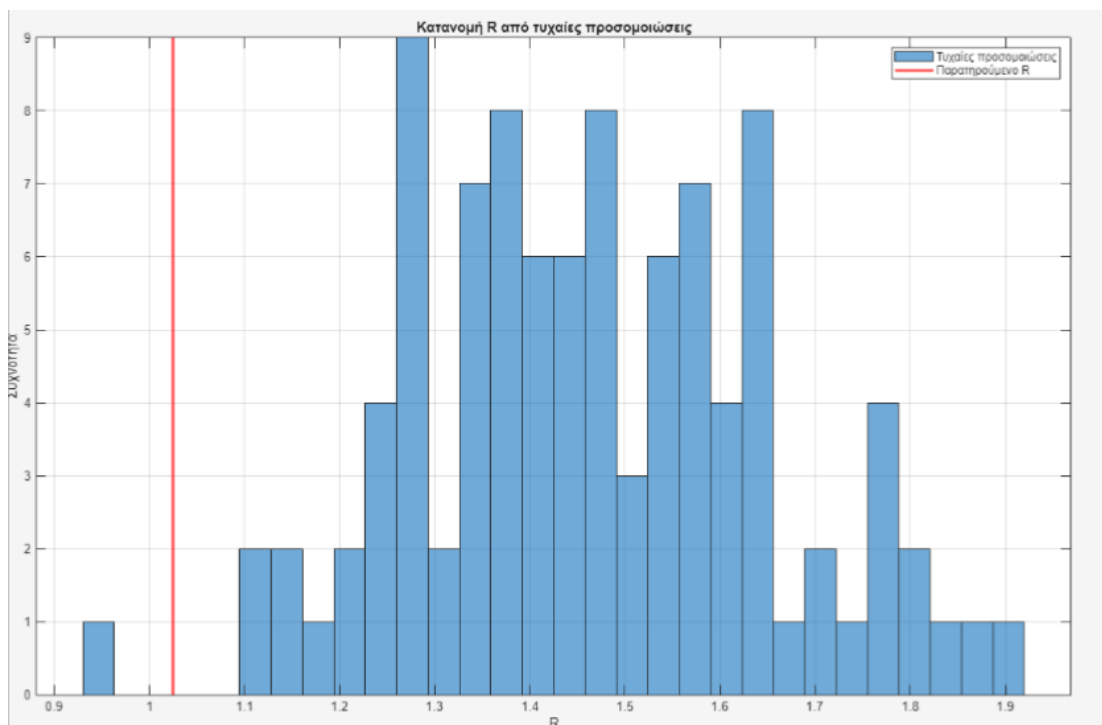
Εικόνα 4.15. Nearest Neighbor για ελεγχόμενες ανανεώσιμες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Ελλάδας.



Εικόνα 4.16. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R Ελλάδας των ελεγχόμενων ανανεώσιμων μονάδων (19 σημεία)



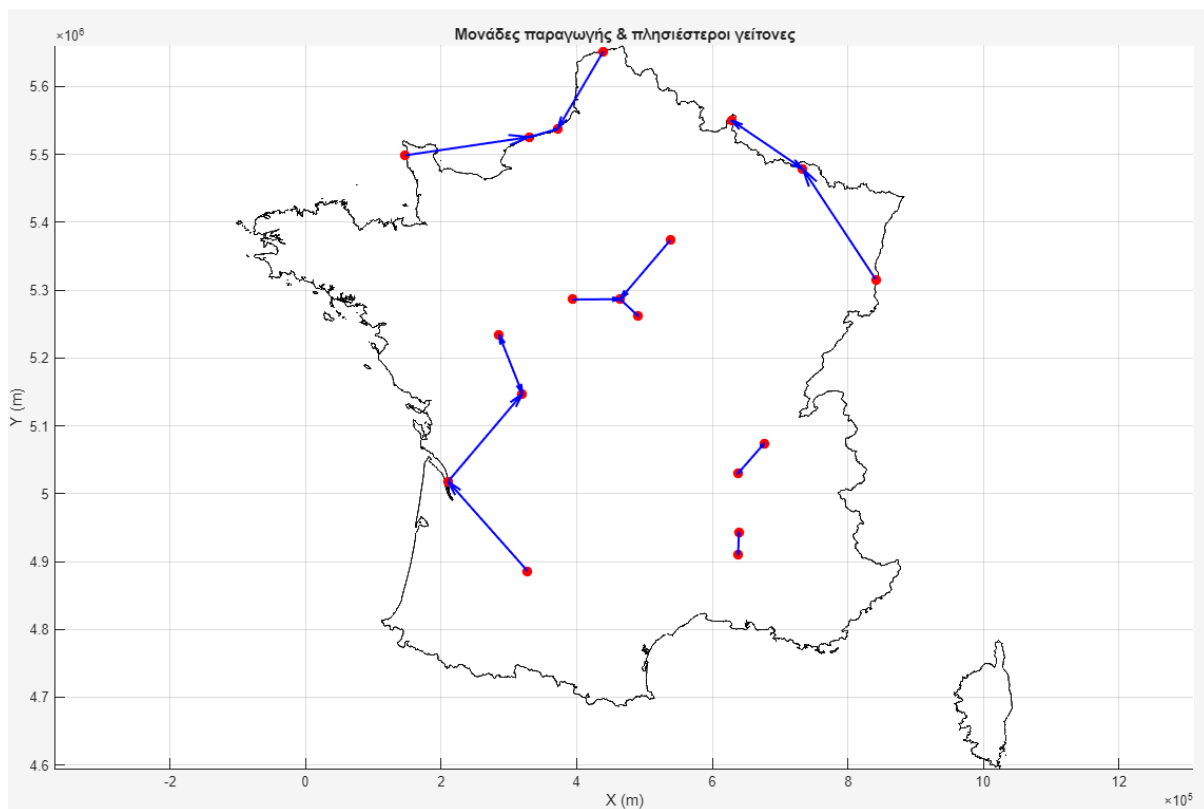
Εικόνα 4.17. Nearest Neighbor για μεταβλητές ανανεώσιμες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Ελλάδας.



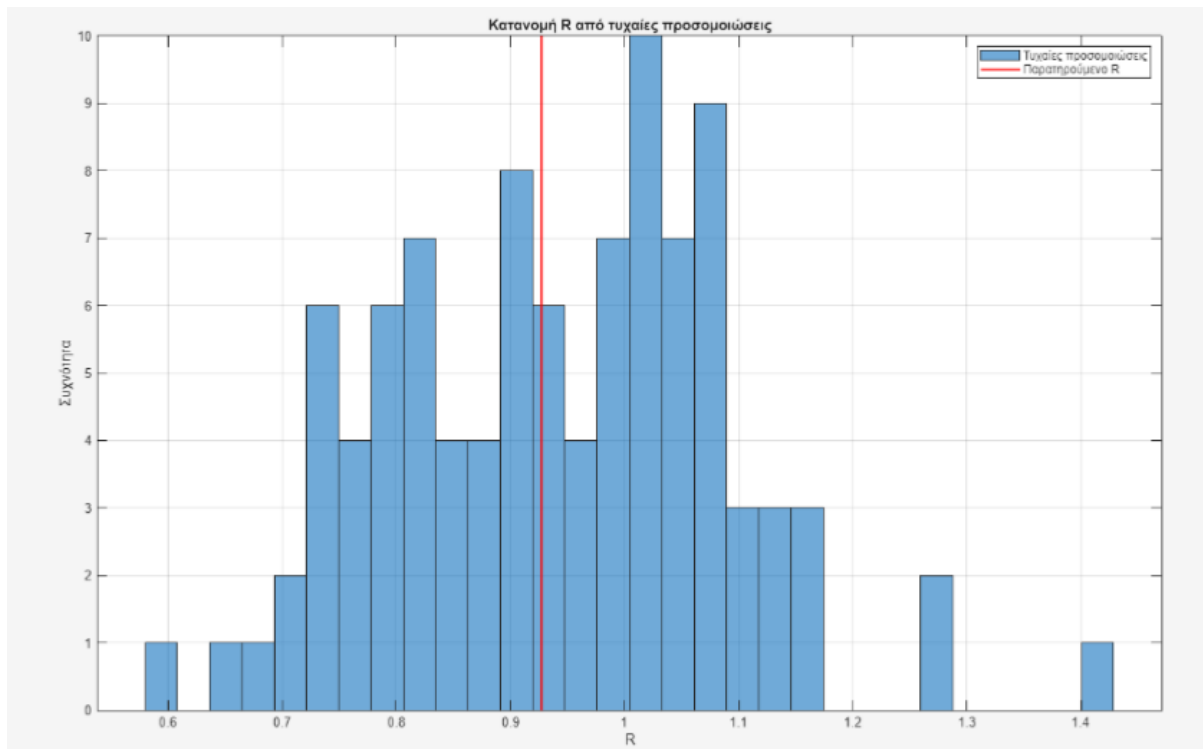
Εικόνα 4.18. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R Ελλάδας των μεταβλητών ανανεώσιμων μονάδων (42 σημεία)

4.2.3. Μελέτη περίπτωσης: Γαλλία

Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 19 πυρηνικές εγκαταστάσεις όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 4.19. Η τιμή του δείκτη για τις εν λόγω μονάδες είναι 0.9274, γεγονός που θεωρητικά υποδηλώνει συσταδοποίηση εφόσον είναι μικρότερη της μονάδας. Ωστόσο, η εγγύτητα της τιμής αυτής προς τη μονάδα οδηγεί στο εναλλακτικό συμπέρασμα χαρακτηρισμού ως χωρικά τυχαία, λαμβάνοντας υπόψη το περιθώριο στατιστικής αβεβαιότητας. Το ενδεχόμενο αυτό επιβεβαιώνεται από τις προσομοιώσεις (Εικόνα 4.20), όπου είναι εμφανής η τοποθέτηση της πραγματικής τιμής του δείκτη (κόκκινη γραμμή), ανάμεσα σε αυτές των προσομοιωμένων τιμών. Η ελάχιστη τιμή του δείκτη R που υπολογίστηκε είναι 0.60, και μέγιστη 1.43, επομένως η τιμή για τα πραγματικά δεδομένα βρίσκεται πριν του διαστήματος εμπιστοσύνης 90% : [0.71, 1.15]. Οι τιμές για τη μέση παρατηρούμενη απόσταση και την αναμενόμενη απόσταση είναι 96.38 χλμ. και 103.92 χλμ. αντίστοιχα.



Εικόνα 4.19. Nearest Neighbor για πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής Γαλλίας.



Εικόνα 4.20. Ιστόγραμμα προσομοιώσεων για δείκτη R Γαλλίας (19 σημεία)

4.3. Εφαρμογή του δείκτη Ripley's K

Αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά του δείκτη Ripley's K σε απλοποιημένα πιλοτικά παραδείγματα, χρησιμοποιώντας δοκιμαστικά δεδομένα, και στην συνέχεια το επόμενο βήμα αφορά στην εφαρμογή του σε πραγματικά γεωχωρικά δεδομένα, με σκοπό την αξιολόγηση χωρικών προτύπων κατανομής σε επίπεδο κρατών.

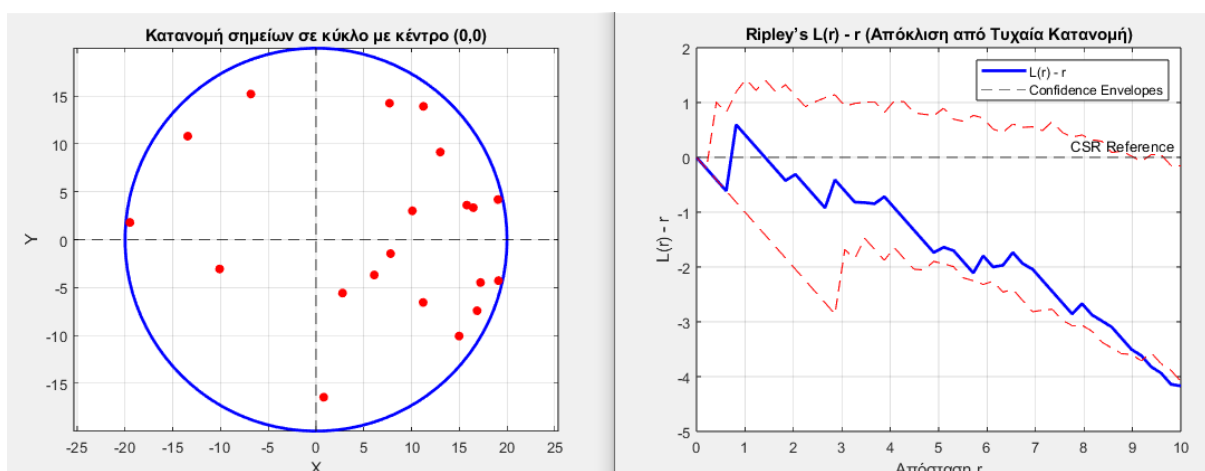
Ειδικά για τα πραγματικά δεδομένα χωρών, σε αρχικό στάδιο, η ανάλυση εκτελέστηκε χωρίς εφαρμογή edge correction. Η επιλογή αυτή εξυπηρετεί την συγκριτική αξιολόγηση τους έναντι των επόμενων εκτελέσεων, όπου εκεί εφαρμόζονται διορθώσεις ορίων, και καθιστούν εμφανή την ανάγκη ύπαρξής τους, για την παραγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, γίνεται δυνατή η παρουσίαση της εικόνας των confidence envelopes (έστω και χωρίς edge correction), μιας και αποδείχθηκε αδύνατο να παραχθούν με σωστή διόρθωση ορίων, λόγω του σημαντικού υπολογιστικού φορτίου που απαιτείται για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Για την διευκόλυνση στον διαχωρισμό τους, θα ονομαστούν γραφήματα «Τύπου 1», αυτά που διαθέτουν confidence envelopes αλλά όχι edge correction ενώ γραφήματα «Τύπου 2» θα είναι αυτά στα οποία θα ισχύει το αντίστροφο, δηλαδή δεν διαθέτουν confidence envelopes αλλά θα πραγματοποιούν edge correction.

Η αξιολόγηση της κατανομής στα «Τύπου 2», περιορίζεται στην παρατήρηση της μορφής της συνάρτησης $L(r) - r$. Η απόκλιση της από τη γραμμή μηδέν ερμηνεύεται ως ένδειξη συσσώρευσης (όταν οι τιμές είναι θετικές) ή αποφυγής (όταν είναι αρνητικές), με σημείο αναφοράς την πλήρη χωρική τυχαιότητα (CSR – Complete Spatial Randomness), όπου θεωρητικά $L(r) = r$. Τέλος, μια επιπλέον διαφορά μεταξύ των δύο τύπων, είναι ότι στο «Τύπου 1» είναι σταθερές οι τιμές $\max_r=100000$ (100 χλμ. η μέγιστη ακτίνα r) και $\text{num_r}=50$ (50 ισαπέχοντα βήματα για τις ακτίνες μέχρι να φτάσει στα 100 χλμ. όπου κάθε μια από τις 50 τιμές είναι μια ακτίνα r στην οποία υπολογίζεται) ανεξαρτήτου χώρας. Διαφορετικά στο «Τύπου 2», η κάθε χώρα έχει διαφορετικό \max_r (143.7 χλμ. για Ελβετία, 257 χλμ. για Ελλάδα και 524.2 χλμ. για Γαλλία) αλλά ίδιο num_r (125), όπως εξηγήθηκε και στην Ενότητα 3.3.3.

4.3.1. Αρχική πειραματική υλοποίηση, δοκιμαστικά δεδομένα

Για αρχικούς σκοπούς πειραματισμού με την εφαρμογή του δείκτη Ripley's K, αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον MATLAB μικρής κλίμακας δοκιμαστικά προγράμματα, με στόχο την υλοποίηση της Εξίσωσης 11 με ενσωματωμένη διόρθωση ορίων (edge correction), καθώς και την εκτέλεση 99 προσομοιώσεων για τον υπολογισμό των διαστημάτων εμπιστοσύνης (confidence envelopes).

