



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Αποτίμηση διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υπό καιρική επικινδυνότητα



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Γεροντάτη

Επιβλέπων: Δημήτριος Βαμβάτσικος

Αθήνα, Ιούλιος 2021

EMK ME 2021/6

Γεροντάτη Αγγελική (2021)
Αποτίμηση διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υπό καιρική επικινδυνότητα
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2021/6
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Gerontati Angeliki (2021)
Risk assessment of power transmission lines under weather hazard
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2021/6
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Γεροντάτη Αγγελική, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Gerontati Angeliki, 2021

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
1 Εισαγωγή	5
1.1 Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	5
1.2 Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	6
1.3 Πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	8
1.4 Σκοπός και δομή εργασίας	10
2 Διακινδύνευση γραμμή μεταφοράς	11
2.1 Γενικά στοιχεία	11
2.2 Μεθοδολογία αποτίμησης διακινδύνευσης	13
2.3 Τρωτότητα	17
2.4 Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι	31
2.4.1 Άνεμος	31
2.4.2 Επίπαγος	33
2.4.3 Επεισόδια ακραίων φαινομένων	34
2.4.4 Στοχαστικός κατάλογος επεισοδίων ακραίων φαινομένων	34
3 Αποτελέσματα	39
3.1 Ακριβής μέθοδος υπολογισμού	39
3.2 Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού	41
3.3 Υπολογισμός κόστους αποκατάστασης	46
3.3.1 Annaberg-Buchholz	46
3.3.2 Erzgebirgskreis	51
4 Συμπεράσματα	57
5 Βιβλιογραφία	58

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2021/6

**Αποτίμηση διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υπό καιρική
επικινδυνότητα**

Γεροντάτη Α. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

Περίληψη

Αναπτύσσεται μεθοδολογία για την ακριβή αποτίμηση της διακινδύνευσης των γραμμών μεταφοράς ενέργειας υπό καιρική επικινδυνότητα. Ενώ συνήθως η αποτίμηση γίνεται μόνο βάσει των τρωτότερων πύργων ανάρτησης, στο παρόν λαμβάνονται υπόψη και οι ισχυρότεροι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες. Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο των αλυσιδωτών αστοχιών που οφείλονται σε πρωτογενή αστοχία ενός πυλώνα, καθώς και η αύξηση της τρωτότητας των γωνιακών πυλώνων από αστοχία γειτονικού πυλώνα ανάρτησης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε πέντε εναλλακτικές στρατηγικές αποκατάστασης μιας γραμμής μεταφοράς μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας, όπου έχει επέλθει διάβρωση στους πυλώνες συμβατικού χάλυβα S355. Η πρώτη περίπτωση αφορά την έλλειψη ουσιαστικών μέτρων αποκατάστασης, όπου απλά σταθεροποιείται η διάβρωση στο τρέχον επίπεδό της. Στη δεύτερη περίπτωση οι γωνιακοί πυλώνες ενισχύονται με ελάσματα ινοπλισμένου πολυμερούς. Η τρίτη θεωρεί την επαναφορά όλης της γραμμής μεταφοράς στην αρχική κατάσταση με αντικατάσταση κάθε πυλώνα με έναν πανομοιότυπο. Η τέταρτη αφορά την αντικατάσταση της γραμμής με πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα υψηλής αντοχής S460. Τέλος, εξετάζεται και η περίπτωση αντικατάστασης μόνο των πυλώνων ανάρτησης με καινούργιους από συμβατικό χάλυβα.

Για κάθε περίπτωση υπολογίζεται η ετήσια συχνότητα αστοχίας τόσο της γραμμής αλλά και διαφορετικών αριθμών πυλώνων, ώστε να εκτιμηθεί το άμεσο κόστος αποκατάστασης της γραμμής και το έμμεσο κόστος μη λειτουργίας ανά συμβάν, αλλά και το συνολικό κόστος κατά τη διάρκεια επιπλέον 60 ετών λειτουργίας. Συμπεραίνεται ότι η απλοποιημένη μεθοδολογία θεώρησης μόνο των πυλώνων ανάρτησης παράγει σαφώς πιο συντηρητικά αποτελέσματα, συχνά οδηγώντας σε πιο κοστοβόρες στρατηγικές αποκατάστασης. Ωστόσο, ανεξαρτήτως μεθόδου υπολογισμού, όσο αυξάνεται ο πληθυσμός των εξυπηρετούμενων κατοίκων και κατ' επέκταση οι έμμεσες απώλειες που οφείλονται σε διακοπές ηλεκτροδότησης, τόσο ελκυστικότερες γίνονται οι επενδύσεις σε βαρύτερες και πιο αξιόπιστες μορφές αποκατάστασης.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

POSTGRADUATE THESIS
EMK ME 2021/6

Risk assessment of power transmission lines under weather hazard

Gerontati Angeliki (supervised by Vamvatsikos D.)

Abstract

A methodology is developed to assess the risk of power transmission lines under weather hazard. Usually, risk assessment is based only on the most vulnerable support towers of the line, while herein the stronger dead-end/angle towers are also considered. In addition, the phenomenon of cascading failures due to primary failure of a tower is considered, as well as the increase of the vulnerability of dead-end/angle towers due to failure of an adjacent support tower. The methodology is applied to five alternative rehabilitation strategies of a transmission line after many years of operation, where corrosion has occurred in S355 conventional steel pylons. The first case investigates the existing power transmission line without taking remedial measures; the corrosion of the towers is simply stabilized at its current level. In the second case, the dead-end/angle towers are strengthened via fiber reinforced polymer stripes. The third considers restoring the entire transmission line to its original state by replacing each tower with an identical one. The fourth concerns the replacement of the line with towers constructed from high-strength steel S460. Finally, the case of replacing only the support towers with new ones made of conventional steel is also considered.

The mean annual frequency of failure of the line and of different numbers of towers is calculated for each case, in order to estimate the direct cost of repairing the line and the indirect cost of non-operation per event, as well as the total cost during an additional operational lifetime of 60 years. It is concluded that the simplified methodology of considering only support towers produces clearly more conservative results, often leading to more costly recovery strategies. However, regardless of the calculation method, the larger the population of serviced residents and consequently the indirect losses due to power outages, the more attractive it becomes to invest in heavier and more reliable forms of rehabilitation.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου κ. Βαμβάτσικο Δημήτριο για την εξαιρετική συνεργασία και την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

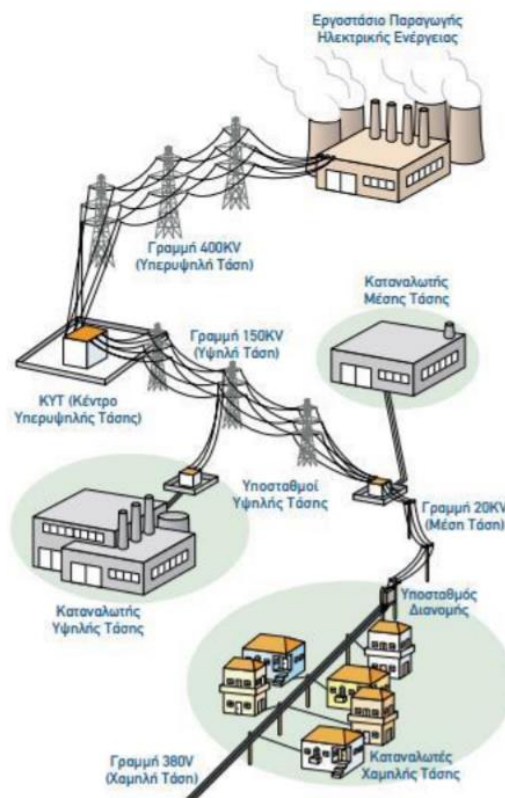
Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Μπιλιώνη Δημήτριο για την παραχώρηση όλων των απαραίτητων πληροφοριών για τις καμπύλες τρωτότητας των πυλώνων που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την οικογένεια μου που όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, με στηρίζει και είναι δίπλα μου.