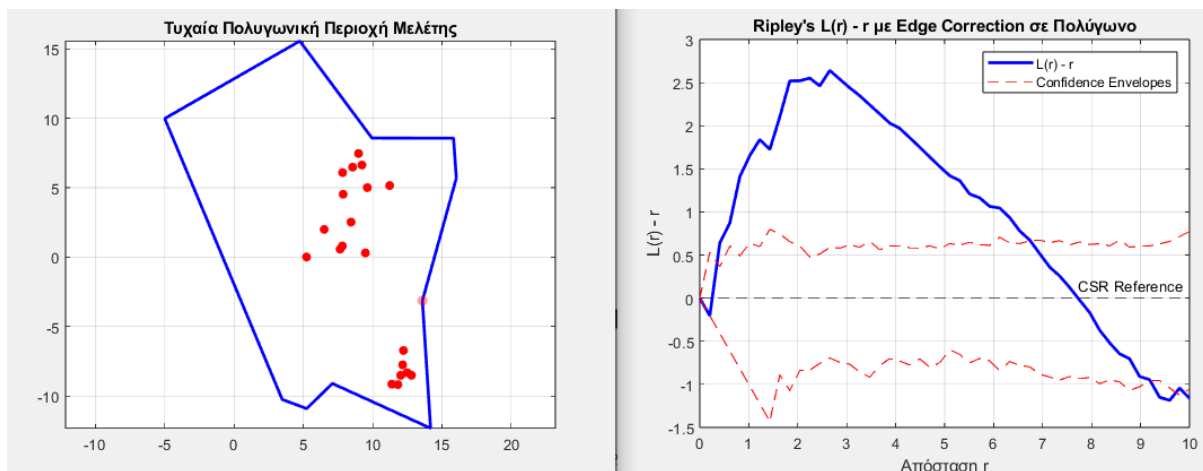
Το πρώτο από τα προγράμματα αφορά σε περιοχή μελέτης κυκλικής μορφής, στην οποία ορίζεται ακτίνα (ενδεικτικά 20 μονάδες), κέντρο (0,0) ώστε να επιτρέπεται η κατανομή σημείων σε όλες τα τεταρτημόρια), αριθμός σημείων (π.χ. 20) και τύπος χωρικής κατανομής. Ο τελευταίος μπορεί να επιλεγεί δυναμικά από τον χρήστη μεταξύ συσσωρευμένης, ομοιόμορφης ή πλήρως τυχαιάς κατανομής, με δυνατότητα ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης της σχετικής επιλογής κατά βούληση.



Εικόνα 4.21. Παράδειγμα αποτελεσμάτων με ενεργοποιημένη την τυχαιά ομοιόμορφη κατανομή.

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.21, το αριστερό διάγραμμα απεικονίζει τον κύκλο που σχεδιάστηκε από το πρόγραμμα, και τα 20 σημεία με τυχαία τοποθέτηση μέσα σε αυτόν. Στο δεξί διάγραμμα, αποτυπώνεται η τιμή $L(t_s) - t_s$ (μπλε γραμμή) σε σχέση με την ακτίνα t_s (να σημειωθεί ότι όπου $r = t_s$). Αφού η γραμμή βρίσκεται εντός των κόκκινων περιθωρίων εμπιστοσύνης, δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική απόκλιση από την πλήρη τυχαία κατανομή (CSR) για όλες σχεδόν τις τιμές t_s , με εξαίρεση το διάστημα $r = [9,10]$, όπου ξεφεύγει ελάχιστα κάτω από όρια υποδεικνύοντας μια τάση για απώθηση αλλά όχι επαρκώς έντονη ώστε να είναι στατιστικά σημαντική.

Το δεύτερο πρόγραμμα διαφοροποιείται ως προς τη γεωμετρία της περιοχής μελέτης, η οποία πλέον δεν είναι κυκλική, αλλά πολυγωνική, με αριθμό πλευρών που κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10. Το πολύγωνο δεν απαιτείται να είναι κυρτό, στοιχείο που αντανακλά ρεαλιστικότερα τις γεωγραφικές ιδιομορφίες, καθώς τα εθνικά σύνορα σπανίως παρουσιάζουν πλήρη κυρτότητα. Εντός της πολυγωνικής περιοχής παράγονται 20 σημεία, με δυνατότητα επιλογής τύπου χωρικής κατανομής (συσσωρευμένη, ομοιόμορφη ή τυχαία), όπως και στο προηγούμενο πρόγραμμα. Η επιλογή της κατανομής παραμένει παραμετρικά ελεγχόμενη από τον χρήστη, επιτρέποντας ευελιξία στους πειραματισμούς.



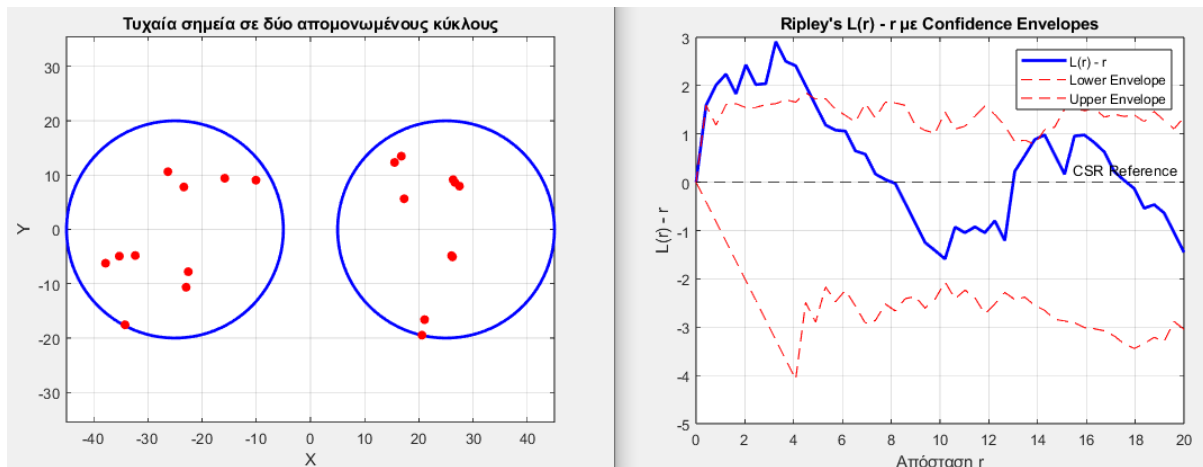
Εικόνα 4.22. Παράδειγμα αποτελεσμάτων με επιλεγμένη κατανομή την συσταδοποίηση.

Στην Εικόνα 4.22, το αριστερό διάγραμμα παρουσιάζει μία τυχαία πολυγωνική περιοχή με μπλε περίγραμμα, εντός της οποίας εμφανίζονται σημειακά δεδομένα (κόκκινοι κύκλοι). Είναι εμφανής η επιλογή του χρήστη για συσταδοποιημένη διαμόρφωση καθώς υπάρχουν δύο συστάδες σημείων: μία στο κεντρικό τμήμα του πολυγώνου και μία μικρότερη στο κάτω αριστερό. Το δεξί διάγραμμα απεικονίζει την τιμή $L(r) - r$ όπως και στην Εικόνα 4.21, μόνο που παρουσιάζει θετικές τιμές για αποστάσεις από 0 έως περίπου 7.5 μονάδες, ξεπερνώντας καθαρά τα ανώτερα όρια εμπιστοσύνης,

φτάνοντας σε μέγιστη τιμή (περίπου 2,5) για ακτίνα κοντά στο $r \approx 2,6$. Για τιμές μεγαλύτερες του $r > 7,5$ η καμπύλη παίρνει αρνητικές τιμές αλλά τείνει εντός των ορίων.

Η ισχυρή θετική απόκλιση της συνάρτησης από το CSR στο διάστημα αποστάσεων 1–6 μονάδων υποδηλώνει στατιστικά σημαντική συσταδοποίηση σημείων, δηλαδή παρουσία σημειακών ομάδων σε κοντινές αποστάσεις. Αντίθετα σε μεγαλύτερες αποστάσεις (άνω των 7 μονάδων) δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση από το μοντέλο της τυχαίας κατανομής. Αυτό δείχνει ότι η συσταδοποίηση είναι τοπικού χαρακτήρα και δεν επεκτείνεται σε όλη την περιοχή μελέτης.

Αναπτύχθηκε επιπλέον ένα βοηθητικό πρόγραμμα με σκοπό τη διερεύνηση της ικανότητας του δείκτη Ripley's K να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις σύνθετων γεωμετριών, όπου η περιοχή μελέτης αποτελείται από δύο ή περισσότερες διακριτές υποπεριοχές. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα δημιουργεί δύο κυκλικές περιοχές (π.χ. μερικώς απομακρυσμένες μεταξύ τους) και τοποθετεί συνολικά 20 σημεία εντός αυτών. Η αντιμετώπιση της ενιαίας ανάλυσης των δύο κύκλων —παρά το κενό που τους διαχωρίζει— προσομοιώνει περιπτώσεις γεωγραφικής ασυνέχειας, όπως π.χ. νησιωτικές περιοχές της ίδιας επικράτειας.



Εικόνα 4.23. Παράδειγμα για κατανομή σημείων σε δύο απομονωμένους κύκλους.

Στην Εικόνα 4.23, αριστερά απεικονίζονται δυο απομονωμένοι κύκλοι εντός των οποίων βρίσκονται ισάριθμες ομάδες σημείων. Οι δύο κύκλοι είναι χωρικά διαχωρισμένοι κατά τρόπο που αποκλείει την ύπαρξη εγγύτητας μεταξύ σημείων των δύο περιοχών. Στα δεξιά, η μπλε γραμμή αν και κάνει στην αρχή μια απότομη θετική άνοδο έχει τόσο αρνητικές όσο και θετικές τιμές καθώς φαίνεται να κυμαίνεται εντός των περιθωρίων.

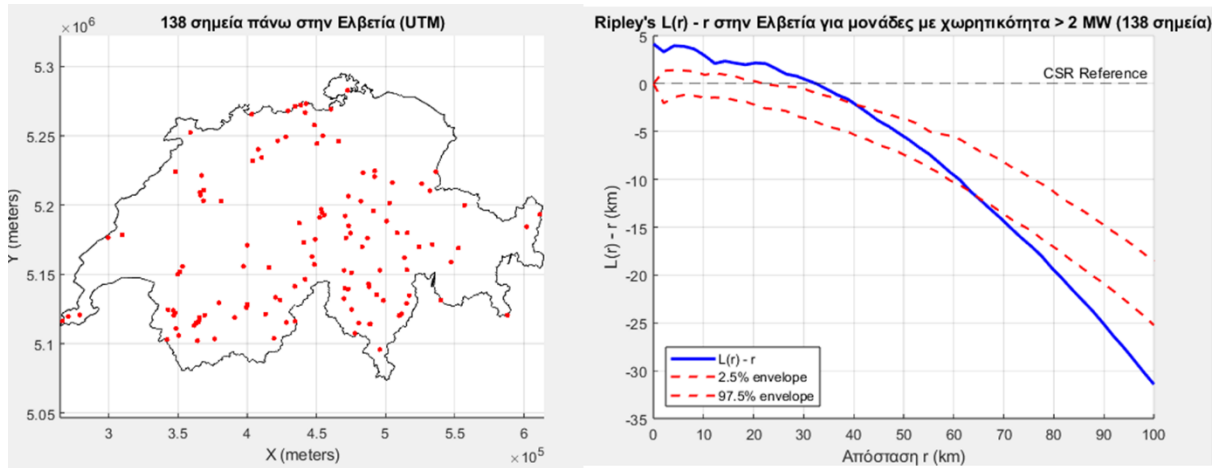
4.3.2. Μελέτη περίπτωσης: Ελβετία

Αρχικά, η ανάλυση επικεντρώνεται στην περίπτωση της Ελβετίας, με στόχο την εξέταση των διαφοροποιήσεων στη συμπεριφορά του δείκτη ανάλογα με το εκάστοτε σύνολο δεδομένων που εφαρμόζεται.

Η Εικόνα 4.24 αποτελείται από δύο τμήματα· αριστερά, η παρουσίαση της γεωγραφικής θέσης των σημείων εντός των συνόρων, και δεξιά, το γράφημα «Τύπου 1» της συνάρτησης $L(r) - r$ που αντιστοιχεί στην ίδια κατανομή. Στην απεικόνιση της Ελβετίας (αριστερά), τα 138 κόκκινα σημεία αντιπροσωπεύουν τις όλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής της χώρας (συγκεκριμένα αυτές με χωρητικότητα μεγαλύτερη των 2 MW). Οι άξονες δεν ξεκινούν από το μηδέν, καθώς τα δεδομένα εκφράζονται σε συντεταγμένες UTM (Universal Transverse Mercator) της ζώνης 32T, στην οποία ανήκει η χώρα, όπου το σημείο αρχής ορίζεται από τις παραμέτρους *false easting* και *false northing* της προβολής. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές X και Y αντιπροσωπεύουν αποστάσεις σε μέτρα από αυτό το προκαθορισμένο σημείο, οδηγώντας σε τιμές της τάξης εκατοντάδων χιλιάδων έως και εκατομμυρίων μέτρων.

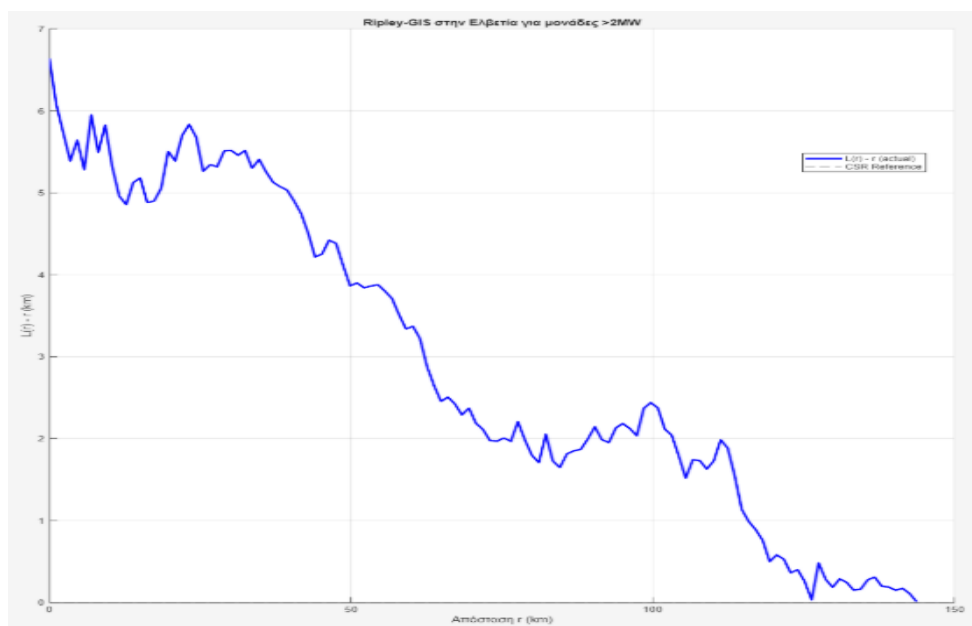
Στο διάγραμμα (δεξιά), η μπλε συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει τις τιμές του $L(r) - r$ σε συνάρτηση με την απόσταση r (km). Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αποτελούν τα περιθώρια εμπιστοσύνης (confidence envelopes) στο 2.5% και 97.5% αντίστοιχα, τα οποία προκύπτουν από προσομοιώσεις τυχαίας κατανομής (CSR). Η οριζόντια γκρι γραμμή στο μηδέν αντιστοιχεί στην αναμενόμενη τιμή υπό την υπόθεση πλήρους χωρικής τυχειότητας, όπως έχει ήδη αναλυθεί.

Η γενική καθοδική κλίση, καθώς αυξάνεται το r , τόσο της μπλε καμπύλης όσο κυρίως των envelopes, είναι ιδιαίτερα έντονη και οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχει εφαρμοστεί διόρθωση ορίων. Αυτό σημαίνει ότι για μεγάλες τιμές r , σημαντικό τμήμα των κυκλικών περιοχών αυτή της ακτίνας που εξετάζονται «βγαίνει» εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης, και δεν αντισταθμίζεται με κάποια μέθοδο, με αποτέλεσμα υποεκτίμηση των ζευγών σημείων και τεχνητή μείωση των τιμών του δείκτη.



Εικόνα 4.24. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για Ελβετία (138 σημείων).

Στο γράφημα «Τύπου 2» της Εικόνα 4.25 η μπλε συνεχής γραμμή απεικονίζει τις πραγματικές τιμές του δείκτη για διαφορετικές αποστάσεις r (χλμ.), ενώ η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή στο μηδέν εκφράζει την αναμενόμενη τιμή υπό την υπόθεση πλήρους χωρικής τυχαιότητας (CSR – Complete Spatial Randomness). Αντίθετα με το προηγούμενο γράφημα της Εικόνα 4.24, εδώ σε όλο το εύρος των αποστάσεων, οι τιμές παραμένουν θετικές, γεγονός που υποδηλώνει χωρική συσσώρευση των μονάδων. Παρατηρείται να είναι εντονότερη σε μικρές αποστάσεις (0–20 χλμ.), όπου οι τιμές φθάνουν έως και άνω των 6 χλμ., και σταδιακά να μειώνεται όσο αυξάνεται το r , μέχρι να προσεγγίσει το μηδενικό επίπεδο περίπου στα 150 χλμ. (143.7 χλμ.). Οι κυματισμοί που παρατηρούνται υποδηλώνουν την ύπαρξη τοπικών περιοχών με αυξημένη ή μειωμένη πυκνότητα σημείων, κάτι που συνδέεται με την ετερογένεια της γεωγραφικής διάταξης των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.