1 Εισαγωγή

1.1 Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η εξέλιξη του σύγχρονου πολιτισμού είναι συνυφασμένη με την ηλεκτρική ενέργεια, γι' αυτό τόσο η παραγωγή όσο και η μεταφορά της είναι ζητήματα ζωτικής σημασίας. Η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές πραγματοποιείται με ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 1-1). Το σύστημα μεταφοράς ενέργειας αποτελείται από το σταθμό παραγωγής, τις γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής/υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς και το σύστημα διανομής ενέργειας.



Σχήμα 1-1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

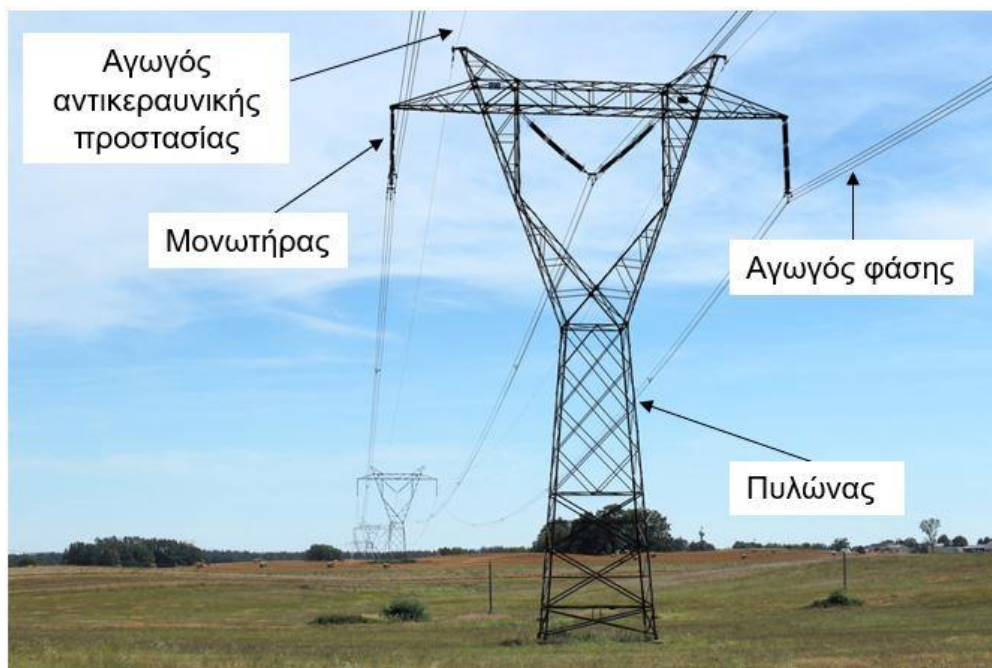
Η ηλεκτρική ενέργεια αρχικά παράγεται στους σταθμούς παραγωγής. Από τους σταθμούς παραγωγής ξεκινάει η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλές τάσεις και οι λόγοι είναι κυρίως οικονομικοί. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται σ' αυτή την περίπτωση έχουν μικρότερες διατομές, με αποτέλεσμα οικονομία υλικού και μικρότερες απώλειες ισχύος λόγω της μικρότερης έντασης του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια να μην μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλές τάσεις (220/380V). Η διάκριση των γραμμών μεταφοράς και διανομής γίνεται με βάση τις τιμές της ηλεκτρικής τάσης. Αρχικά, η ηλεκτρική ενέργεια ταξιδεύει μέσω της γραμμής μεταφοράς και φθάνει στους υποσταθμούς, όπου γίνεται ο πρώτος υποβιβασμός της τάσης του δικτύου. Συνεχίζοντας από τους υποσταθμούς μεταφοράς, η ηλεκτρική ενέργεια ταξιδεύει μέσω των γραμμών διανομής και καταλήγει στους αντίστοιχους

υποσταθμούς, όπου γίνεται ο επόμενος υποβιβασμός της τάσης στο επίπεδο των καταναλωτών.

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν ιδιαίτερη σημασία για το σύστημα μεταφοράς ενέργειας, διότι μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες. Η διαδρομή των γραμμών μεταφοράς ξεκινάει από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και φτάνει σε μεγάλα κέντρα ηλεκτρικής κατανάλωσης (μεγάλες πόλεις, βιομηχανικά συγκροτήματα) με αποτέλεσμα το μήκος τους να φτάνει μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Στην επόμενη ενότητα αναλύονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς ενέργειας.

1.2 Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πυλώνες στους οποίους στηρίζονται μονωτήρες. Οι μονωτήρες με την σειρά τους στηρίζουν τους αγωγούς για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και όπως δηλώνει το όνομα τους εξασφαλίζουν την μόνωση τους ως προς την Γη. Το σύστημα που περιγράφεται εικονίζεται στο Σχήμα 1-2. Εκτός από αυτά τα στοιχεία, οι γραμμές μεταφοράς περιλαμβάνουν μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της ηλεκτρικής τάσης καθώς και συστήματα ελέγχου και προστασίας. Τα συστήματα αυτά έχουν ως στόχο την έγκαιρη προειδοποίηση για πιθανά σφάλματα που πιθανόν να συμβούν, διασφαλίζοντας την καλή λειτουργία των γραμμών μεταφοράς ενέργειας.



Σχήμα 1-2: Στοιχεία πυλώνα μεταφοράς

Υπάρχει πληθώρα γεωμετριών γραμμών μεταφοράς ενέργειας, η μορφή των οποίων καθορίζεται κυρίως από τεχνικοοικονομικές μελέτες λαμβάνοντας υπόψη τα εξής: την τάση, την ισχύ, τη διάταξη των αγωγών, τον διαθέσιμο χώρο, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τις μηχανικές καταπονήσεις και την κίνηση των αγωγών υπό τις διάφορες συνθήκες, π.χ. το

κατά πόσο ταλαντώνεται ο αγωγός. Στην συνέχεια παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς.

Οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται ανάλογα με τον αριθμό των κυκλωμάτων (Σχήμα 1-3) σε:

- Απλού κυκλώματος (ένα τριφασικό κύκλωμα)
- Διπλού κυκλώματος (δύο τριφασικά κυκλώματα)

Το επίπεδο της τάσης είναι η κυριότερη παράμετρος που καθορίζει τον αριθμό των κυκλωμάτων. Λόγοι όπως η μεταφερόμενη ισχύς, η ευστάθεια και η εφεδρεία επιβάλλουν συχνά την ανάγκη σχεδιασμού πυλώνων μονού ή πολλαπλού κυκλώματος. Οι γραμμές διπλού κυκλώματος, στις οποίες δύο ανεξάρτητα κυκλώματα φέρονται σε κοινούς πυλώνες, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρομών διελεύσεως, όπως σε περιπτώσεις ορεινού χαρακτήρα του εδάφους ή και για λόγους μικρότερου κόστους μεταφοράς. Εκτός από καλώδια φάσεων υπάρχει πάντα και ένας αγωγός αντικεραυνικής προστασίας.



(a)

(b)

Σχήμα 1-3: (a) Απλό κύκλωμα (b) Διπλό κύκλωμα

Όσον αφορά το επίπεδο της τάσης που μεταφέρουν οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται σε υψηλής ή υπερυψηλής τάσης.

Η διάκριση των γραμμών γίνεται ακόμα με βάση τη δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε:

- Ελαφρού τύπου (E)
- Βαρέως τύπου (B)
- Υπερβαρέως τύπου (B'B') (δίδυμος αγωγός ανά φάση) & (B'B'B') (τρίδυμος αγωγός ανά φάση)

Οι γραμμές υψηλής τάσης ελαφρού και βαρέως τύπου είναι απλού κυκλώματος και αποτελούνται από δύο αγωγούς φάσης, ενώ οι υπερβαρέως τύπου είναι διπλού κυκλώματος και αποτελούνται από έναν αγωγό φάσης.

Οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας αποτελούν το μέσο μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος και λειτουργούν υπό υψηλές τάσεις. Αυτό τις καθιστά επικίνδυνες για την ανθρώπινη ζωή με αποτέλεσμα να διαχωρίζονται επιπλέον ως εξής:

- Εναέρια γραμμή μεταφοράς
- Υπόγεια γραμμή μεταφοράς
- Γραμμή μεταφοράς με χρήση κατάλληλου περιβλήματος στους αγωγούς

Οι εναέρια γραμμές αναρτώνται από μονωτήρες που με τη σειρά τους αναρτώνται από πυλώνες, οι οποίοι είναι συνήθως χαλύβδινα δικτυώματα. Εξαιτίας της διάταξης των γραμμών μεταφοράς, οι πυλώνες αποτελούν το κύριο αντικείμενο ενδιαφέροντος στην εκτίμηση της συμπεριφοράς τους.

1.3 Πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι πυλώνες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από μεταλλικά τμήματα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και ξύλινοι στύλοι. Στις γραμμές υπερυψηλής/υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται μεταλλικοί πυλώνες υπό μορφή δικτυωμάτων. Οι πυλώνες έχουν σημαντικό ύψος, ώστε οι αγωγοί να απέχουν απόσταση από το έδαφος. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πύργων εξαρτάται από το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου που σχηματίζει ο αναρτημένος αγωγός. Για χαλύβδινους πυλώνες σε γραμμές υψηλής τάσεως, το άνοιγμα μεταξύ των πύργων κυμαίνεται από 330-400m. Οι διαστάσεις των πυλώνων καθορίζονται ανάλογα με την αποστολή τους.

Ακόμα, οι πυλώνες διακρίνονται ανάλογα με την θέση τους στη γραμμή μεταφοράς (Σχήμα 1-4) σε:

- Πυλώνες ανάρτησης ή κανονικούς πυλώνες: τοποθετούνται ενδιάμεσα σε ευθύγραμμα τμήματα της γραμμής μεταφοράς
- Γωνιακούς πυλώνες: τοποθετούνται στα σημεία όπου αλλάζει κατεύθυνση η γραμμή και
- Τερματικούς πυλώνες: τοποθετούνται στα άκρα της γραμμής μεταφοράς



(a)

(b)

Σχήμα 1-4: (a) Γωνιακός πυλώνας (b) Πυλώνας ανάρτησης

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η βασική διαφορά των πυλώνων ανάρτησης και των γωνιακών/τερματικών πυλώνων είναι τα φορτία που παραλαμβάνουν, γι' αυτό το σκοπό αλλάζει η διάταξη των στοιχείων από τα οποία απαρτίζονται. Οι μονωτήρες στους πυλώνες ανάρτησης έχουν κατακόρυφη διεύθυνση και συγκρατούν τα καλώδια με σκοπό μόνο την ανάρτησή τους και την μεταφορά φορτίων κάθετα σ' αυτά, αντίθετα οι τερματικοί/γωνιακοί πυλώνες έχουν μονωτήρες παράλληλους στη διεύθυνση των αγωγών ώστε να μπορούν να φέρουν δυνάμεις κατά μήκος αυτών.

Η αστοχία ενός πυλώνα μεταφοράς μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας ολόκληρη τη γραμμή μεταφοράς με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημαντικές διακοπές ηλεκτροδότησης οι οποίες επιφέρουν οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Από την εμπειρία έχει παρατηρηθεί ότι η αστοχία ενός πυλώνα μπορεί να οδηγήσει σε αλυσιδωτές αστοχίες των γειτονικών πυλώνων.

1.4 Σκοπός και δομή εργασίας

Είναι γνωστό από την εμπειρία ότι οι πυλώνες μεταφοράς ενέργειας είναι ευάλωτοι σε καιρικούς κινδύνους και κυρίως τον άνεμο. Ισχυρές ταχύτητες του ανέμου οδηγούν τους πυλώνες σε τοπικές αστοχίες ή ακόμα και ολική κατάρρευση και κατ' επέκταση σε διακοπή της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Πληθώρα μελετών, που εξετάζουν πιθανοτικά την διακινδύνευση γραμμών μεταφοράς εξαιτίας του ανέμου έχουν πραγματοποιηθεί [1]-[6]. Υπάρχουν μελέτες [7] στις οποίες λαμβάνονται υπόψη μόνο οι πυλώνες ανάρτησης των γραμμών μεταφοράς. Άλλες μελέτες λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους όπως η διεύθυνση του ανέμου, η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την τρωτότητα των πυλώνων. Καιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν ακόμα τις γραμμές είναι το χιόνι και κατ' επέκταση ο πάγος που σχηματίζεται εξαιτίας ακραίων θερμοκρασιών [8], [9].

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις αλυσιδωτές αστοχίες των πυλώνων. Οι πυλώνες συνδέονται μεταξύ τους μέσω αγωγών με αποτέλεσμα η πρωτογενής κατάρρευση ενός πυλώνα να οδηγεί σε πιθανή κατάρρευση των γειτονικών. Η μελέτη αυτού του φαινομένου έχει ληφθεί κυρίως υπόψη σε διάφορες εργασίες με την χρήση γράφων [10]-[14], είτε με την αναλυτική τρισδιάστατη προσομοίωση τμημάτων της γραμμής μεταφοράς σε προγράμματα αναλύσεων [8], διαδικασίες ιδιαίτερα απαιτητικές και χρονοβόρες.

Η παρούσα εργασία επιδιώκει την ανάπτυξη μεθοδολογίας που έχει ως στόχο την αποτίμηση της διακινδύνευσης των γραμμών μεταφοράς υπό καιρική διακινδύνευση, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές κατηγορίες πυλώνων και πιθανές αλυσιδωτές αστοχίες των πυλώνων αυτών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία εκτιμάται η ετήσια συχνότητα αστοχίας πέντε στρατηγικές περιπτώσεις αποκατάστασης της ίδιας γραμμής μεταφοράς ενέργειας στη Γερμανία. Η κάθε στρατηγική ενέργεια αποτελείται από πυλώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά και αντοχές και κατ' επέκταση διαφορετικές τρωτότητες έναντι των καιρικών κινδύνων. Για την κάθε εξεταζόμενη περίπτωση εκτιμάται το συνολικό κόστος αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς ύστερα από 60 έτη λειτουργίας και επιλέγεται η βέλτιστη στρατηγική αποκατάστασης.

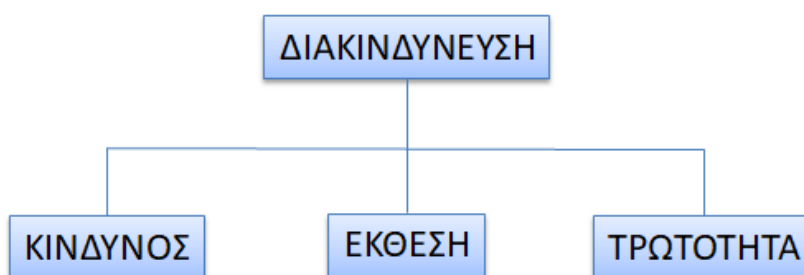
Η μελέτη χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπό καιρική επικινδυνότητα, λαμβάνοντας υπόψη τις αλυσιδωτές αστοχίες των πυλώνων. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται η τοπολογία της γραμμής μεταφοράς ενέργειας στην οποία εφαρμόζεται η μεθοδολογία, παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας των πυλώνων από τους οποίους απαρτίζεται η γραμμή μεταφοράς καθώς και ο στοχαστικός κατάλογος που περιλαμβάνει τους περιβαλλοντικούς κινδύνους στους οποίους εκτίθεται.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις πέντε εναλλακτικές μεθόδους αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς ενέργειας. Δίνεται η εκτίμηση της ετήσιας συχνότητας αστοχίας για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις και ο υπολογισμός του συνολικού κόστους αποκατάστασης σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο καθώς και την απλοποιημένη μέθοδο η οποία θεωρεί ότι όλοι οι πυλώνες της γραμμής είναι πυλώνες ανάρτησης. Τέλος, επιλέγεται η βέλτιστη στρατηγική αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογισμένα συνολικά κόστη.