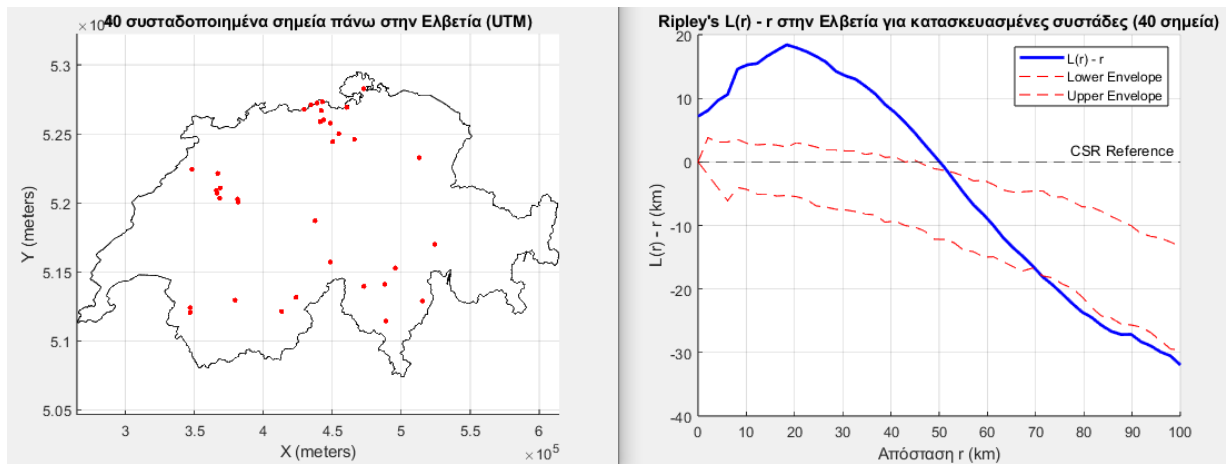
Εικόνα 4.25. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για Ελβετία (138 σημείων).

Στη συνέχεια ακολούθησε το πρόγραμμα στο οποίο για πειραματισμό της ανταπόκρισης της μεθόδου όταν είναι έντονες οι συστάδες, έγινε κατασκευή συστάδων με 40 συνολικών πραγματικών μονάδων, όμοια με αυτή της ενότητας 4.2.

Στην Εικόνα 4.26 αριστερά παρουσιάζεται ο χάρτης της Ελβετίας με τις τοποθεσίες των δυο συστάδων στα βόρεια και νοτιοδυτικά τμήματα της χώρας και των 40 σημείων (κόκκινα) που έχουν επιλεγεί από το σύνολο (των 138 μονάδων ηλεκτροπαραγωγής). Ομοίως με την Εικόνα 4.24, τα δεδομένα εκφράζονται σε συντεταγμένες UTM (Universal Transverse Mercator) της ζώνης 32T.

Η δεξιά απεικόνιση της Εικόνα 4.26 είναι γράφημα «Τύπου 1» και παρουσιάζει τη συνάρτηση $L(r) - r$ (μπλε συνεχής γραμμή) για τα ίδια 40 σημεία. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα ανώτερα και κατώτερα όρια (envelopes) που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις CSR ενώ η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή στο μηδέν αντιστοιχεί στην θεωρητική τιμή CSR, όπου $L(r) - r = 0$. Η καμπύλη ξεκινά από θετικές τιμές και κορυφώνεται περίπου στα 20 km, γεγονός που υποδηλώνει έντονη συσσώρευση σε μικρές αποστάσεις. Στη συνέχεια, η τιμή μειώνεται σταδιακά και διασταυρώνει τα όρια των envelopes κοντά στα 50 km, γεγονός που σηματοδοτεί τη στατιστική εξασθένηση του φαινομένου σε μεγαλύτερες κλίμακες απόστασης. Η έλλειψη edge correction είναι και σε αυτό το διάγραμμα αισθητή καθώς ακόμα και τα όρια των προσομοιώσεων έχουν κατηφορική κατεύθυνση μετά τα 30 χλμ., όπου η ακτίνα αυξάνεται και όλο μεγαλύτερα κομμάτια των κύκλων μένουν εκτός ορίων, χωρίς κάποια αντιστάθμιση.

Σε σύγκριση με το προηγούμενο διάγραμμα «Τύπου 1» για την Ελβετία, στο οποίο εξετάστηκαν 138 σημεία μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ισχύος άνω των 2 MW (Εικόνα 4.24), παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Το προηγούμενο δείγμα, λόγω του μεγαλύτερου αριθμού και της πιο εκτεταμένης γεωγραφικής διασποράς των σημείων, εμφάνιζε ηπιότερη θετική απόκλιση στις μικρές αποστάσεις και μικρότερη χρονική διάρκεια υπέρβασης του άνω ορίου των envelopes. Αντίθετα, το τρέχον παράδειγμα, με τα λιγότερα αλλά σκόπιμα συσσωρευμένα σημεία, παρουσιάζει εντονότερη και σαφέστερα στατιστικά τεκμηριωμένη συσταδοποίηση, η οποία εξασθενεί σταδιακά μετά τα 50 χλμ.

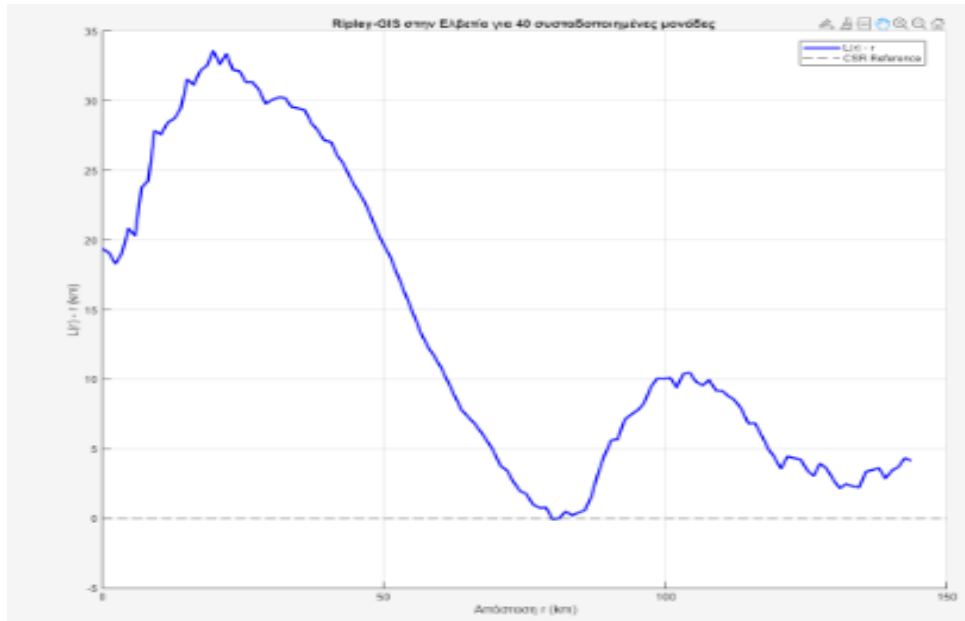


Εικόνα 4.26. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για Ελβετία (40 σημείων).

Ακολουθεί η Εικόνα 4.27, που παρουσιάζει το γράφημα «Τύπου 2» για τα συσταδοποιημένα 40 σημεία. Η καμπύλη παρουσιάζει πολύ υψηλές θετικές τιμές για μικρές αποστάσεις, με κορύφωση γύρω στα 30–35 χλμ., γεγονός που υποδηλώνει έντονη συσταδοποίηση σε αυτές τις κλίμακες. Στη συνέχεια, η καμπύλη αποκλίνει σταδιακά προς το μηδέν γύρω στα 90 χλμ., οπότε και η χωρική δομή προσεγγίζει την τυχαιότητα. Στις μεγαλύτερες αποστάσεις (100–120 χλμ.), εμφανίζεται μικρή εκ νέου θετική απόκλιση, πιθανώς λόγω δευτερογενών συγκεντρώσεων (συστάδων) σε ευρύτερη γεωγραφική κλίμακα.

Στην εκδοχή της Εικόνα 4.26 όπου υπάρχουν envelopes, η γενική μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια ειδικά στο αρχικό κομμάτι, ωστόσο τα περιθώρια εμπιστοσύνης επιτρέπουν τον στατιστικό έλεγχο της σημαντικότητας της συσταδοποίησης. Εκεί φαινόταν καθαρά ότι οι θετικές αποκλίσεις στις μικρές αποστάσεις υπερέβαιναν το άνω όριο, τεκμηριώνοντας τη στατιστική σημαντικότητα της συσσωρευτικής δομής. Το παρόν γράφημα (Εικόνα 4.27), με το να μη διαθέτει envelopes, δεν επιτρέπει την ίδια άμεση στατιστική τεκμηρίωση, αν και η έντονη θετική απόκλιση παραμένει αισθητή, και είναι ακόμα πιο καλά παρουσιασμένη καθώς εντοπίζεται και σε δεύτερο πακέτο αποστάσεων (100–120 χλμ.) το οποίο δεν έγινε αντιληπτό από το προηγούμενο «Τύπου 1» γράφημα.

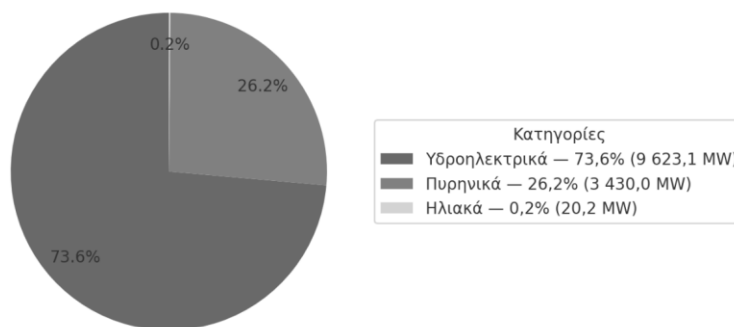
Σε σχέση με την περίπτωση των 138 σημείων, όπου η καμπύλη εμφάνιζε μικρότερες θετικές αποκλίσεις στις μικρές αποστάσεις και η συσσωρευση ήταν λιγότερο έντονη (Εικόνα 4.25), υπήρχε πιο γρήγορη σύγκλιση προς την τυχαιότητα. Σε αντίθεση, το τρέχον γράφημα, όπου το μικρότερο αλλά και συσσωρευμένο δείγμα, διατηρεί υψηλές θετικές τιμές για μεγαλύτερο εύρος αποστάσεων, αποτυπώνοντας πιο καθαρά την έντονη τοπική συγκέντρωση, όπως ήταν και ο στόχος αυτού του πειραματισμού.



Εικόνα 4.27. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για Ελβετία (40 σημείων).

Τα αποτελέσματα του επόμενου προγράμματος επικεντρώνονται στη διαφοροποίηση του δείκτη, κατόπιν διαχωρισμού των μονάδων παραγωγής σε επιμέρους κατηγορίες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.1, η Ελβετία διαθέτει εκατό τριάντα δύο (132) μονάδες ελεγχόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (υδροηλεκτρικά), τέσσερις (4) πυρηνικές μονάδες και δύο (2) μονάδες μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακά). Η τελευταία κατηγορία δεν κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθεί στην ανάλυση, καθώς το ιδιαίτερα μικρό μέγεθος του δείγματος (2 μονάδες) δεν επιτρέπει την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ουσιαστική ερευνητική αξία. Αντίστοιχα, η ίδια λογική θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στις τέσσερις πυρηνικές μονάδες· ωστόσο, κρίθηκε απαραίτητη η παρουσίασή τους, καθώς αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό της συνολικής ισχύος της χώρας, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 4.28.

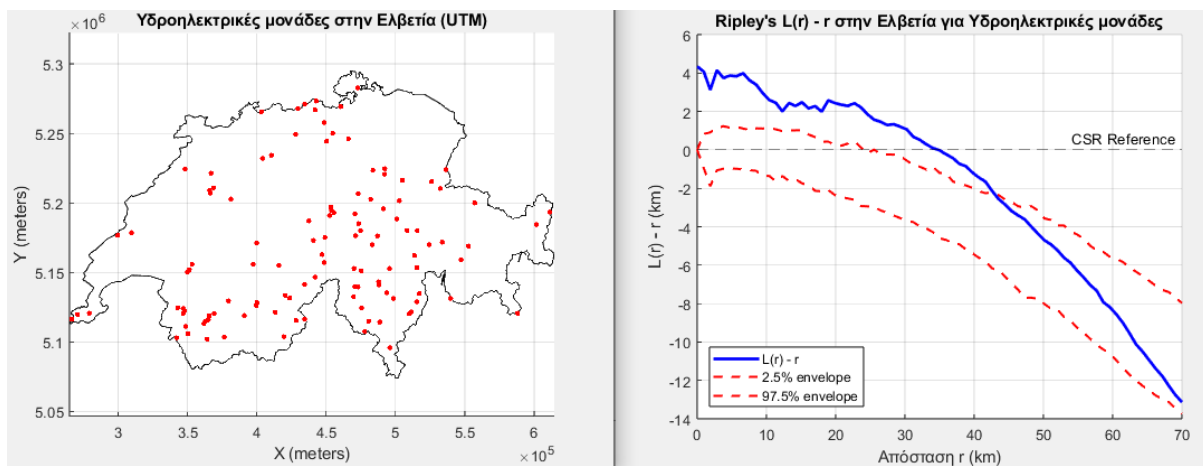
Κατανομή Ισχύος (MW) στην Ελβετία ανά Κατηγορία Μονάδων



Εικόνα 4.28. Κατανομή ισχύος (MW) στην Ελβετία ανά κατηγορία μονάδων.

Στην Εικόνα 4.29 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής στην Ελβετία (αριστερά) καθώς και την αντίστοιχη ανάλυση με τη συνάρτηση Ripley's $L(r) - r$ (δεξί γράφημα «Τύπου 1»).

Η καμπύλη των πραγματικών δεδομένων βρίσκεται, για μικρές αποστάσεις r , πάνω από το ανώτερο όριο εμπιστοσύνης, γεγονός που υποδηλώνει ύπαρξη ισχυρής συσσωμάτωσης των υδροηλεκτρικών μονάδων σε μικρή κλίμακα. Ωστόσο, καθώς το r αυξάνεται, η καμπύλη προσεγγίζει και τελικά υποχωρεί κάτω από το μηδενικό σημείο αναφοράς, ομοίως με τα envelopes, υποδηλώνοντας την υποεκτίμηση των ζευγών σημείων σε αυτές τις αποστάσεις λόγω έλλειψης εφαρμογής διόρθωσης οριακών φαινομένων.



Εικόνα 4.29. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής της Ελβετίας (132 σημείων).

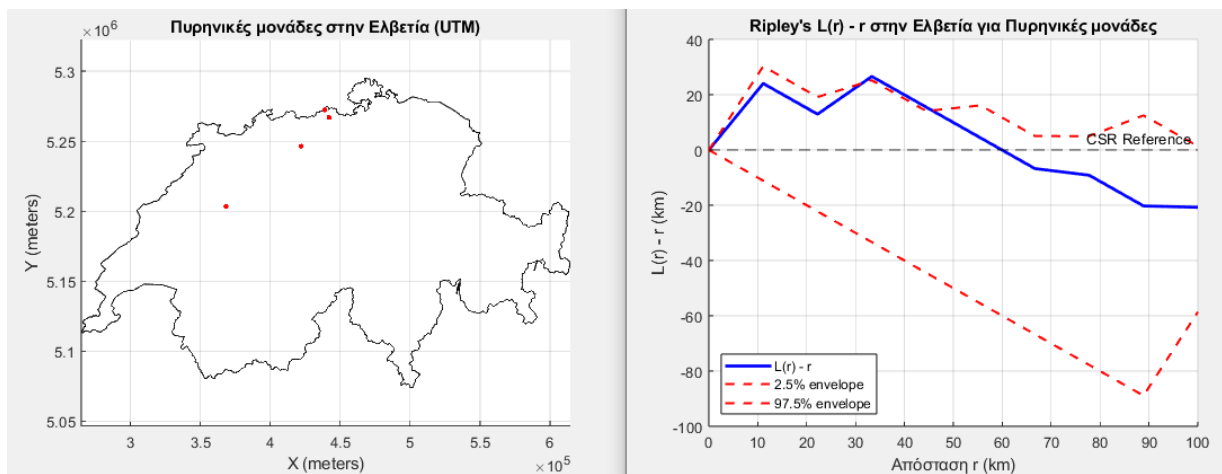
Στην Εικόνα 4.30 παρουσιάζεται η ίδια συνάρτηση σε γράφημα «Τύπου 2» με την καμπύλη να ξεκινά σε θετικές τιμές (>0) και μέγιστο λίγο κάτω από τα 7 χλμ. για τις πολύ μικρές αποστάσεις, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή συσσωμάτωση σε μικρή κλίμακα. Στη συνέχεια, παραμένει σταθερά θετική για μεσαίες αποστάσεις, αν και παρουσιάζει σταδιακή πτώση. Μετά τα ~100 χλμ., η καμπύλη πλησιάζει το μηδέν με πιο απότομη κλίση και στο τέλος εμφανίζεται ελαφρώς αρνητική, ένδειξη ότι σε μεγάλες αποστάσεις η κατανομή τείνει να είναι πιο ομοιόμορφη ή και αραιότερη από τυχαία.

Η εφαρμογή edge correction μειώνει την πιθανότητα μεροληψίας που εμφανίζεται όταν οι κύκλοι αναζήτησης σημείων εκτείνονται εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης επομένως αυτή είναι μια ρεαλιστική απεικόνιση του δείκτη σε αντίθεση με την Εικόνα 4.29 (δεξιά). Ωστόσο, η απουσία envelopes παραμένει ως πρόβλημα και περιορίζει τη δυνατότητα στατιστικού ελέγχου έναντι της τυχαίας κατανομής, οπότε η ερμηνεία βασίζεται αποκλειστικά στο σχήμα και τις τιμές της καμπύλης σε σχέση με τη θεωρητική αναφορά της CSR (δηλαδή το 0).



Εικόνα 4.30. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής της Ελβετίας (132 σημείων).

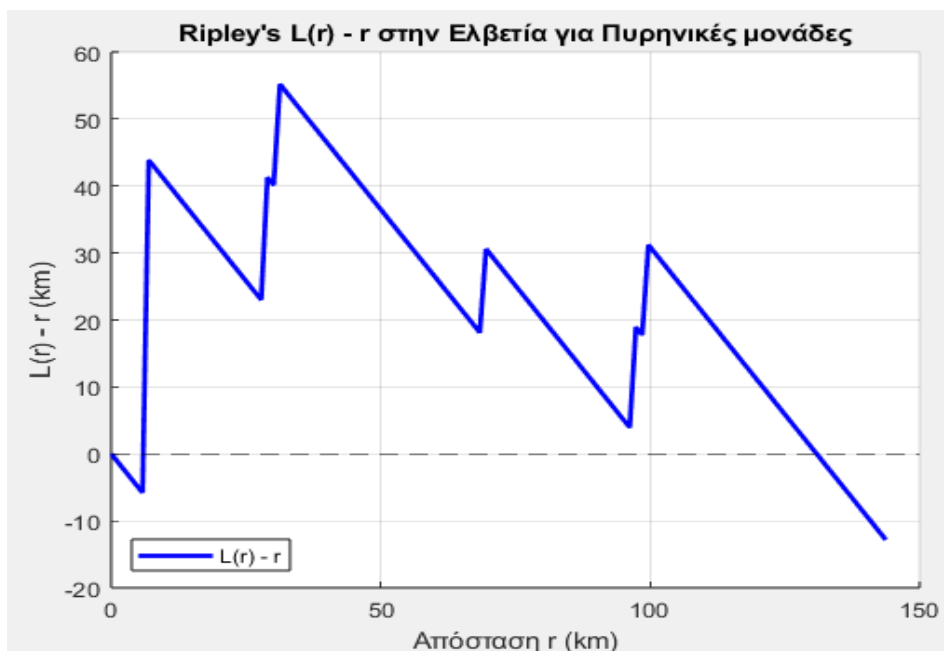
Με την εκτέλεση του προγράμματος για το dataset των πυρηνικών μονάδων όπως παρουσιάζονται στο αριστερό τμήμα της Εικόνα 4.31, φαίνεται στην πράξη η επίπτωση του μικρού δείγματος τιμών από τις απότομες γωνίες και τα ευθύγραμμα τμήματα που το αποτελούν. Μια ελαφριά απόκλιση από την τυχαία χωρική κατανομή (CSR) παρατηρείται στο δεξί γράφημα «Τύπου 1», για μικρές αποστάσεις περίπου στα 30 χλμ. όπου η μπλε γραμμή ξεπερνά ελάχιστα την ανώτερη γραμμή του περιθωρίου εμπιστοσύνης. Μετά τα 30–40 χλμ., η καμπύλη παρουσιάζει σταδιακή μείωση και σταθεροποιείται σε αρνητικές τιμές, χωρίς ωστόσο να ξεφεύγει εκτός των ορίων των προσομοιώσεων.



Εικόνα 4.31. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για πυρηνικές μονάδες παραγωγής της Ελβετίας (4 σημείων).

Το γράφημα «Τύπου 2» της Εικόνα 4.32 εμφανίζει και αυτό ιδιαίτερα απότομη μορφή με το «Τύπου 1». Η καμπύλη παρουσιάζει αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις με έντονες κλίσεις, ενώ σε πολλά σημεία η μεταβολή αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο εξαιρετικά μικρό μέγεθος δείγματος όπως έχει προανφερθεί (τεσσάρων σημείων).

Αυτή η μορφή υποδηλώνει ότι η ανάλυση με τον δείκτη Ripley σε τόσο περιορισμένου πλήθους δεδομένα επηρεάζεται έντονα από την ακριβή χωρική θέση κάθε σημείου, με αποτέλεσμα η καμπύλη να μην αποδίδει ομαλές τάσεις αλλά απότομα άλματα και πτώσεις ακόμα και με edge correction. Συνεπώς, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, καθώς η στατιστική ισχύς είναι περιορισμένη. Σε αντίθεση με το προηγούμενο γράφημα της Εικόνα 4.31, που περνούσε το 0 προς τις αρνητικές τιμές μετά τα 60 χλμ., λόγω της υποεκτίμησης, στην προκειμένη περίπτωση αυτό γίνεται στην διπλάσια απόσταση (~125 -130 χλμ.). Στην πλειονότητα τους οι τιμές δηλώνουν συσταδοποιημένη κατανομή σε σχέση με την τυχαία χωρική κατανομή (CSR), με εξαίρεση αυτές για τα πρώτα περίπου 10 χιλιόμετρα και τα τελευταία 20, όπου είναι αρνητικές και δηλώνουν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή από το αναμενόμενο.



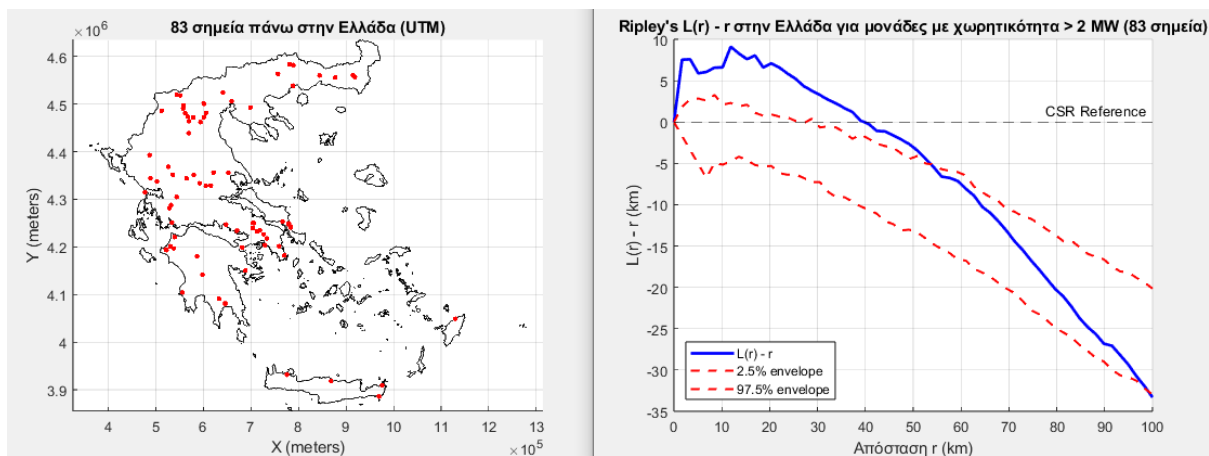
Εικόνα 4.32. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για πυρηνικές μονάδες παραγωγής της Ελβετίας (4 σημείων).

4.3.3. Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα

Στη συνέχεια, η ανάλυση επικεντρώνεται στην ελληνική επικράτεια, με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων που εφαρμόστηκαν στα αντίστοιχα δεδομένα. Το πρώτο

πρόγραμμα αφορά το σύνολο των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας (>2MW) που ανέρχονται σε 83.

Στο αριστερό τμήμα της Εικόνα 4.33, η χωρική απεικόνιση των σημείων (κόκκινα) αποκαλύπτει ότι οι μονάδες είναι κατανεμημένες σε διάφορες περιοχές της χώρας, με εντονότερη συγκέντρωση στη βόρεια και κεντρική Ελλάδα. Στο δεξί διάγραμμα «Τύπου 2», η μπλε καμπύλη ($L(r) - r$) υπερβαίνει την γραμμή αναφοράς CSR (0), αλλά και το άνω ακρο των προσομοιώσεων (κοκκίνη διακεκομμένη γραμμή) για μικρές αποστάσεις (έως περίπου τα 40 χλμ.), υποδεικνύοντας σαφή παρουσία χωρικής συσσώρευσης (clustering) σε μικρές κλίμακες. Μετά το όριο αυτό, οι τιμές μειώνονται σταδιακά και περνούν κάτω από τη γραμμή του μηδενός, δείχνοντας ότι τα σημεία για αυτές τις αποστάσεις τείνουν να βρίσκονται πι μακριά το ένα από το άλλο. Η απουσία edge correction είναι και σε αυτό το γράφημα αισθητή καθώς τόσο η γραφική παράσταση του $L(r) - r$, όσο κυρίως και οι envelopes έχουν μια συστηματική καθοδική πορεία που σημαίνει ότι υπάρχει υποεκτίμηση του δείκτη, ιδιαίτερα στις μεγαλύτερες αποστάσεις.



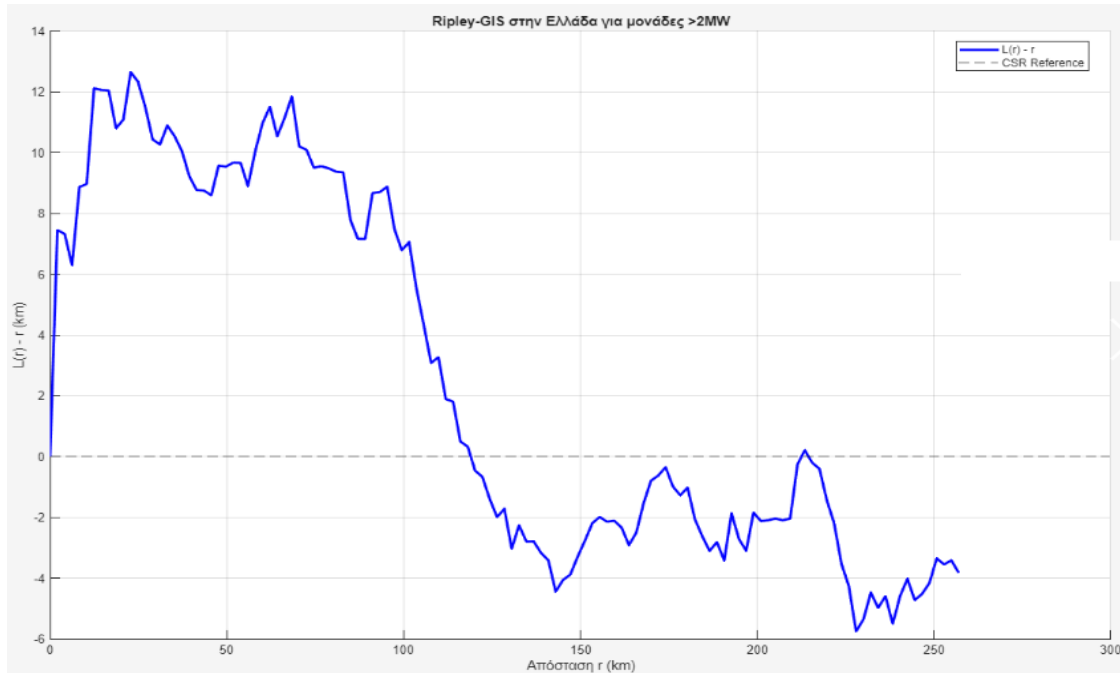
Εικόνα 4.33. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για την Ελλάδα (83 σημεία).

Στην Εικόνα 4.34 παρουσιάζεται το γράφημα «Τύπου 2» για το σύνολο των μονάδων στον ελληνικό χώρο. Η καμπύλη ξεκινά από το 0 και εκτινάσσεται σε θετικές τιμές, φθάνοντας σε κορυφώσεις περίπου στα 15–25 χλμ. και στα 65 – 75 χλμ. για τις πιο μικρές αποστάσεις, γεγονός που υποδηλώνει έντονη συσταδοποίηση των μονάδων σε αυτές τις κλίμακες. Καθώς όμως η απόσταση αυξάνεται, παρατηρείται σταδιακή μείωση των τιμών και πέρασμα κάτω από το μηδέν γύρω στα 110–120 χλμ. ως ένδειξη ότι σε αυτές τις αποστάσεις η κατανομή τείνει προς μεγαλύτερη διασπορά (dispersion).

Η πτωτική τάση συνεχίζεται και στα μεγαλύτερα εύρη αποστάσεων, με μικρές διακυμάνσεις, αλλά παραμένοντας κάτω από τη γραμμή αναφοράς CSR. Η απουσία περιθωρίων εμπιστοσύνης εξυπακούεται με μη πλήρης στατιστική αξιολόγηση της σημαντικότητας των αποκλίσεων από την

τυχαιότητα, ωστόσο το συνολικό μοτίβο δείχνει μετάβαση από ισχυρή συσταδοποίηση σε πιο αραιή από ό,τι θα αναμενόταν υπό το μοντέλο της CSR, καθώς αυξάνει η ακτίνα ανάλυσης.

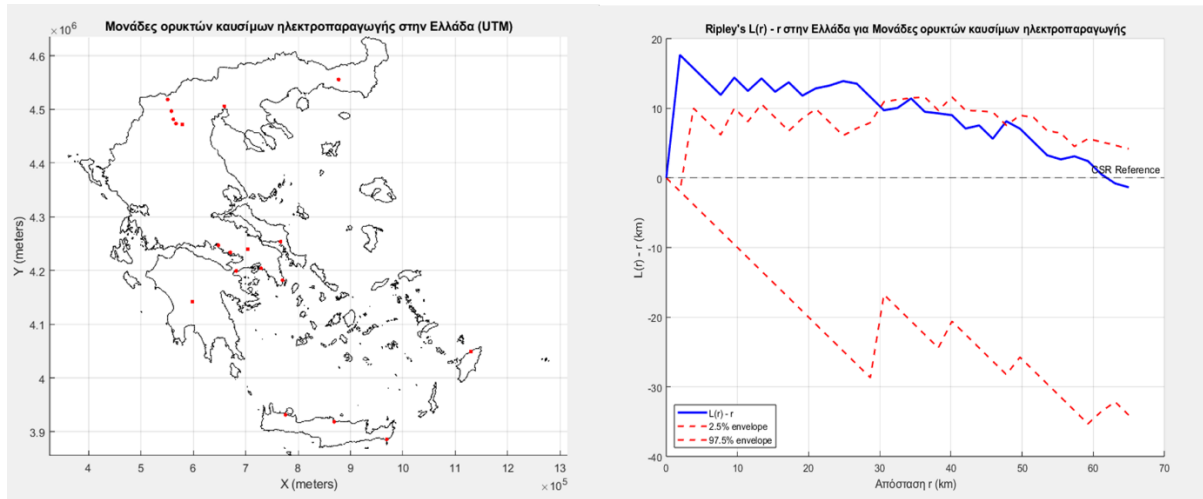
Τα δυο τύπων γραφήματα φαίνεται να συμφωνούν ως προς την αρχική συσταδοποίηση που εντοπίζεται (αν και το «Τύπου 2» βρήκε με μεγαλύτερη ακρίβεια το μέγεθος αυτής), ωστόσο οι ομοιότητες τους σταματάνε εδώ διότι απέχουν και ως προς το σε πιο σημείο η γραφική διασχίζει προς τα κάτω το 0, αλλά και για την πορεία της από εκεί και μετά.



Εικόνα 4.34. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για την Ελλάδα (83 σημεία).

Έπειτα, το επόμενο τμήμα της ανάλυσης επικεντρώνεται στην κατηγοριοποίηση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και στην ξεχωριστή διερεύνηση των χωρικών χαρακτηριστικών κάθε κατηγορίας.