2 Διακινδύνευση γραμμή μεταφοράς

Σε αντίθεση με το σχεδιασμό ο οποίος αναφέρεται σε έργα που πρόκειται να κατασκευαστούν, η αποτίμηση στοχεύει στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς έργων που έχουν ήδη κατασκευαστεί. Σκοπός της αποτίμησης είναι να εκτιμηθεί ο βαθμός βλάβης που θα υποστεί μια κατασκευή ή ένα δίκτυο για δεδομένο επίπεδο κινδύνου. Η διακινδύνευση εκφράζει τις πιθανές απώλειες που οφείλονται σε άμεσες συνέπειες, όπως οι βλάβες των επιμέρους κατασκευών της γραμμής μεταφοράς στην προκειμένη.

Η αποτίμηση της διακινδύνευσης βασίζεται σε τρεις επιμέρους παράγοντες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υπό καιρική επικινδυνότητα, συνεπώς το βασικό αντικείμενο μελέτης είναι οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, γίνεται ανάλυση των περιβαλλοντικών κινδύνων, πρακτικά πρόκειται για την εκτίμηση της καιρικής επικινδυνότητας που επηρεάζει την εξεταζόμενη περιοχή (Ενότητα 2.4). Στη συνέχεια γίνεται η απογραφή των εκτεθειμένων στοιχείων της γραμμής που βρίσκονται υπό την επίδραση αυτών των συνθηκών και τέλος γίνεται η εκτίμηση της τρωτότητας τους (Ενότητα 2.3).

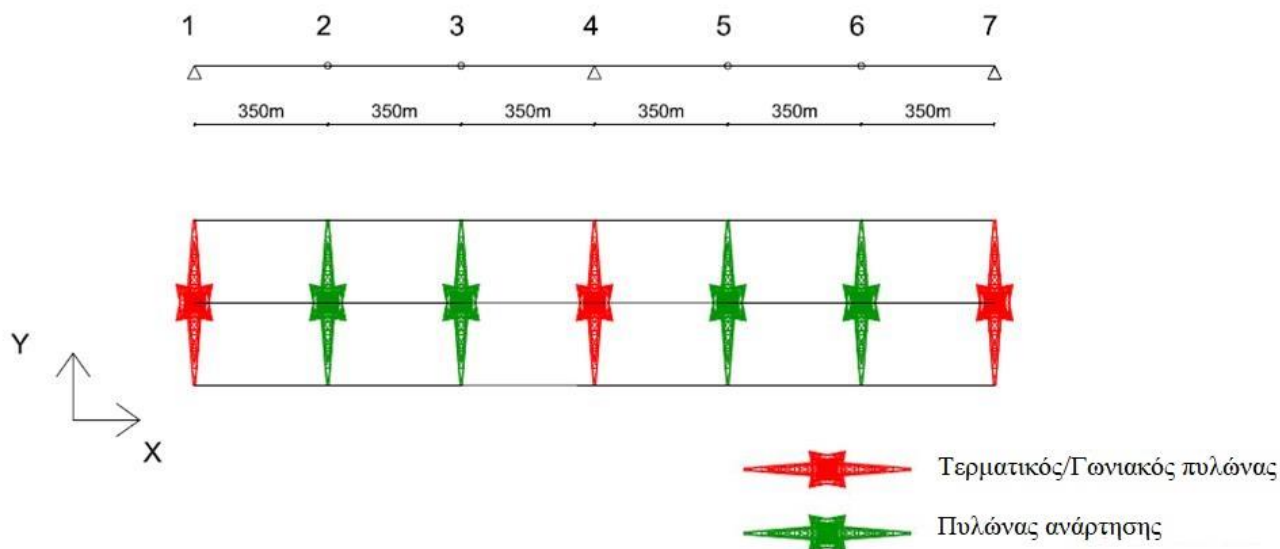


Σχήμα 2-1: Παράμετροι διακινδύνευσης

Η εκτίμηση της διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ενέργειας με βάση την μεθοδολογία που προτείνεται βασίζεται αποκλειστικά στην συμπεριφορά των πυλώνων μεταφοράς και αγνοούνται επιμέρους στοιχεία, όπως η αστοχία των αγωγών, η οποία επηρεάζει την αξιοπιστία τους.

2.1 Γενικά στοιχεία

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί μια υποθετική γραμμή μεταφοράς, η οποία εδράζεται στην περιοχή Annaberg-Buchholz της Γερμανίας (Σχήμα 2-2). Η απλοποιημένη γραμμή μεταφοράς αποτελείται συνολικά από 7 πυλώνες (Πίνακας 2-1), από τους οποίους 3 είναι τερματικοί/γωνιακοί (κόκκινο χρώμα) και 4 είναι πυλώνες ανάρτησης (πράσινο χρώμα). Η γραμμή έχει συνολικό μήκος 2100m και αποτελείται από 6 διαδοχικά ανοίγματα μήκους 350m.



Σχήμα 2-2: Γραμμή μεταφοράς ενέργειας Annaberg-Buchholz

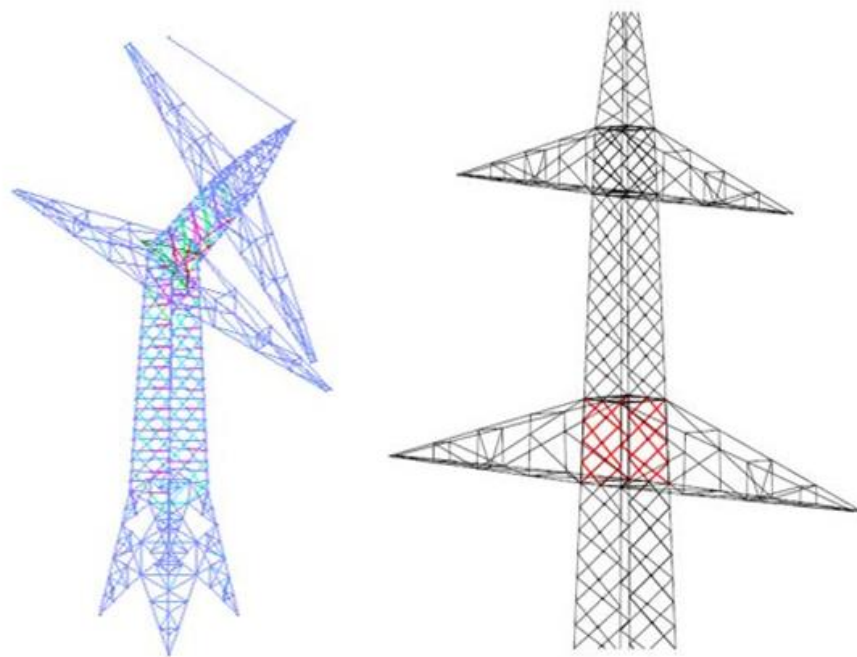
Πίνακας 2-1: Είδος πυλώνων	
Πυλώνας	Τύπος πυλώνα
1	Γωνιακός/Τερματικός
2	Ανάρτησης
3	Ανάρτησης
4	Γωνιακός/Τερματικός
5	Ανάρτησης
6	Ανάρτησης
7	Γωνιακός/Τερματικός