Η αρχή έγινε με τις 21 μονάδες ορυκτών καυσίμων (Εικόνα 4.35). Η καμπύλη $L(r) - r$ «Τύπου 1» παραμένει σχεδόν εξ ολοκλήρου πάνω από τη γραμμή αναφοράς CSR σε όλο το εξεταζόμενο εύρος αποστάσεων, και μάλιστα σε αρκετά σημεία, στις πρώτες εξεταζόμενες αποστάσεις, υπερβαίνει το ανώτερο όριο του 97.5% envelope. Αυτό υποδηλώνει ισχυρή στατιστικά συσταδοποίηση (clustering) των μονάδων σε όλες τις κλίμακες αποστάσεων μέχρι περίπου τα 65 χλμ.



Εικόνα 4.35. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για μονάδες ορυκτών καυσίμων την Ελλάδα (21 σημεία).

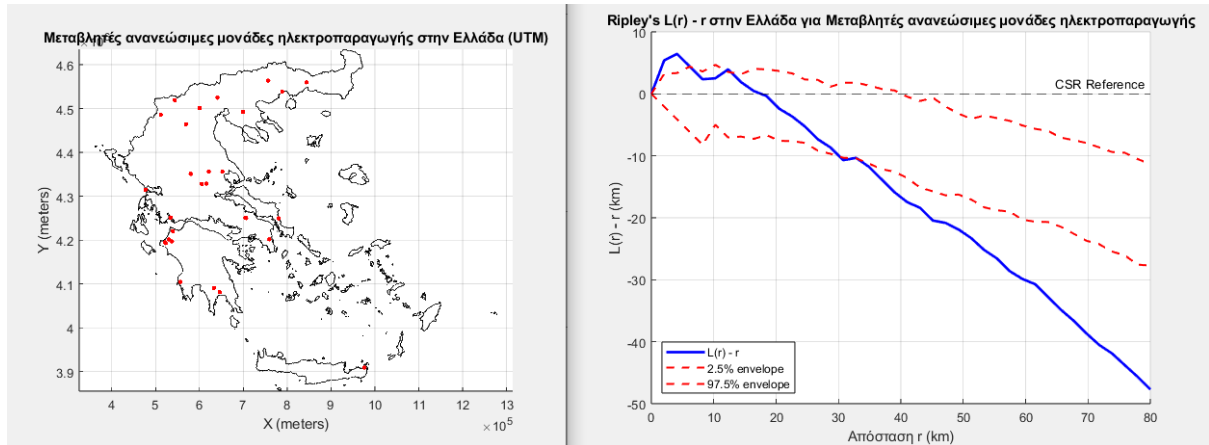
Η γραφική παράσταση «Τύπου 2» της Εικόνα 4.36 διατηρεί θετικές τιμές έως περίπου τα 160 χλμ. , γεγονός που υποδηλώνει και αυτό όπως το προηγούμενο, έντονη συσπείρωση των μονάδων σε μικρές αλλά και μεσαίες αποστάσεις, φτάνοντας και σε τιμές άνω των 30 χλμ. Η τιμή $L(r) - r$ παραμένει σχετικά σταθερή σε υψηλά επίπεδα για αποστάσεις έως ~ 120 χλμ., και στη συνέχεια, ακολουθεί απότομη καθοδική πορεία, διασχίζοντας τη γραμμή αναφοράς CSR (0) σε αποστάσεις κοντά στα 160 χλμ. και καταλήγοντας σε έντονα αρνητικές τιμές έως και κάτω από -50 χλμ., κάτι που δηλώνει τάση χωρικής διασποράς σε μεγάλες κλίμακες.

Με την εικόνα του δείκτη στο «Τύπου 2» γράφημα, είναι σύμφωνη και η οπτική αντίληψη των σημείων (κόκκινα) που υπάρχει από την Εικόνα 4.35 (αριστερά), καθώς σε Μακεδονία και Στερεά Ελλάδα παρατηρείται εύκολα, μεγαλύτερη συγκέντρωση μονάδων σε κοντινές αποστάσεις αλλά έπειτα οι υπόλοιπες είναι αραιά διασκορπισμένες τόσο σε νησιωτικές, όσο και σε ηπειρωτικές περιοχές.



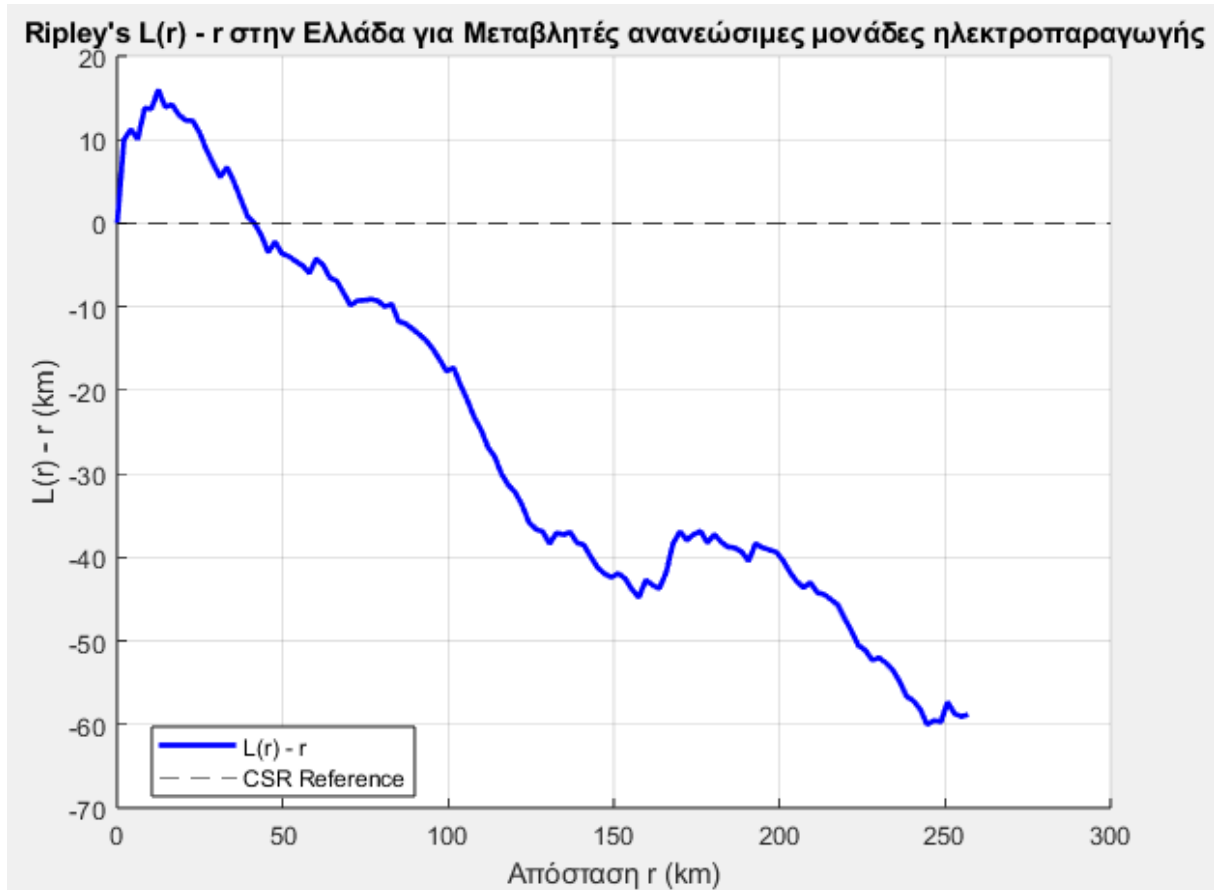
Εικόνα 4.36. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για μονάδες ορυκτών καυσίμων την Ελλάδα (21 σημεία).

Η δεύτερη επανάληψη του προγράμματος έγινε για τις μεταβλητές ανανεώσιμες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (42) που αποτελούνται από ηλιακές και αιολικές. Η καμπύλη $L(r) - r$ «Τύπου 1» της Εικόνα 4.37, ξεκινά και αυτή με θετικές τιμές, κορυφώνεται περίπου στα 5 χλμ., και παραμένει πάνω από τη γραμμή αναφοράς CSR (0) μέχρι και περίπου τα 15-20 χλμ., υποδεικνύοντας την ύπαρξη χωρικής συσπείρωσης σε μικρές κλίμακες. Μετά, οι τιμές γίνονται αρνητικές και αποκλίνουν σταθερά προς τα κάτω, γεγονός που υποδηλώνει τάση χωρικής διασποράς στις μεγαλύτερες αποστάσεις. Παρατηρείται ότι στις μικρές αποστάσεις η μπλε καμπύλη βρίσκεται εκτός του ανώτερου όριου προσομοιώσεων (97.5%), ένδειξη στατιστικά σημαντικής συσταδοποίησης. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις όμως, η καμπύλη και οι envelopes έχουν πάρει έντονη καθοδική πορεία που οφείλεται στην απουσία edge correction και καθιστά μη αξιόπιστα τα αποτελέσματα που προκύπτουν.



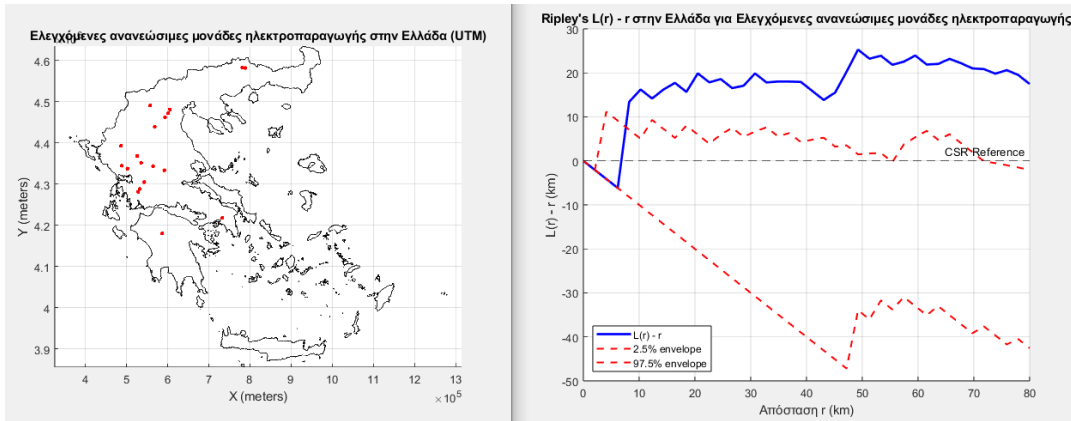
Εικόνα 4.37. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για μεταβλητές ανανεώσιμες μονάδες της Ελλάδας (42 σημεία).

Η γραφική παράσταση «Τύπου 2» της Εικόνα 4.38, παρουσιάζει την καμπύλη Ripley's $L(r) - r$, η οποία ξεκινά με θετικές τιμές και εμφανίζει μέγιστη τιμή περίπου στα 10–20 χλμ, υποδεικνύοντας συσταδοποίηση σε μικρές αποστάσεις. Με την αύξηση του r , η καμπύλη διασταυρώνει τη γραμμή αναφοράς CSR (0) σχετικά σύντομα σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις, περίπου στα 40 χλμ., γεγονός που υποδηλώνει μετάβαση από χωρική συσπείρωση σε πιο αραιο μοτίβο. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 40 χλμ., οι τιμές παραμένουν σταθερά αρνητικές και φθίνουν αγκιζοντας τιμή περίπου -60 χλμ. στα 250 χλμ., κάτι που δηλώνει πιο ισχυρή χωρική διασπορά σε μεγαλύτερες κλίμακες, απ' ό,τι θα περίμενε κανείς αν είχαν τοποθετηθεί εντελώς τυχαία.



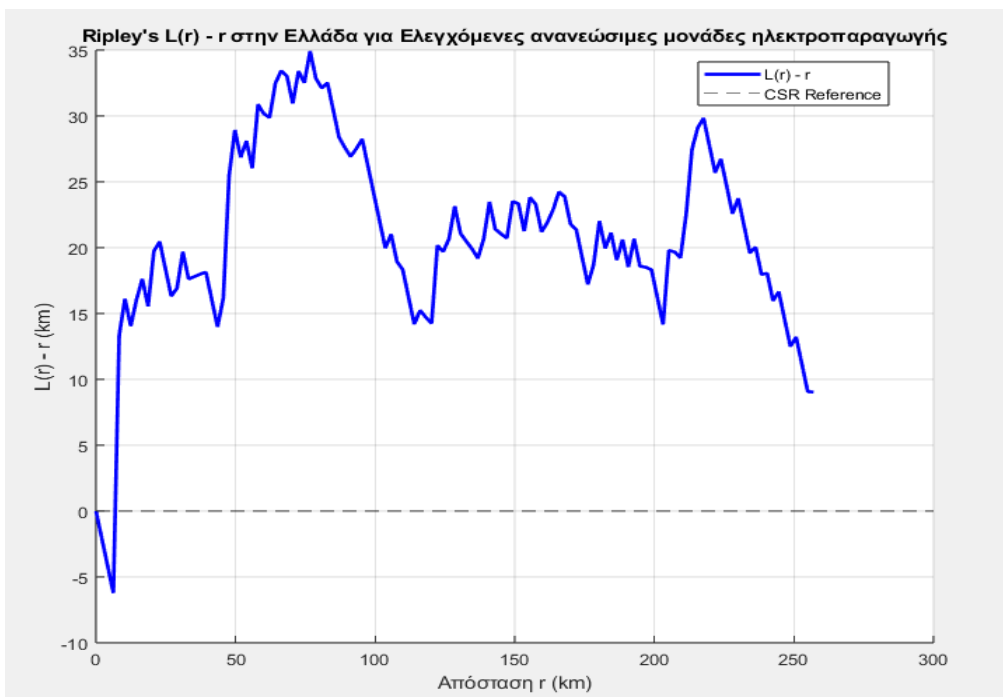
Εικόνα 4.38. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για μεταβλητές ανανεώσιμες μονάδες της Ελλάδας (42 σημεία).

Τέλος, η Εικόνα 4.39 παρουσιάζει αριστερά την κατανομή των 19 ελεγχόμενων ανανεώσιμων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα, ενώ δεξιά την γραφική παράσταση «Τύπου 1». Η καμπύλη $L(r) - r$ (μπλε γραμμή) ξεκινά από την γραμμή αναφοράς CSR (0) και αφού κάνει μια απότομη μικρή πτώση για πρώτες αποστάσεις (<5 χλμ.), αυξάνεται έντονα, φθάνοντας σε σταθερά θετικές τιμές περίπου 20–25 χλμ. για όλο το υπόλοιπο εύρος αποστάσεων. Το γεγονός ότι οι τιμές της καμπύλης βρίσκονται σημαντικά πάνω από το ανώτερο περίγραμμα εμπιστοσύνης (97.5%) σε όλο το μεγαλύτερο μέρος του διαστήματος r υποδηλώνει έντονη χωρική συσσώρευση. Η απουσία edge correction όμως, σημαίνει ότι οι τιμές για μεγαλύτερες αποστάσεις επηρεάζονται από μεροληψία λόγω του ορίου της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται από τις προσομοιώσεις που φέρουν μια ελαφρά αρνητική κλίση με την πάροδο των αποστάσεων.



Εικόνα 4.39. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για ελεγχόμενες ανανεώσιμες μονάδες της Ελλάδας (19 σημεία).

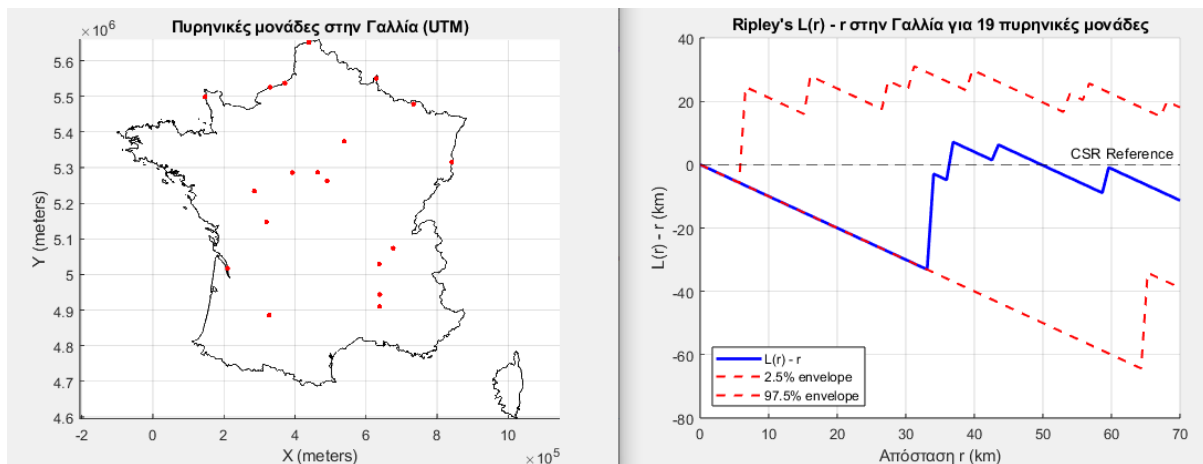
Έπειτα εφαρμόζεται διόρθωση οριακών φαινομένων στην Εικόνα 4.40, με το γράφημα «Τύπου 2», όπου η καμπύλη ξεκινά και εδώ με μικρές αρνητικές τιμές για τις πολύ μικρές αποστάσεις (<5 χλμ.), υποδηλώνοντας αρχική χωρική αποσυμπίεση. Στη συνέχεια, παρουσιάζει σημαντική αύξηση και διατηρεί υψηλές θετικές τιμές (15–35 χλμ.) σε όλο το εύρος των αποστάσεων, γεγονός που καταδεικνύει και πάλι συσσώρευση. Σε γενικές γραμμές αν παραβληθεί η μεγαλύτερη αξιοπιστία και η ακρίβεια που προσφέρει αυτό το γράφημα, τόσο το «Τύπου 1», όσο και το «Τύπου 2» για αυτή την περίπτωση φαίνεται να παρουσιάζουν μια παρόμοια πορεία.