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές με τις οποίες μπορεί να περιοριστεί η διακινδύνευση μιας κατασκευής σ' έναν συγκεκριμένο κίνδυνο, είτε να μην τοποθετηθεί εξ' αρχής η κατασκευή σε περιοχές όπου θα είναι εκτεθειμένη σ' αυτόν τον κίνδυνο ή να μειωθεί η τρωτότητα της. Η εκτίμηση της διακινδύνευσης της εικονιζόμενης στο Σχήμα 2-2 γραμμής μεταφοράς επαναλαμβάνεται πέντε φορές (Πίνακας 2-2). Αρχικά, θεωρείται ότι η γραμμή αποτελείται από γωνιακούς/τερματικούς και πυλώνες ανάρτησης κατασκευασμένους από χάλυβα S355 ύστερα από 60 έτη ωφέλιμης ζωής. Στην περίπτωση αυτή η διάβρωση των πυλώνων έχει οδηγήσει σε μείωση του πάχους των διατομών κατά 0.3mm. Έπειτα, εξετάζεται η ενίσχυση μόνο των γωνιακών/τερματικών πυλώνων με ανθρακοελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, η ενίσχυση γίνεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή του πυλώνα (Σχήμα 2-3). Η περιοχή αυτή έχει παρατηρηθεί ότι αποτελεί την κύρια θέση αστοχίας των πυλώνων. Ακολουθεί η μελέτη της γραμμής στην οποία οι πυλώνες αντικαθίστανται με όμοιους από συμβατικό χάλυβα στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους. Έπειτα εξετάζεται η περίπτωση μιας γραμμής μεταφοράς με πυλώνες όμοιας γεωμετρίας με την προηγούμενη περίπτωση, με τη βασική διαφορά ότι τα μεταλλικά στοιχεία στη βάση καθώς και τα

διαγώνια στοιχεία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα υψηλής αντοχής S460. Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση όπου η γραμμή αποτελείται από διαβρωμένους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες και πυλώνες ανάρτησης κατασκευασμένους από χάλυβα S355 στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους.

Πίνακας 2-2: Είδος πυλώνα σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση

Περίπτωση	Πυλώνες	
	Γωνιακοί/Τερματικοί	Ανάρτησης
1	Διαβρωμένοι	Διαβρωμένοι
2	Ενισχυμένοι με FRP	Διαβρωμένοι
3	Συμβατικοί	Συμβατικοί
4	Υψηλής αντοχής	Υψηλής αντοχής
5	Διαβρωμένοι	Συμβατικοί



Σχήμα 2-3: Περιοχή ενίσχυσης: Τα μέλη με κόκκινο χρώμα (δεξιά) ενισχύονται με ανθρακοελάσματα

2.2 Μεθοδολογία αποτίμησης διακινδύνευσης

Ακολουθεί η περιγραφή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της διακινδύνευσης γραμμών μεταφοράς ενέργειας υπό καιρική επικινδυνότητα. Τα βήματα είναι τα ακόλουθα:

ΒΗΜΑ 1: Προσδιορισμός όλων των πυλώνων στη γραμμή μεταφοράς ενέργειας και ο χαρακτηρισμός τους ως γωνιακοί/τερματικοί ή πυλώνες ανάρτησης αντίστοιχα.

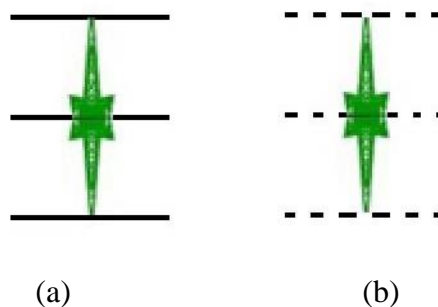
ΒΗΜΑ 2: Εκτίμηση καμπυλών τρωτότητας για κάθε κατηγορία πυλώνα.

ΒΗΜΑ 3: Εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας του πυλώνα για συγκεκριμένο μέτρο έντασης με βάση την αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας.

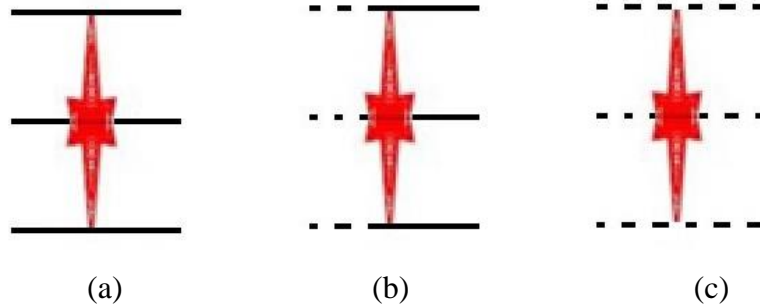
ΒΗΜΑ 4: Παραγωγή N τυχαίων τιμών (0 ή 1) για κάθε πυλώνα με βάση την εκάστοτε πιθανότητα αστοχίας (Βήμα 3) και την κατανομή Bernoulli. Σε περίπτωση που η τιμή είναι ίση με 1 τότε θεωρείται ότι ο πυλώνας καταρρέει και το αντίστροφο.

ΒΗΜΑ 5: Μετάδοση της αστοχίας λόγω πρωτογενούς αστοχίας των γειτονικών πυλώνων. Όταν ένας πυλώνας (γωνιακός/τερματικός ή ανάρτησης) καταρρέει, τότε συμπαρασύρει σε κατάρρευση όλους τους γειτονικούς πυλώνες ανάρτησης. Οι αλυσιδωτές αστοχίες σταματούν στους γωνιακούς/τερματικούς που περιστοιχίζουν τον πυλώνα από όπου ξεκίνησε η αρχική κατάρρευση.

ΒΗΜΑ 6: Αλλαγή της κατηγορίας βλαβών των πυλώνων. Όταν ένας πυλώνας δεν έχει καταρρεύσει ή ένας γωνιακός/τερματικός πυλώνας είναι λειτουργικός και έχουν καταρρεύσει όλοι οι γειτονικοί του πυλώνες ανάρτησης, τότε εντάσσεται στην κατάσταση βλαβών 0. Στην περίπτωση που ένας γωνιακός/τερματικός πυλώνας είναι λειτουργικός και έχει καταρρεύσει μόνο ένας γειτονικός του πυλώνας ανάρτησης, τότε εντάσσεται στην κατάσταση βλαβών 1. Η αλλαγή της κατάστασης βλαβών γίνεται ώστε να ληφθούν οι αλλαγές στην τρωτότητα των πυλώνων αυτών. Τέλος, αν οποιοσδήποτε πυλώνας αστοχήσει εντάσσεται στην κατάσταση βλαβών 2. Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται οι κατηγορίες βλαβών των πυλώνων ανάρτησης και στο Σχήμα 2-5 οι αντίστοιχες για τους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες.



Σχήμα 2-4: (a) Κατάσταση βλαβών 0 (b) Κατάσταση βλαβών 2 πυλώνων ανάρτησης



Σχήμα 2-5: (a) Κατάσταση βλαβών 0 (b) Κατάσταση βλαβών 1 (c) Κατάσταση βλαβών 2
τερματικών/γωνιακών πυλώνων

ΒΗΜΑ 7: Έλεγχος αστοχίας των γωνιακών/τερματικών πυλώνων που ανήκουν στην κατάσταση βλαβών 1 για το ίδιο μέτρο έντασης. Οι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες γύρω από τους οποίους έχει αστοχήσει κάποιος πυλώνας ανάρτησης είναι πλέον έκκεντρα φορτισμένοι με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι τρωτότητες τους. Εξετάζεται λοιπόν για το ίδιο μέτρο έντασης που αστοχήσαν οι αρχικοί πυλώνες αν θα αστοχήσουν πλέον και οι γωνιακοί/τερματικοί.