Εικόνα 4.40. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για ελεγχόμενες ανανεώσιμες μονάδες της Ελλάδας (19 σημεία).

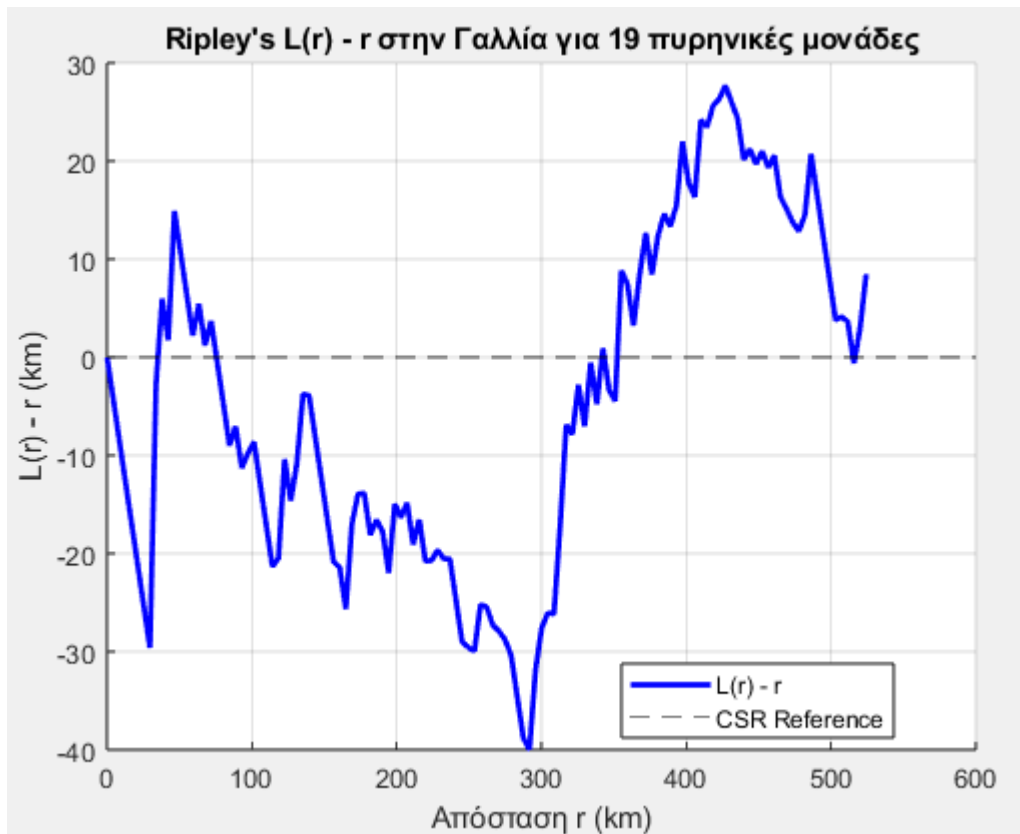
4.3.4. Μελέτη περίπτωσης: Γαλλία

Τελευταία δοκιμή πραγματοποιήθηκε για τις 19 πυρηνικές μονάδες τη Γαλλίας (Εικόνα 4.41 αριστερά) με στόχο την σύγκριση αυτής της περίπτωσης με την αντίστοιχη της Ελβετίας. Από το γράφημα «Τύπου 1» (Εικόνα 4.41 δεξιά) παράγεται το συμπέρασμα ότι οι περισσότερες τιμές της καμπύλης βρίσκονται εντός των ορίων τυχαίας χωρικής κατανομής (CSR). Για μικρές και μεσαίες αποστάσεις (0–35 χλμ.) η καμπύλη βρίσκεται σε ταύτιση με το κατώτερο όριο των προσομοιώσεων, υποδηλώνοντας οριακά τυχειότητα στην διασπορά με τάση προς απουσία χωρικής συσταδοποίησης. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις (>35 χλμ.) παρατηρείται απότομη άνοδος και σταδιακή επακόλουθη πτώση της $L(r) - r$, ενισχύοντας την ένδειξη τυχαίας κατανομής. Το γεγονός ότι η καμπύλη δεν υπερβαίνει το ανώτερο περίγραμμα εμπιστοσύνης (97.5%) σε καμία απόσταση σημαίνει ότι δεν εντοπίζεται συσταδοποίηση.



Εικόνα 4.41. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 1» για πυρηνικές μονάδες της Γαλλίας (19 σημεία).

Η καμπύλη της Εικόνα 4.42 που παρουσιάζει το γράφημα «Τύπου 2» φαίνεται να ακολουθεί παρόμοια πορεία, αλλά παρουσιάζει πολύ πιο έντονη μεταβλητότητα και διαταραχή. Στις μικρές αποστάσεις (<50 km) παρατηρούνται απότομες εναλλαγές μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών, με γρήγορη πτώση, αρχικά, κάτω από το μηδέν, υποδεικνύοντας τάση απομάκρυνσης σε αυτό το εύρος και στη συνέχεια κοφτή άνοδο άνω του 0. Στις μεσαίες αποστάσεις (περίπου 50–300 χλμ.) οι τιμές ενώ ξεκινάνε από θετικές (στα 15 χλμ.) ακολουθούν πτωτική πορεία και παραμένουν κυρίως αρνητικές, δείχνοντας χαμηλότερη συγκέντρωση από την τυχαία αναμενόμενη. Ωστόσο, μετά τα 300 χλμ. η καμπύλη ανεβαίνει σημαντικά και παραμένει θετική έως περίπου τα 500 χλμ., γεγονός που φανερώνει πιθανή χωρική συσπείρωση σε αυτές τις ακτίνες. Ως συνήθως το γράφημα αυτό δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια και αντικειμενικότητα στην ακρίβεια των τιμών αλλά στερεί στην ικανότητα του στατιστικής αξιολόγησης.



Εικόνα 4.42. Δείκτης Ripley's L σε γράφημα «Τύπου 2» για πυρηνικές μονάδες της Γαλλίας (19 σημεία).

Τα παραπάνω αποτελέσματα για όλες τις μελέτες περιπτώσεων χωρών, ανέδειξε πώς οι διαφορετικοί δείκτες διασποράς μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικά γεωγραφικά δεδομένα, προσφέροντας συμπληρωματικές οπτικές: ο Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα παρέχει μια μοναδική συγκρίσιμη τιμή, η συνάρτηση K του Ripley αποκαλύπτει πολυεπίπεδα πρότυπα συγκέντρωσης ή αποσυγκέντρωσης. Η εφαρμογή τους σε διαφορετικές χώρες με ιδιαίτερα ενεργειακά χαρακτηριστικά κατέδειξε τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους, προσφέροντας χρήσιμα ποσοτικά μεγέθη που μπορούν να αξιοποιηθούν σε συγκριτικές αναλύσεις. Στο επόμενο κεφάλαιο οι δείκτες αυτοί εντάσσονται στο πλαίσιο της ενεργειακής ασφάλειας, ώστε να διερευνηθεί πώς η διασπορά μπορεί να αποτελέσει πρακτικό και συμπληρωματικό εργαλείο στη λήψη αποφάσεων πολιτικής.

5. Εφαρμογή των Δεικτών Διασποράς ως δείκτες Ενεργειακής Ασφάλειας και Ανθεκτικότητας

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η σύνδεση των δεικτών διασποράς που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα μέρη με την έννοια της ενεργειακής ασφάλειας και ανθεκτικότητας. Η ανάλυση επικεντρώνεται στους δύο δείκτες που κρίθηκαν καταλληλότεροι για πρακτική αξιοποίηση: τον Δείκτη Εγγύτερου Γείτονα (Nearest Neighbor Index, R) και τη συνάρτηση K του Ripley. Ο πρώτος παρέχει άμεσα μία μοναδική αριθμητική τιμή για κάθε χώρα ή κατηγορία μονάδων, επιτρέποντας τη σύγκριση του βαθμού συγκέντρωσης ή διασποράς μεταξύ των διαφορετικών κρατών και την εύκολη ένταξή του σε πολυκριτηριακές μεθοδολογίες αξιολόγησης ενεργειακής ασφάλειας, ενώ ο δεύτερος θα χρειαστεί κάποιες προσαρμογές για να καταστεί κατάλληλος.

5.1. Τιμές του Δείκτη Εγγύτερου Γείτονα (R)

Ο Πίνακας 5.1. που ακολουθεί συνοψίζει τις τιμές του δείκτη Nearest Neighbor (R) για κάθε χώρα και κατηγορία μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.2 και παρέχουν μια μοναδική εκτίμηση του βαθμού συγκέντρωσης ή διασποράς για κάθε υποσύστημα.

Πίνακας 5.1. Τιμές του Δείκτη Εγγύτερου Γείτονα (R).

<i>Χώρα</i>	<i>Κατηγορία</i>	<i>Τιμή R</i>
Ελβετία	Όλες οι μονάδες >2 MW	0.75
	Δειγματοληπτικές συστάδες	0.67
	Ελεγχόμενες ΑΠΕ	0.74
	Μεταβλητές ΑΠΕ	0.69
	Πυρηνικές	0.53
Ελλάδα	Όλες οι μονάδες >2 MW	0.96
	Ορυκτά καύσιμα	1.37
	Ελεγχόμενες ΑΠΕ	0.76
	Μεταβλητές ΑΠΕ	1.02
Γαλλία	Πυρηνικές	0.93

Οι τιμές του Δείκτη Εγγύτερου Γείτονα (R) δείχνουν διαφοροποιήσεις ανά χώρα και κατηγορία μονάδων, αποκαλύπτοντας τα πρότυπα χωρικής κατανομής. Στην Ελβετία οι περισσότερες κατηγορίες εμφανίζουν τιμές κάτω του 1 (0.53–0.75), γεγονός που υποδηλώνει συγκέντρωση, ιδιαίτερα έντονη

για στις πυρηνικές μονάδες (0.53). Η Ελλάδα, αντίθετα, παρουσιάζει γενικά υψηλότερες τιμές R, με τον συνολικό δείκτη να πλησιάζει το 1 (0.96) και με τα ορυκτά καύσιμα να εμφανίζουν διασπορά (1.37), ενώ οι ελεγχόμενες ΑΠΕ κινούνται προς την κατεύθυνση της συγκέντρωσης (0.76) και οι μεταβλητές ΑΠΕ προς οριακή τυχαιότητα (1.02). Στη Γαλλία οι πυρηνικές μονάδες εμφανίζουν τιμή λίγο κάτω του 1 (0.93), δείχνοντας σχεδόν τυχαία χωρική κατανομή. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η Ελβετία έχει πιο συγκεντρωμένα πρότυπα εγκατάστασης, ενώ η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ποικιλία και σε ορισμένες περιπτώσεις έντονη διασπορά. Τέλος, συγκρίνοντας τις πυρηνικές μονάδες, παρατηρείται ότι η Ελβετία εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερη συγκέντρωση σε σχέση με τη Γαλλία, όπου η κατανομή τους είναι πιο τυχαία.

5.2. Προτεινόμενη μεθοδολογία για τον δείκτη Ripley's K

Σε αντίθεση με το R που δίνει μία τιμή ανά εφαρμογή, η συνάρτηση K του Ripley παρέχει καμπύλες τιμών σε διαφορετικές αποστάσεις. Για να καταστεί συγκρίσιμη με άλλους δείκτες και να μπορεί να ενταχθεί σε πολυκριτηριακή ανάλυση, απαιτείται η εξαγωγή μίας αντιπροσωπευτικής τιμής. Στην παρούσα εργασία προτείνονται τρεις εμπειρικοί κανόνες, ώστε ο μελλοντικός χρήστης να έχει ευελιξία επιλογών. Για τα αποτελέσματα έχει γίνει η χρήση μόνο των διαγραμμάτων «Τύπου 2», για προφανείς λόγους ακρίβειας τιμών. Να τονιστεί σε αυτό το σημείο, ότι για ιδιόμορφες μακρόστενες περιοχές μελέτης (όπως οι χώρες: Χιλή, Αργεντινή, Νορβηγία, κ.α.), προτείνεται ο δεύτερος ή ο τρίτος κανόνας, ώστε να μην επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό, το μήκος τους που απέχει κατά πολύ από το πλάτος της.

1^{ος} κανόνας:

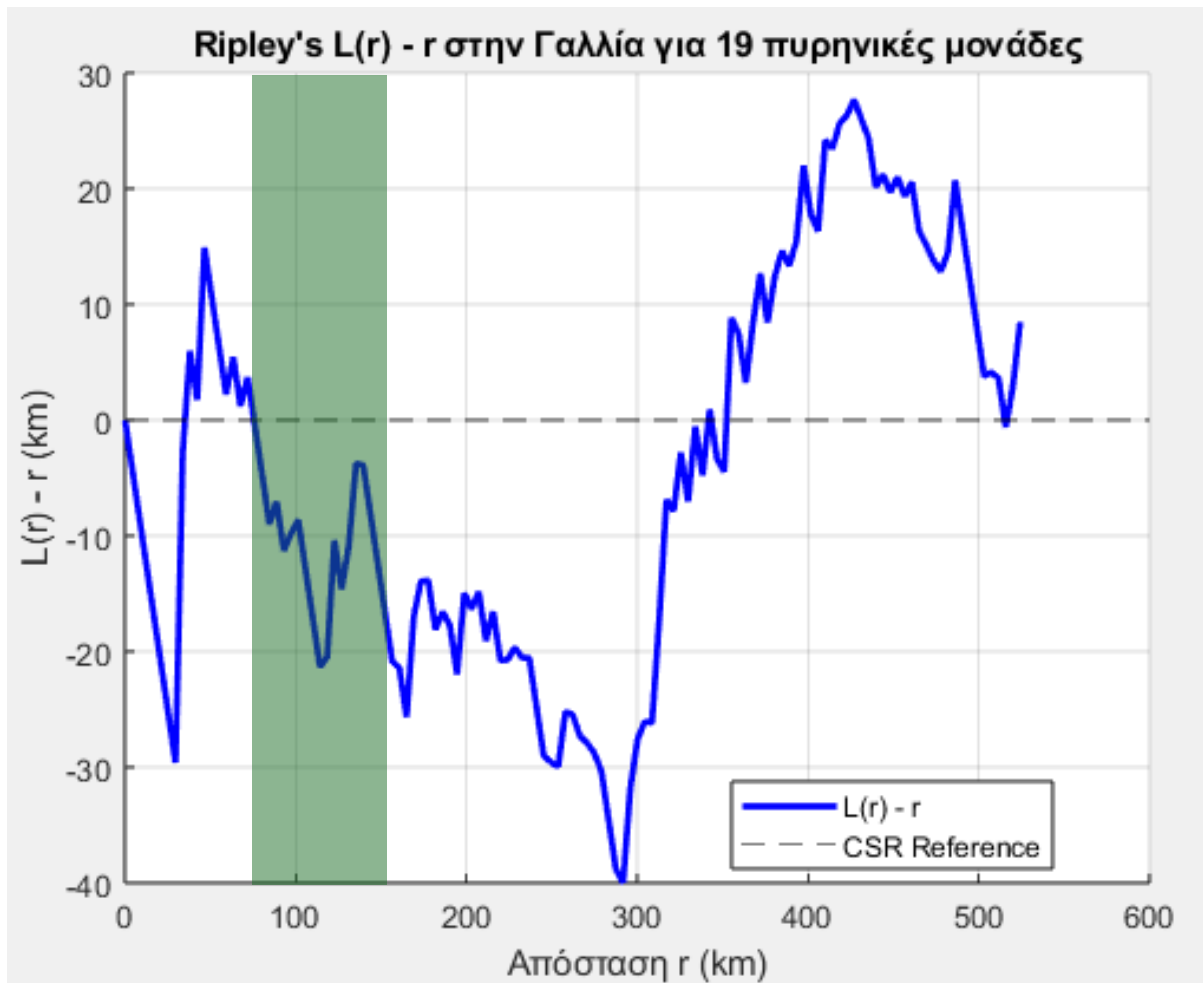
- Υπολογίζεται το μήκος (μέγιστη έκταση) της χώρας (στην προκειμένη περίπτωση Ελβετία 350 χλμ., Ελλάδα 940 χλμ., Γαλλία 1000 χλμ.).
- Επιλέγεται διάστημα αποστάσεων ίσο με το 10–20% του μήκους αυτού (για παράδειγμα η Εικόνα 5.1, όπου το πράσινο πλαίσιο υποδηλώνει την περιοχή που αντιστοιχεί στο ποσοστό της μέγιστης έκτασης που έχει επιλεγεί). Η επιλογή του ποσοστού μπορεί να διαφέρει ανά εκτέλεση, ανάλογα τι επιθυμεί ο χρήστης, αρκεί να μην ξεπερνάει το r_{max} που έχει χρησιμοποιηθεί.
- Στο διάστημα αυτό υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών του Ripley's K, ώστε να εξαχθεί μια ενιαία τιμή.