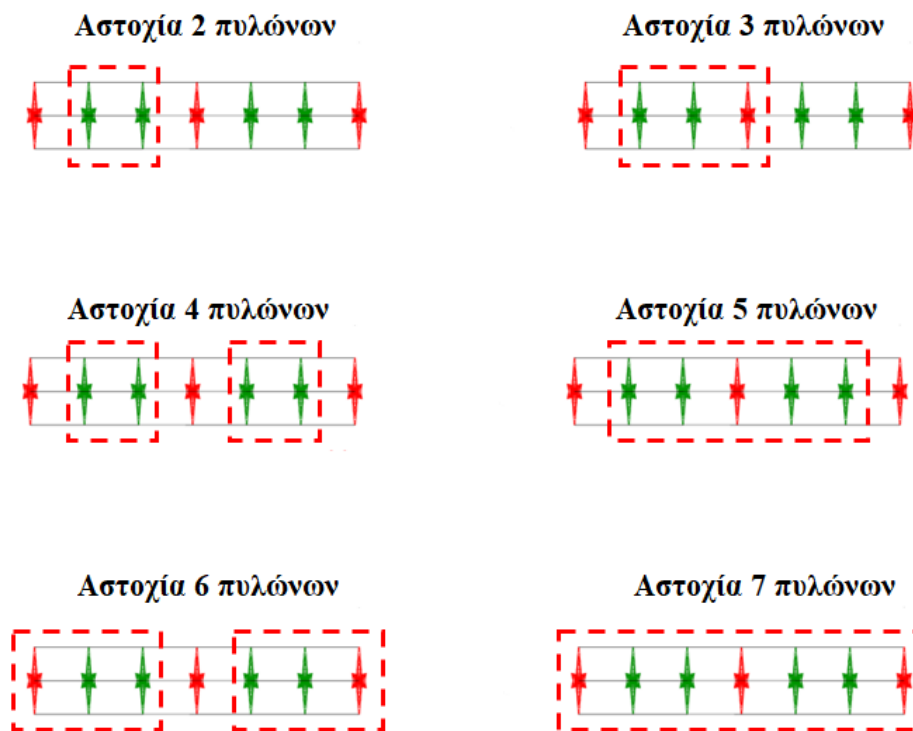
ΒΗΜΑ 8: Έλεγχος αστοχίας έστω και ενός πυλώνα στην γραμμή μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας είναι σειριακά συστήματα με αποτέλεσμα όταν αστοχεί έστω και ένας πυλώνας να σταματήσει η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και να θεωρείται αστοχία ολόκληρης της γραμμής μεταφοράς ενέργειας.

$$L = \begin{cases} 0: \text{Λειτουργία γραμμής μεταφοράς} \\ 1: \text{Αστοχία γραμμής μεταφοράς} \end{cases}$$

ΒΗΜΑ 9: Εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας της γραμμής μεταφοράς. Η πιθανότητα αστοχίας P_C (Εξίσωση 1) υπολογίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των αστοχιών της γραμμής προς τον συνολικό αριθμό των προσομοιώσεων N .

$$P_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \quad (1)$$

ΒΗΜΑ 10: Εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας ομάδων πυλώνων (Σχήμα 2-6). Εκτός από την ετήσια συχνότητα της γραμμής μεταφοράς, εξετάζεται ποιοι είναι οι κρίσιμοι πυλώνες στη γραμμή. Εξαιτίας των αλυσιδωτών αστοχιών αυτοί εμφανίζονται σε ομάδες αστοχίας. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από δύο πυλώνες, η δεύτερη ομάδα από τρεις κ.ο.κ. Ο τρόπος υπολογισμού είναι όμοιος μ' αυτόν της πιθανότητας αστοχίας της γραμμής μεταφοράς ενέργειας στο Βήμα 9.



Σχήμα 2-6: Ομάδες πυλώνων που αστοχούν

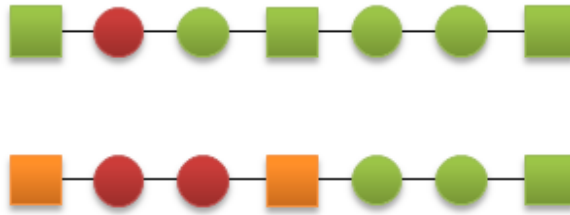
Όσον αφορά το Σχήμα 2-6, επισημαίνεται ότι δεν μπορεί να υπάρξει αστοχία ενός μόνο πυλώνα, εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο έχουν ληφθεί υπόψη οι διαδοχικές αστοχίες στην μεθοδολογία που παρουσιάστηκε. Επιπλέον όσον αφορά τις ομάδες αστοχίας 2 και 3 πυλώνων ισχύουν τα ίδια σχήματα και για τους συμμετρικούς ως προς τον κεντρικό της γραμμής πυλώνα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο παράδειγμα επεξήγησης της παραπάνω μεθοδολογίας. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως για την κατηγοριοποίηση των πυλώνων αλλάζει. Οι τερματικοί/γωνιακοί πυλώνες απεικονίζονται με τετράγωνα σχήματα και οι πυλώνες ανάρτησης με κυκλικά. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι πυλώνες που ανήκουν στην κατάσταση βλαβών 0, με πορτοκαλί οι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες που ανήκουν στην κατάσταση βλαβών 1 και τέλος με κόκκινο οι πυλώνες που έχουν καταρρεύσει (κατάσταση βλαβών 2).



Σχήμα 2-7: Αρχική κατάσταση γραμμής μεταφοράς ενέργειας

Στο Σχήμα 2-7 απεικονίζεται η γραμμή μεταφοράς ενέργειας στην οποία δεν έχει καταρρεύσει κανένας πυλώνας. Στη συνέχεια θεωρείται ότι για κάποιο μέτρο έντασης αστοχεί κάποιος πυλώνας ανάρτησης. Ο πυλώνας ανάρτησης που αστοχεί αρχικά συμπαρασύρει τους διπλανούς πυλώνες ανάρτησης σε κατάρρευση. Παράλληλα οι τερματικοί/γωνιακοί πυλώνες που τους περικλείουν αλλάζουν κατάσταση βλάβης.



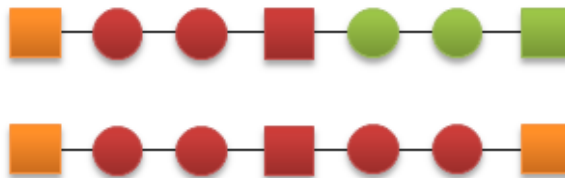
Σχήμα 2-8: Διαδοχική αστοχία και αλλαγή κατάστασης πυλώνων

Έπειτα, ελέγχεται αν θα αστοχήσουν οι τερματικοί/γωνιακοί πυλώνες που έχουν αλλάξει κατάσταση βλάβης υπό το ίδιο μέτρο έντασης. Αν αστοχήσει ο τερματικός πυλώνας, που βρίσκεται αριστερά από τον αρχικό πυλώνα που κατέρρευσε αρχικά, τότε οι αλυσιδωτές αστοχίες σταματούν και η ανάλυση για το υπόψιν εντατικό μέγεθος φόρτισης τελειώνει (Σχήμα 2-8).



Σχήμα 2-9: Αστοχία τερματικού πυλώνα

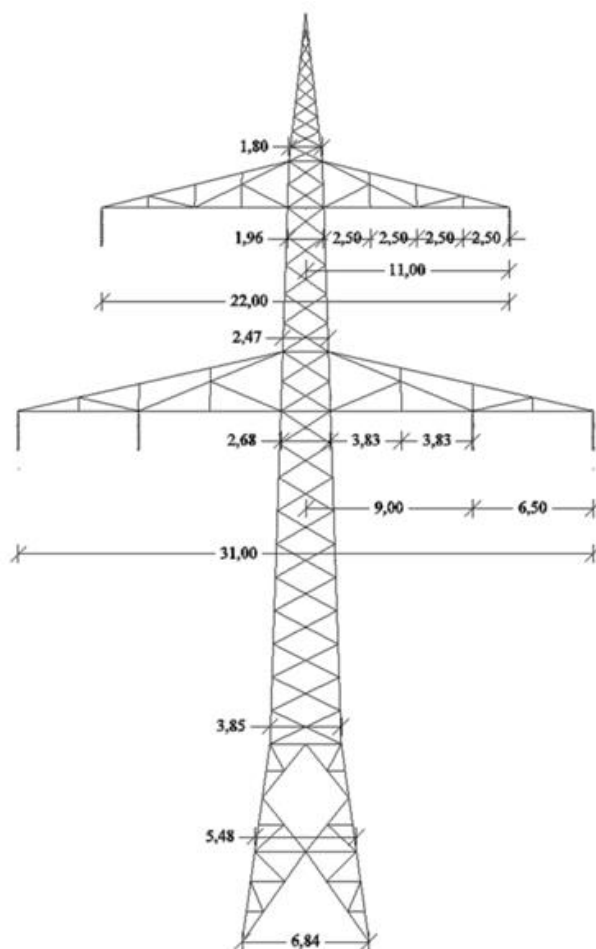
Αντίθετα αν αστοχήσει ο γωνιακός πυλώνας, τότε θα συμπαράσυρει και τους υπόλοιπους πυλώνες ανάρτησης. Αναλογικά αλλάζει κατηγορία βλάβης ο τερματικός πυλώνας δεξιά και ελέγχεται και πάλι αν θα αστοχήσει (Σχήμα 2-10). Αν δεν αστοχήσει η ανάλυση λαμβάνει τέλος για το συγκεκριμένο εντατικό μέγεθος φόρτισης που εξετάζεται.



Σχήμα 2-10: Αστοχία γωνιακού πυλώνα

2.3 Τρωτότητα

Οι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες και οι πυλώνες ανάρτησης που απαρτίζουν την εξεταζόμενη γραμμής μεταφοράς έχουν την ίδια γεωμετρία (Σχήμα 2-11) και συνολικό ύψος 50m. Η διατομή των πυλώνων στη βάση είναι τετραγωνική (6.84m x 6.84m) και μειώνεται σταδιακά καθ' ύψος. Κάθε πυλώνας φέρει 2 τριφασικά κυκλώματα και κάθε φάση αποτελείται από αγωγούς τύπου 264-AL1/34-ST1A [15], καθώς και έναν αγωγό αντικεραυνικής προστασίας κατηγορίας 94-AL1/15-ST1A [15].



Σχήμα 2-11: Γεωμετρία πυλώνα

Μια βασική συνιστώσα για την εκτίμηση της διακινδύνευσης της γραμμής μεταφοράς ενέργειας είναι η εκτίμηση της τρωτότητας των στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Στην παρούσα μελέτη, επιλέγεται να εξεταστούν ως βασικά στοιχεία οι πυλώνες μεταφοράς και γι' αυτούς εξετάζονται οι καμπύλες τρωτότητας που θα αξιοποιηθούν στην συνέχεια.

Οι καμπύλες τρωτότητας περιγράφουν την πιθανότητα υπέρβασης οριακών καταστάσεων μιας κατασκευής για δεδομένο μέτρο έντασης. Στην παρούσα εργασία ως τρωτότητα των πυλώνων ορίζεται η πιθανότητα αστοχίας δεδομένης της ταχύτητας ανέμου. Η καμπύλη τρωτότητας ορίζεται από μια λογαριθμοκανονική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

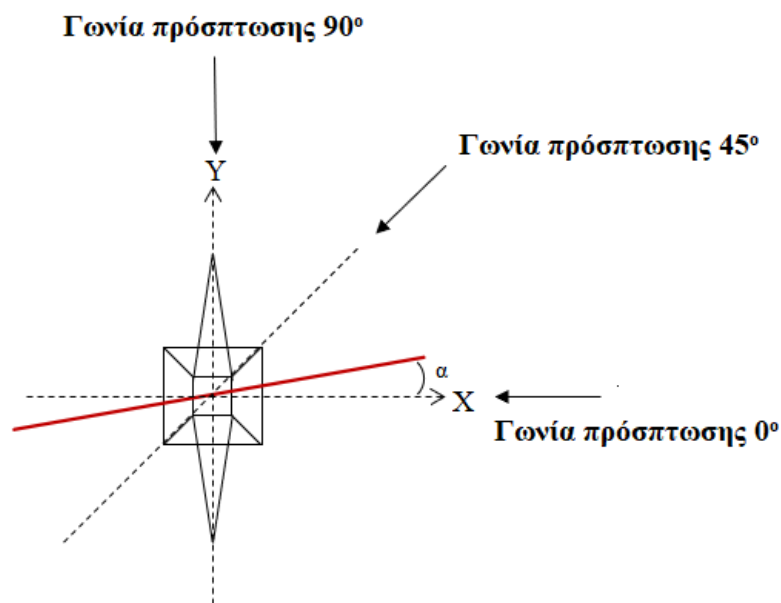
$$P(C|IM = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right) \quad (2)$$

Η σχέση $P(C|IM = x)$ εκφράζει την πιθανότητα να αστοχήσει ο πυλώνας όταν το μέτρο έντασης, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου στην συγκεκριμένη μελέτη λαμβάνει την τιμή x . Η σχέση $\Phi(\cdot)$ αναπαριστά τη συνάρτηση αθροιστικής κανονικής κατανομής (cumulative distribution function, CDF), η τιμή θ τη διάμεσο της καμπύλης τρωτότητας δηλαδή την τιμή της ταχύτητας ανέμου που αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα αστοχίας του πυλώνα και η τιμή

β αναπαριστά την τυπική απόκλιση του φυσικού λογάριθμου της ταχύτητας ανέμου ή όπως αλλιώς ονομάζεται τη διασπορά της ταχύτητας ανέμου.

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι τιμές της διαμέσου και της διασποράς, πραγματοποιείται πληθώρα δυναμικών αναλύσεων για το εκάστοτε μέτρο έντασης και εκτιμάται η αντίστοιχη πιθανότητα, ανάλογα με τον αριθμό των αστοχιών. Αφού προσδιοριστεί η πιθανότητα αστοχίας για κάθε εξεταζόμενο μέτρο έντασης εφαρμόζεται στα αποτελέσματα μια λογαριθμοκανονική κατανομή και προσδιορίζεται η διάμεσος και η διασπορά. Όσον αφορά τη διασπορά, η τιμή της τροποποιείται κάθε φορά ώστε να λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες της προσομοίωσης και εργαστηριακά αποτελέσματα που έχουν πραγματοποιηθεί όπως φαίνεται στο [17].

Εκτός από την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στη συμπεριφορά των πυλώνων, σημαντική επίδραση έχουν η διεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου καθώς και ο επίπαγος. Ο επίπαγος επηρεάζει αφενός το βάρος των μεταλλικών μελών και αφετέρου την προβαλλόμενη στον άνεμο επιφάνεια τους. Οι λογαριθμικές καμπύλες που παρουσιάζονται στη συνέχεια δίνονται για συνδυασμούς των παραπάνω συνιστωσών, συγκεκριμένα εξετάζονται 3 γωνίες πρόσπτωσης (0° , 45° , 90°) και 5 τιμές του επίπαγου (0,1,5,10,15mm).



Σχήμα 2-12: Εξεταζόμενες γωνίες πρόσπτωσης ανέμου

Το Σχήμα 2-12 απεικονίζει τη διεύθυνση της γραμμής μεταφοράς με κόκκινο χρώμα καθώς και το τοπικό σύστημα συντεταγμένων X-Y του πυλώνα. Στην εξεταζόμενη γραμμή μεταφοράς η διεύθυνση της γραμμής και ο τοπικός άξονας X του πυλώνα ταυτίζονται.