Εικόνα 5.1. Το 10–20% της μέγιστης έκτασης της Γαλλίας (100-200 χλμ.)

2^{ος} κανόνας:

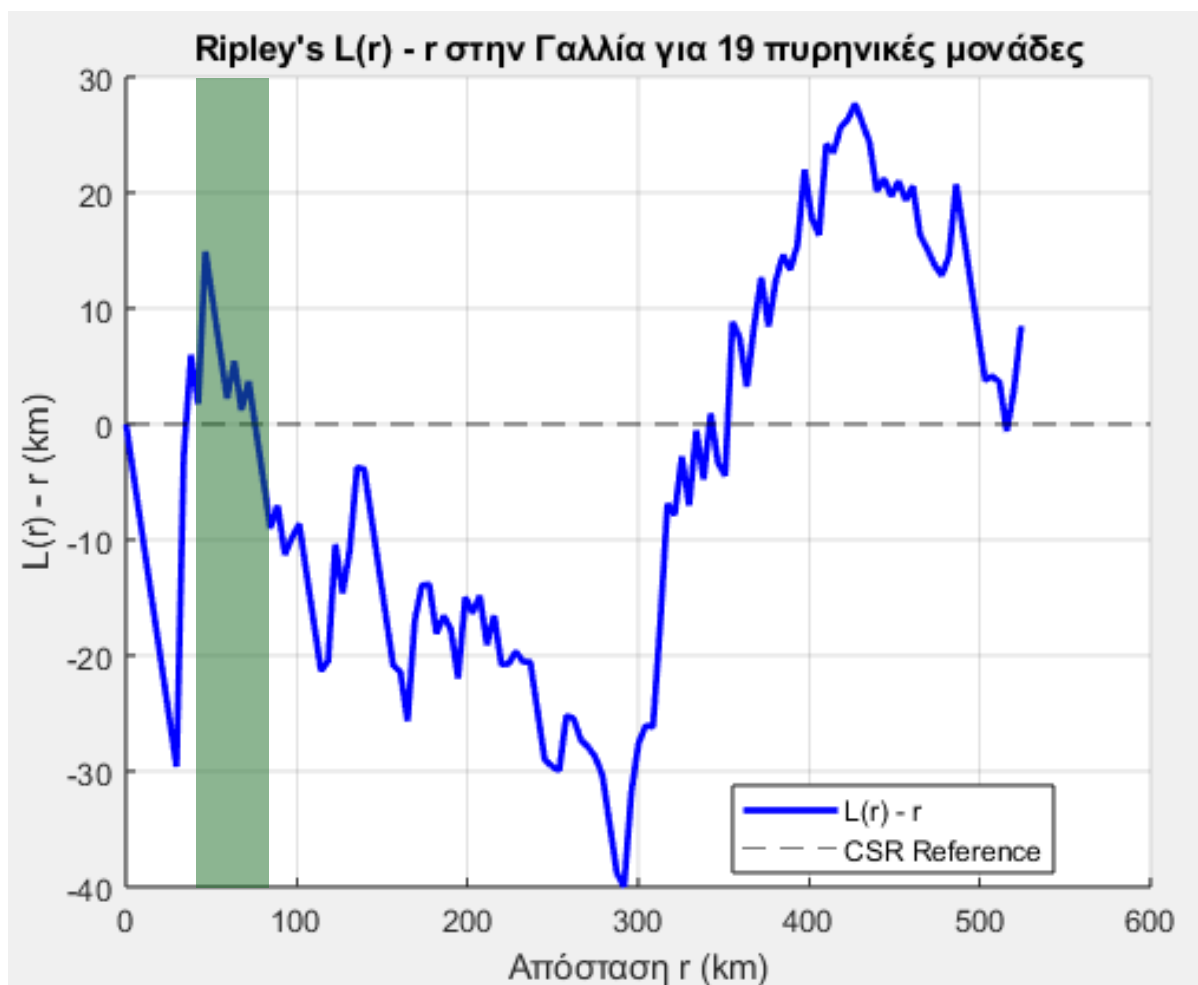
- Υπολογίζεται το εμβαδόν της χώρας (στην προκειμένη περίπτωση Ελβετία 41285 χλμ²., Ελλάδα 131957 χλμ²., Γαλλία 551695 χλμ²).
- Υπολογίζεται η ρίζα του εμβαδού για να γίνει η μετατροπή από χλμ². σε χλμ.
- Επιλέγεται διάστημα αποστάσεων ίσο με το 10–20% της ρίζας (για παράδειγμα η Εικόνα 5.2, όπου το πράσινο πλαίσιο υποδηλώνει την περιοχή που αντιστοιχεί στο ποσοστό της ρίζας). Η επιλογή του ποσοστού μπορεί να διαφέρει ανά εκτέλεση, ανάλογα τι επιθυμεί ο χρήστης, αρκεί να μην ξεπερνάει το r_{max} που έχει χρησιμοποιηθεί.
- Στο διάστημα αυτό υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών του Ripley's K, ώστε να εξαχθεί μια ενιαία τιμή.



Εικόνα 5.2. Το 10–20% της ρίζας του εμβαδού της Γαλλίας (74-149 χλμ.)

3^{ος} κανόνας:

- Υπολογίζεται το εμβαδόν της χώρας (στην προκειμένη περίπτωση Ελβετία 41285 χλμ²., Ελλάδα 131957 χλμ²., Γαλλία 551695 χλμ²).
- Έστω κύκλος με εμβαδόν ίσο με αυτό της εκάστοτε χώρας. Για να υπάρχουν χλμ. και όχι χλμ². υπολογίζεται η ακτίνα του κύκλου αυτού.
- Επιλέγεται διάστημα αποστάσεων ίσο με το 10–20% του μήκους της ακτίνας (για παράδειγμα η Εικόνα 5.3Εικόνα 5.2, όπου το πράσινο πλαίσιο υποδηλώνει την περιοχή που αντιστοιχεί στο ποσοστό της ακτίνας). Η επιλογή του ποσοστού μπορεί να διαφέρει ανά εκτέλεση, ανάλογα τι επιθυμεί ο χρήστης, αρκεί να μην ξεπερνάει το r_{\max} που έχει χρησιμοποιηθεί.
- Στο διάστημα αυτό υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών του Ripley's K, ώστε να εξαχθεί μια ενιαία τιμή.



Εικόνα 5.3. Το 10–20% της ακτίνας κύκλου με εμβαδόν ίσο με αυτό της Γαλλίας (42-84 χλμ.)

Πίνακας 5.2. Συγκεντρωτικός πίνακας με τα εύρη αποστάσεων, που θα εξεταστούν (10-20%).

Χώρα	1ος κανόνας (σε χλμ.)	2ος κανόνας (σε χλμ.)	3ος κανόνας (σε χλμ.)
Ελβετία	35 - 70	20 - 41	11 - 23
Ελλάδα	94 - 188	36 - 73	20 - 41
Γαλλία	100 - 200	74 - 149	42 - 84

Αυτός ο μέσος όρος αποτυπώνει την «κρίσιμη κλίμακα» διασποράς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία συγκρίσιμη αριθμητική τιμή για ένταξη σε πολυκριτηριακή ανάλυση. Φυσικά, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε έρευνας, το ποσοστό των διαστημάτων για την απόσταση που επιλέγεται, μπορεί να προσαρμοστεί αντίστοιχα, ώστε να εξυπηρετεί το εύρος που εξετάζεται, με μοναδική προϋπόθεση να μην ξεπερνάει το εύρος της απόστασης r του άξονα x . Για την παρούσα εργασία με διάστημα 10–

20% (οι αναλυτικές αποστάσεις κάθε κανόνα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.2.) προκύπτουν προσεγγιστικά οι τιμές του δείκτη που φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3. Τιμές του Δείκτη Ripley's K.

<i>Χώρα</i>	<i>Κατηγορία</i>	<i>Τιμή K</i> <i>(1ος κανόνας)</i>	<i>Τιμή K</i> <i>(2ος κανόνας)</i>	<i>Τιμή K</i> <i>(3ος κανόνας)</i>
Ελβετία (35–70 χλμ.)	Όλες οι μονάδες >2 MW	3.6	5.5	5.2
	Δειγματοληπτικές συστάδες	15.2	29.5	30.8
	Ελεγχόμενες ΑΠΕ	3.9	5.4	4.6
	Πυρηνικές	33.0	38.2	41.0
Ελλάδα (94–188 χλμ.)	Όλες οι μονάδες >2 MW	0.3	9.8	11.4
	Ορυκτά καύσιμα	9.2	21.0	15.8
	Ελεγχόμενες ΑΠΕ	-25.0	-4.0	6.0
	Μεταβλητές ΑΠΕ	21.5	27.9	17.5
Γαλλία (100–200 χλμ.)	Πυρηνικές	-20.0	-10.6	4.0

Ο Πίνακας 5.3 επιβεβαιώνει ότι στην Ελβετία οι περισσότερες κατηγορίες έχουν θετικές τιμές του δείκτη Ripley's K, με ιδιαίτερα υψηλή τιμή για τις πυρηνικές μονάδες, που αποτυπώνουν έντονη συγκέντρωση. Αντίθετα, στην Ελλάδα η συνολική εικόνα είναι σχεδόν ουδέτερη, αλλά παρατηρούνται ισχυρές αποκλίσεις: τα ορυκτά καύσιμα και οι ελεγχόμενες ΑΠΕ δείχνουν συγκέντρωση, ενώ οι μεταβλητές ΑΠΕ έχουν αρνητική τιμή, υποδηλώνοντας μια τάση απομάκρυνσης, πιο ομοιόμορφη διασπορά από ότι τυχαία. Η Γαλλία παρουσιάζει καθαρά αρνητική τιμή, για τις πυρηνικές μονάδες, γεγονός που φανερώνει την απουσία τοπικής συσσώρευσης και τη χωρική τους «αραίωση» στο διάστημα των χιλιομέτρων που εξετάζεται με κάθε κανόνα. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δείχνουν μια έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των χωρών: η Ελβετία ακολουθεί μοτίβα ισχυρής συγκέντρωσης, η Ελλάδα εμφανίζει μικτή εικόνα με τάσεις τόσο συσταδοποίησης όσο και απομάκρυνσης, ενώ η Γαλλία καταγράφει συστηματική αραιή κατανομή.

Στην παρούσα διπλωματική δεν θα γίνει κάποια σύγκριση μεταξύ των τριών κανόνων, μιας και καμία από τις χώρες επιλογής δεν παρουσιάζει μορφή, ικανή να αποτελέσει πρόβλημα για κάποιον από αυτούς, με αποτέλεσμα να καταλήγουν σε αρκετά κοντινές τιμές.

5.3. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Η εφαρμογή των δύο δεικτών, του Εγγύτερου Γείτονα (R) και του Ripley's K, κατέδειξε ότι, παρότι δεν είναι άμεσα συγκρίσιμοι ως προς τις τιμές τους, καταλήγουν σε συνεπή ερμηνεία των χωρικών προτύπων. Ο δείκτης R παρέχει μια απλή και συγκρίσιμη ένδειξη της κατανομής, με τιμές κοντά στο 1 να υποδηλώνουν τυχαία κατανομή, μικρότερες από 1 να δείχνουν συγκέντρωση και μεγαλύτερες από 1 να φανερώνουν ομοιόμορφη διασπορά. Αντίθετα, ο Ripley's K αποτυπώνει την πολυεπίπεδη δομή των σημείων και αναδεικνύει αποστάσεις όπου εμφανίζεται συσσώρευση ($L(r) - r > 0$) ή αποσυγκέντρωση ($L(r) - r < 0$) σε σύγκριση με το πως θα ήταν αν υπήρχε τυχαία κατανομή· η σύνοψή του σε μέσες τιμές επιτρέπει τη συγκριτική αξιοποίησή του.

Συγκρίνοντας τις χώρες μεταξύ τους συνδυάζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν και από τους δύο δείκτες (από τον Ripley θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές από τον 1ο κανόνα), παρατηρείται ότι η Ελβετία εμφανίζει σταθερά πρότυπα συγκέντρωσης: τόσο οι πυρηνικές (Ripley 33, $R=0.53$) όσο και οι υδροηλεκτρικές (Ripley 3.9, $R=0.74$) εντοπίζονται σε συγκεκριμένες συστάδες, στοιχείο που αντανακλά την τοπογραφία και τον έντονο έλεγχο στη χωροθέτηση. Αντίθετα, στη Γαλλία, οι πυρηνικές εμφανίζουν μέση αρνητική τιμή Ripley (-20) παρά τον σχετικά χαμηλό R (0.93), κάτι που δείχνει ότι ενώ υπάρχει τυχαία διασπορά σε εθνικό επίπεδο (με βάση τα όρια κατωφλίων), σε αποστάσεις 100–200 χλμ. το πρότυπο μοιάζει πιο ομοιόμορφα απομακρυσμένο, από ότι τυχαίο. Με άλλα λόγια, οι πυρηνικές της Ελβετίας σχηματίζουν τοπικές ισχυρές συγκεντρώσεις, ενώ στη Γαλλία η κατανομή τους είναι πιο «αραιή» σε αυτήν την κλίμακα, παρότι η χώρα διαθέτει πολύ περισσότερες μονάδες συνολικά. Τέλος, στην περίπτωση της Ελλάδας, οι ελεγχόμενες ΑΠΕ (Ripley 21.5, $R=0.76$) παρουσιάζουν τάση συγκέντρωσης που προσεγγίζει την εικόνα των υδροηλεκτρικών της Ελβετίας, αναδεικνύοντας ένα παρόμοιο χωρικό πρότυπο.

Ο δείκτης Εγγύτερου Γείτονα (Nearest Neighbor, R) παρουσιάζει ως κύριο μειονέκτημα το γεγονός ότι βασίζεται αποκλειστικά στις αποστάσεις των πλησιέστερων σημείων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε στρεβλώσεις, καθώς ενδέχεται η μέθοδος να «διασχίζει» περιοχές εκτός συνόρων ή νεκρούς χώρους όπως θάλασσες, όταν εξετάζεται η κοντινότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων, για περιοχές μελέτης όπου οι συνοριακές γραμμές τους, να είναι πολύπλοκης μορφολογίας και να μην προσεγγίζονται απλά από ένα κυρτό περίβλημα. Παρά τον περιορισμό αυτό, το πλεονέκτημα του δείκτη είναι η εξαιρετικά γρήγορη παραγωγή αποτελεσμάτων, τα οποία συνοψίζονται σε μία μοναδική, άμεση και συγκρίσιμη τιμή. Η απλότητα αυτή καθιστά τον δείκτη εύχρηστο και άμεσα αξιοποιήσιμο σε πολυκριτηριακές μεθόδους αξιολόγησης.

Ο δείκτης Ripley's K, από την άλλη πλευρά, εμφανίζει ένα βασικό πρόβλημα, τον ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό φόρτο που απαιτεί, τόσο για την εφαρμογή του αλγορίθμου στα πραγματικά δεδομένα όσο και για την εκτίμηση confidence envelopes, τα οποία είναι απαραίτητα για πιο αξιόπιστη

ερμηνεία. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία δεν ήταν εφικτή η παραγωγή envelopes. Επιπλέον, οι τιμές που προκύπτουν αναφέρονται σε συγκεκριμένες ακτίνες ανάλυσης, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία από τον ερευνητή ώστε να επιλεχθεί το κατάλληλο διάστημα προς εξέταση και έτσι να εξαχθεί μία αντιπροσωπευτική τιμή για συγκρίσεις. Ωστόσο, το σημαντικό πλεονέκτημα του δείκτη είναι ότι λαμβάνει υπόψη με ακρίβεια τα πραγματικά όρια της περιοχής μελέτης και τους ενδιάμεσους «νεκρούς χώρους» (π.χ. θαλάσσιες εκτάσεις), ενώ προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής τόσο εστιασμένων αποτελεσμάτων για συγκεκριμένα διαστήματα αποστάσεων όσο και συνολικής εικόνας της χωρικής κατανομής.

Η εφαρμογή των δύο δεικτών αναδεικνύει διαφορετικές πτυχές της διασποράς. Η συνδυασμένη χρήση τους μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση της ενεργειακής ασφάλειας, προσθέτοντας μια ποσοτική πλευρά στη γεωγραφική διάσταση. Στην πράξη, οι τιμές αυτές μπορούν να ενταχθούν σε ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο μαζί με οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και τεχνικούς δείκτες, ώστε να αποτιμηθεί πιο σφαιρικά η ασφάλεια και ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος.

6. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη διασπορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ως κρίσιμη διάσταση στην αξιολόγηση της εθνικής ενεργειακής ανθεκτικότητας και ασφάλειας. Μέσα από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και εφαρμογή δεικτών χωρικής ανάλυσης σε πραγματικά δεδομένα, επιβεβαιώθηκε ότι η γεωγραφική κατανομή των σταθμών παραγωγής μπορεί να λειτουργήσει ως αυτόνομος δείκτης, συμπληρωματικός στα ήδη υφιστάμενα εργαλεία ενεργειακής πολιτικής, για να προσφέρει πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική αποτίμηση των εθνικών ενεργειακών συστημάτων.

Οι αλγόριθμοι και οι δείκτες που αναφέρθηκαν – Convex Hull, Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα (R), συνάρτηση K του Ripley και δείκτες χωρικής αυτοσυσχέτισης (Moran's I, Geary's C) – αξιολογήθηκαν ως προς τη χρησιμότητά τους. Διαπιστώθηκε ότι, ενώ όλοι παρέχουν χρήσιμη πληροφόρηση για τη χωρική δομή, δεν είναι εξίσου λειτουργικοί για την τελική ένταξη σε ένα πλαίσιο ενεργειακής ανάλυσης. Ο Convex Hull και οι δείκτες αυτοσυσχέτισης προσφέρουν περισσότερο περιγραφική ή συμπληρωματική εικόνα, αλλά δεν οδηγούν σε άμεσα αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Αντίθετα, ο Δείκτης Εγγύτερου Γείτονα και κυρίως η συνάρτηση Ripley αποτέλεσαν τους πιο κατάλληλους δείκτες, καθώς απέδωσαν μετρήσιμες και συγκρίσιμες τιμές, ικανές να ενταχθούν σε πολυκριτηριακά πλαίσια αξιολόγησης ενεργειακής ασφάλειας. Έπειτα από την εκτεταμένη επαφή και ανάλυση και των δύο δεικτών, παρά την ακρίβεια και την αξιοπιστία που παρέχει ο Ripley, πιο πρακτικός και προσιτός κρίνεται να είναι ο Nearest Neighbor. Ο Ripley, παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμος όταν απαιτείται εις βάθος κατανόηση της χωρικής δομής σε διαφορετικές κλίμακες απόστασης, παρότι συνεπάγεται αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Παράλληλα, η εφαρμογή των δεικτών σε χώρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Ελλάδα, Ελβετία, Γαλλία) ανέδειξε τις διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από το ενεργειακό μίγμα και τον τρόπο χωροθέτησης. Η Ελβετία εμφάνισε τάσεις συγκέντρωσης, ιδίως σε πυρηνικά, η Ελλάδα παρουσίασε μεγαλύτερη ποικιλία προτύπων ανά τεχνολογία, ενώ η Γαλλία έδειξε πιο διάχυτη εικόνα στις πυρηνικές της μονάδες. Οι διαφορές αυτές καταδεικνύουν ότι η χωρική διάσταση δεν είναι μόνο τεχνικό ζήτημα, αλλά και αποτέλεσμα ενεργειακών στρατηγικών και πολιτικών επιλογών.

Σημαντική συμβολή της εργασίας αποτελεί η πρόταση μεθοδολογίας για τη χρήση του δείκτη Ripley σε πολυκριτηριακές αναλύσεις. Μέσω της επιλογής ενός κατάλληλου διαστήματος αποστάσεων (10–20% του μήκους χώρας ή της ρίζας του εμβαδού της χώρας ή της ακτίνας κύκλου με εμβαδόν ίσο με αυτό της χώρας, ανάλογα με την επιλογή κανόνα) και του υπολογισμού μέσης τιμής, καθίσταται δυνατή η απόδοση μιας μοναδικής αριθμητικής τιμής που μπορεί να ενσωματωθεί σε σύνθετους δείκτες ενεργειακής ασφάλειας. Έτσι, η διασπορά αποκτά επιχειρησιακή αξία ως μετρήσιμο μέγεθος,

συγκρίσιμο μεταξύ χωρών και τεχνολογιών. Φυσικά, όπως έχει επισημανθεί και προηγουμένως, ο κάθε ερευνητής, έχει την κάθε ευελιξία να προτείνει όχι μόνο διαφορετικό εύρος αποστάσεων, αλλά και διαφορετικούς κανόνες επιλογής αυτού του διαστήματος, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης του.

Συνολικά, η έρευνα ανέδειξε τη σημασία της χωρικής κατανομής των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και ανέπτυξε ένα πλαίσιο ποσοτικής αξιολόγησης που μπορεί να αξιοποιηθεί σε εθνικό και συγκριτικό επίπεδο. Έτσι, η μελέτη αυτή φιλοδοξεί να αποτελέσει αφετηρία για την καθιέρωση της διασποράς ως δείκτη ενεργειακής ανθεκτικότητας και να συμβάλει σε πιο ασφαλή, ανθεκτικά και βιώσιμα ενεργειακά συστήματα.

Η μελλοντική έρευνα μπορεί να επεκτείνει την παρούσα προσέγγιση εξετάζοντας περισσότερες χώρες και τεχνολογίες, καθώς και αξιοποιώντας δυναμικά δεδομένα που αποτυπώνουν την εξέλιξη των εγκαταστάσεων στον χρόνο. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της έννοιας της διασποράς με άλλους δείκτες αξιοπιστίας και βιωσιμότητας θα μπορούσε να συμβάλει στη διαμόρφωση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για την ενεργειακή ασφάλεια μιας χώρας. Επιπλέον, σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες θα μπορούσε να επιτρέψει μια πιο σφαιρική αξιολόγηση σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Με αυτόν τον τρόπο, θα καταστεί εφικτή η δημιουργία ενός συστήματος συγκριτικής αξιολόγησης (benchmarking) μεταξύ των κρατών-μελών, παρέχοντας χρήσιμες κατευθύνσεις για τον στρατηγικό ενεργειακό σχεδιασμό σε ευρωπαϊκή κλίμακα.

Οι δείκτες διασποράς που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μπορούν να εμπλουτιστούν με πρόσθετες πληροφορίες, πέραν των γεωχωρικών δεδομένων. Ενδεικτικά, μπορεί να ληφθεί υπόψη η εγκατεστημένη ισχύς (MW), αλλά και πιθανοί χωρικοί περιορισμοί. Παράλληλα, θα μπορούσε να ενσωματωθεί ένας μηχανισμός επιβράβευσης για τις μονάδες που βρίσκονται πλησίον του δικτύου μεταφοράς, καθώς αυτό ενισχύει τη λειτουργική αποδοτικότητα και μειώνει το κόστος διασύνδεσης.

Τέλος, μια ακόμη προοπτική είναι η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων για τον μελλοντικό ενεργειακό σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, μπορεί να αναπτυχθεί ένα Γεωγραφικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης (GIS-based optimization model) για τον εντοπισμό των καταλληλότερων τοποθεσιών εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Ένα τέτοιο μοντέλο θα λαμβάνει υπόψη του την έννοια της διασποράς, με στόχο τη μεγιστοποίησή της, ενσωματώνοντας παράλληλα τεchnοοικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Βιβλιογραφία

1. Kostal L., Lansky P. and Pokora O. Measures of statistical dispersion based on Shannon and Fisher information concepts. *Information Sciences* 2013; 235: 214-223.
2. Nepal R., Zhao X., Liu Y., et al. Can green finance strengthen energy resilience? The case of China. *Technological Forecasting and Social Change* 2024; 202: 123302.
3. Ζαΐρης Π. Στατιστική Μεθοδολογία- Αναθεωρημένη έκδοση. 2^η εκ. Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική ΑΕ, 2010; 81-89.
4. Folke C. Resilience (Republished). *Ecology & Society*, 2016; 21(4): 44.
5. Carlson J., Haffenden R., Bassett G., et al. Resilience: Theory and Application. *Argonne National Laboratory*, 2012, ANL/DIS-12-1.
6. Cherp A., Jewell J. The concept of energy security: Beyond the four As. *Energy Policy* 2014; 75: 415-421.
7. Bajracharya T. R., Shakya S. R., Sharma A. *Dynamics of energy security and its implications* In: Handbook of Energy and Environmental Security. Ολλανδία: Elsevier Science & Technology Books, 2022; 13-25.
8. Bærentzen J., Gravesen J., Anton F., et al. Convex Hulls. In: *Guide to Computational Geometry Processing Foundations, Algorithms, and Methods*. London: Springer-Verlag, 2012; 234-247.
9. Upton G. and Fingleton B. *Spatial data analysis by example, volume 1: Point pattern and quantitative data*. Chichester/New York: Wiley, 1985.
10. Mathur M. Spatial autocorrelation analysis in plant population: An overview. *Journal of Applied and Natural Science* 2015; 7 (1): 501 – 513.
11. Boots B. and Getis A. *Point Pattern Analysis*, Newbury Park, CA: Sage Publication, 1988.
12. Yamada H. Spatial Smoothing Using Graph Laplacian Penalized Filter. *Spatial Statistics* 2024; 60: 100799.
13. Geary R. The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician* 1954; 5: 115-45.

14. Dixon P. Ripley's K function. In: El-Shaarawi A., Piegorisch W. (eds) *Encyclopedia of Environmetrics*. Volume 3. Chichester: John Wiley & Sons, 2002; 1796–1803.
15. Ripley B. D. The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability* 1976; 13(2), 255–266.
16. Ripley B. D. *Spatial Statistics*. London: Wiley, 1981.
17. Kwon H., Oh S., Baek J-W. Algorithmic Efficiency in Convex Hull Computation: Insights from 2D and 3D Implementations. *Symmetry*. 2024; 16(12):1590.
18. Chan T.M. Optimal output-sensitive convex hull algorithms in two and three dimensions. *Discrete Comput Geom*. 1996; 16: 361–368.
19. Clark P.J. and Evans F.C., Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. *Ecology*. 1954; 35: 445-453.
20. GADM. (χ.χ.). *GADM Maps and Data*. Διαθέσιμο στο: https://gadm.org/download_country.html. (ανακτήθηκε Ιούλιο 2025)
21. Global Power Plant Database. (χ.χ.). *Resourcewatch*. Διαθέσιμο στο: <https://shorturl.at/3ftw7> (ανακτήθηκε Ιούλιο 2025)
22. Pavlovski A. Dispatchable Renewables: Selecting a Right Pathway. *Global Journals of Research in Engineering*, 2024; 24(J1), 1–31.
23. Clark S.R., McGregor C. Firm-dispatchable power and its requirement in a power system based on variable generation. *Information and Systems Engineering* (Preprint), 2024.
24. Cressie N.A.C., *Statistics for spatial data*. Wiley & Sons, 1993.
25. Diggle P. *Statistical analysis of spatial point patterns*. London: Arnold, 2003.
26. Levine N. *CrimeStat III: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations*. Washington, DC: Ned Levine & Associates and the National Institute of Justice, 2002.
27. Ge Y., Mengdi S., and Yingxia P., Geographic information system-based edge effect correction for Ripley's K-function under irregular boundaries. *Geographical Research*. 2019; 57(4): 436–447.

28. Haase P., Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K-function: introduction and methods of edge correction. *Journal of Vegetation Science*. 1995; 6(4): 575–582.
29. Sterner R.W., Ribic C.A., and Schatz G.E., Testing for life historical changes in spatial patterns of four tropical tree species. *Journal of Ecology*. 1986; 74(3): 621–633.
30. Szwagrzyk J., and Czerwczak M., Spatial patterns of trees in natural forests of East-Central Europe. *Journal of Vegetation Science*. 1993; 4(4): 469–476.
31. Ripley B.D., Tests of 'randomness' for spatial point patterns. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. 1979; 41(3): 368–374.
32. World Bank. *Worldwide Governance Indicators (WGI)*. Washington, DC: World Bank, 2023.
33. Vidanapathirana M., Wang Y., Mclain A. et al. Cluster detection capabilities of the average nearest neighbor ratio (ANN) and Ripley's K function on areal data : an Empirical Assessment. *Geographical Analysis* 2021; 54(4): 702–723.
34. Lang G., Marcon E. Testing randomness in spatial point patterns with the Ripley's K-function. *ESAIM: Probability and Statistics* 2013; 17: 263–293.
35. Ben-Said M. Spatial point-pattern analysis as a powerful tool in identifying pattern–process relationships in plant ecology: an updated review. *Ecological Processes* 2021; 10: 56.
36. World Energy Council. *World Energy Trilemma Index 2022*. Από: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf (2022, ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2025)
37. Asia Pacific Energy Research Centre (APERC). *A Quest for Energy Security in the 21st Century*. Tokyo: APERC, 2007.
38. International Energy Agency (IEA). *Energy security in energy transitions*. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/energy-security-in-energy-transitions (2022, ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2025).
39. National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Energy security definition and factors*. www.nrel.gov/international/energy-security.html (2025, accessed 24 August 2025).

40. Dunnett S., Sorichetta A., Taylor G. et al. Harmonised global datasets of wind and solar farm locations and power. *Scientific Data* 2021; 8: 170.
41. Pelczar S. Understanding the spatial distribution of renewable power plants for predicting future cumulative impact on the environment: Case study of photovoltaic and wind power plants in Poland. *Renewable Energy* 2025; 234: 112345.
42. Xie L., Huang Y. and Qin P. Spatial distribution of coal-fired power plants in China. *RFF Working Paper* 2019; DP 19-12.
43. Crippa M., Guizzardi D. and Pagani F. et al. Insights into the spatial distribution of global, national, and regional power plants. *Earth System Science Data* 2024; 16: 2811–2832.
44. Le Coq C. and Paltseva E. Measuring the security of external energy supply in the European Union. *Energy Policy* 2009; 37(11): 4474–4481.
45. Boardman B. *Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth*. London: Belhaven Press, 1991.
46. International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2022*. Paris: IEA, 2022.
47. Eurostat. Energy productivity statistics. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat> (2023, accessed 4 September 2025).
48. World Bank. *Getting Electricity: System Average Interruption Duration Index (SAIDI)*. GovData360, 2022.
49. Siskos E. and Burgherr P. Multicriteria decision support for the evaluation of electricity supply resilience: Exploration of interacting criteria. *European Journal of Operational Research* 2022; 298(2), pp. 611-626.
50. ENTSO-E. *Statistical Factsheet 2020*. Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2020.
51. European Commission. *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*. Brussels: European Union, 2020.
52. EDGAR. *Emissions Database for Global Atmospheric Research (v8.0)*. European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2022.

53. IEA. (2022). Russia's War on Ukraine: Energy Security Implications. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine> (ανακτήθηκε Σεπτέμβριο 2025).
54. World Bank. (2023). Global Economic Prospects: Energy Market Implications of the War in Ukraine. Διαθέσιμο στο: <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects> (ανακτήθηκε Σεπτέμβριο 2025).
55. IEA. (χ.χ.). Renewable Integration. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/renewable-integration> (ανακτήθηκε Σεπτέμβριο 2025).
56. Schmitz R., Flachsbarth F., Plaga L. S., et al. Energy Security and Resilience: Reviewing Concepts and Advancing Planning Perspectives for Transforming Integrated Energy Systems. *Energy Policy*. 2025; 207: 114796.
57. Bilbao-Terol A., Cañal-Fernández V. and González-Pérez C. Evaluating Energy Security using Choquet Integral: analysis in the southern E.U. countries. *Annals of Operations Research*. 2023; 307: 114796.
58. Siskos, E., Desbordes, A., Burgherr, P., et al. Evaluation of energy security in Europe using a robust Choquet integral preference model, *Applied Energy*. 2025; Under review.
59. Gasser, P. A review on energy security indices to compare country performances. *Energy Policy*. 2020; 139, 111339.
60. Gasser, P., Lustenberger, P., Cinelli, M., et al. A review on resilience assessment of energy systems, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2019; 6(5), 273–299.
61. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (χ.χ.). Energy reliability and resilience. Διαθέσιμο στο: <https://www.energy.gov/eere/energy-reliability-and-resilience> (ανακτήθηκε Σεπτέμβριο 2025).