Στην συνέχεια δίνονται για κάθε κατηγορία πυλώνων (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**) δύο πίνακες που περιλαμβάνουν τις τιμές της διαμέσου και της διασποράς αρχικά για τους πυλώνες ανάρτησης και έπειτα για τους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες. Ακόμα παρουσιάζονται τρία σχήματα που αντιστοιχούν στις καμπύλες τρωτότητας για τις εξεταζόμενες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης. Σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες για κάθε τιμή του επίπαγου και των δύο τύπων πυλώνων, με κόκκινο χρώμα δίνονται οι καμπύλες για τους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες

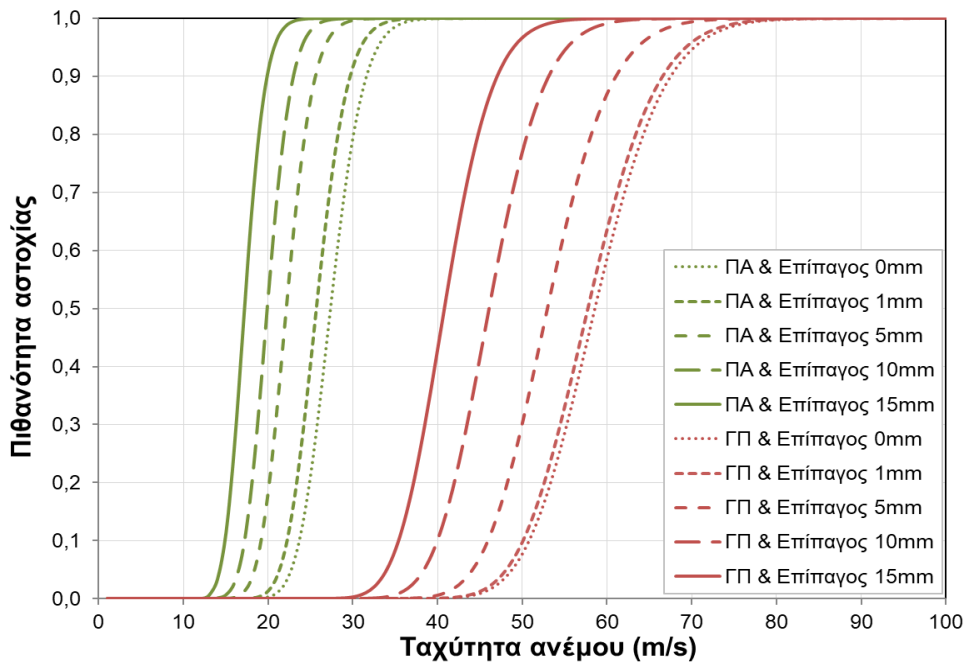
και με πράσινο για τους πυλώνες ανάρτησης. Το πρώτο σχήμα σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση ανταποκρίνεται σε διεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου ίση με 90° , το επόμενο σε διεύθυνση ανέμου 45° και τέλος σε 0° . Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση της ενίσχυσης με ανθρακοελάσματα FRP μελετώνται μόνο οι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες.

Πίνακας 2-3: Παράμετροι τρωτότητας διαβρωμένων πυλώνων ανάρτησης [17]

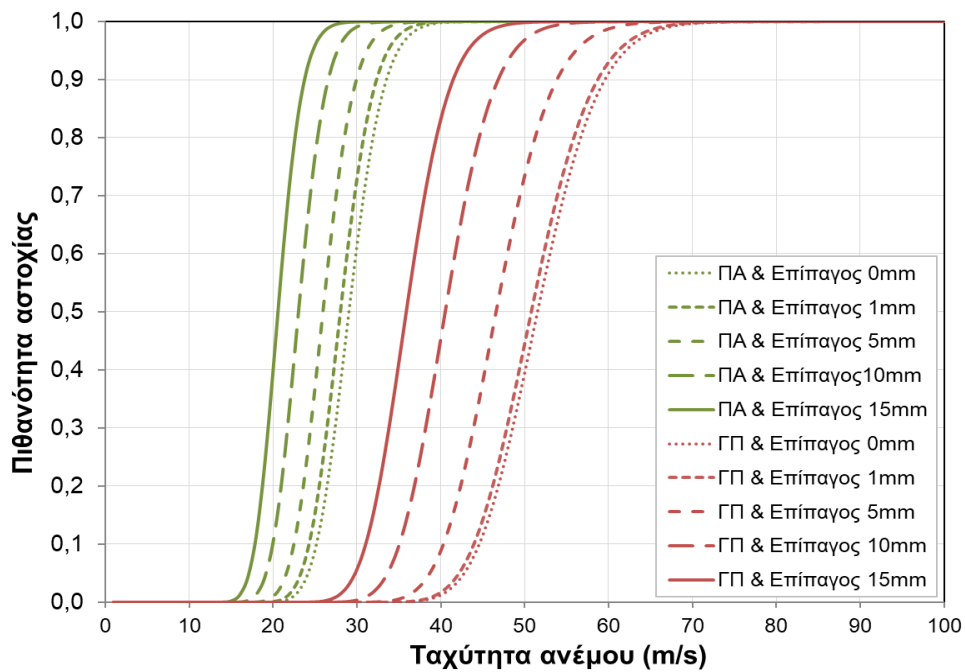
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	27,33	0,1127	29,03	0,1117	26,92	0,1140
1	25,66	0,1127	28,01	0,1117	26,50	0,1140
5	22,11	0,1127	25,93	0,1117	26,04	0,1140
10	19,86	0,1127	23,02	0,1117	22,95	0,1140
15	17,17	0,1127	20,57	0,1117	17,56	0,1140

Πίνακας 2-4: Παράμετροι τρωτότητας διαβρωμένων γωνιακών/τερματικών πυλώνων [17]

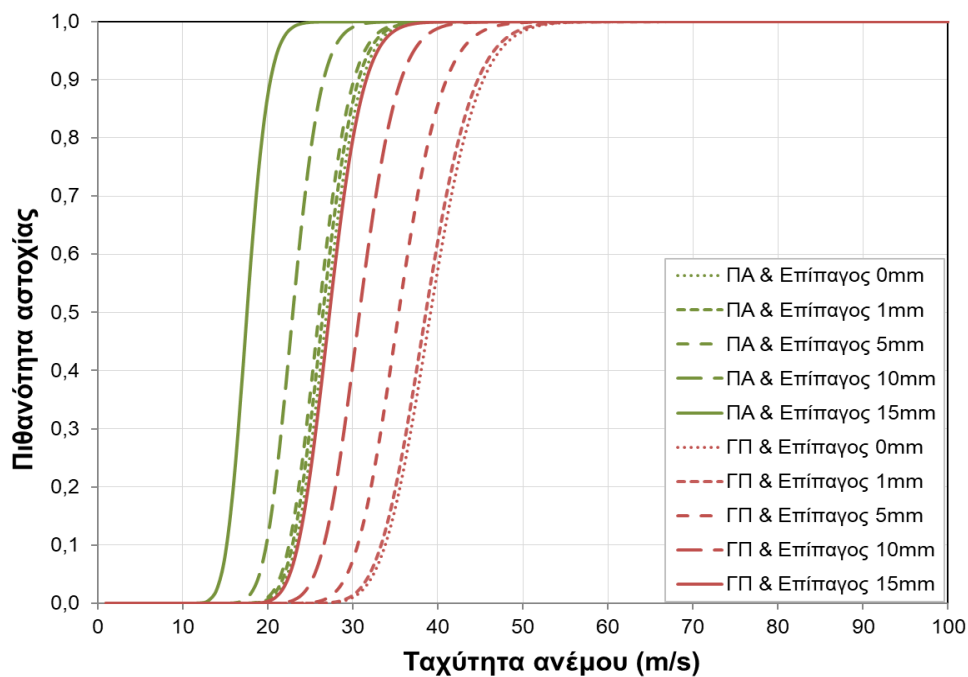
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	58,56	0,1109	51,50	0,113	39,16	0,1145
1	57,73	0,1109	50,76	0,113	38,60	0,1145
5	52,95	0,1109	46,56	0,113	35,41	0,1145
10	46,06	0,1109	40,50	0,113	30,80	0,1145
15	40,78	0,1109	35,86	0,113	27,27	0,1145



Σχήμα 2-13: Καμπύλες τρωτότητας διαβρωμένων πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 90°



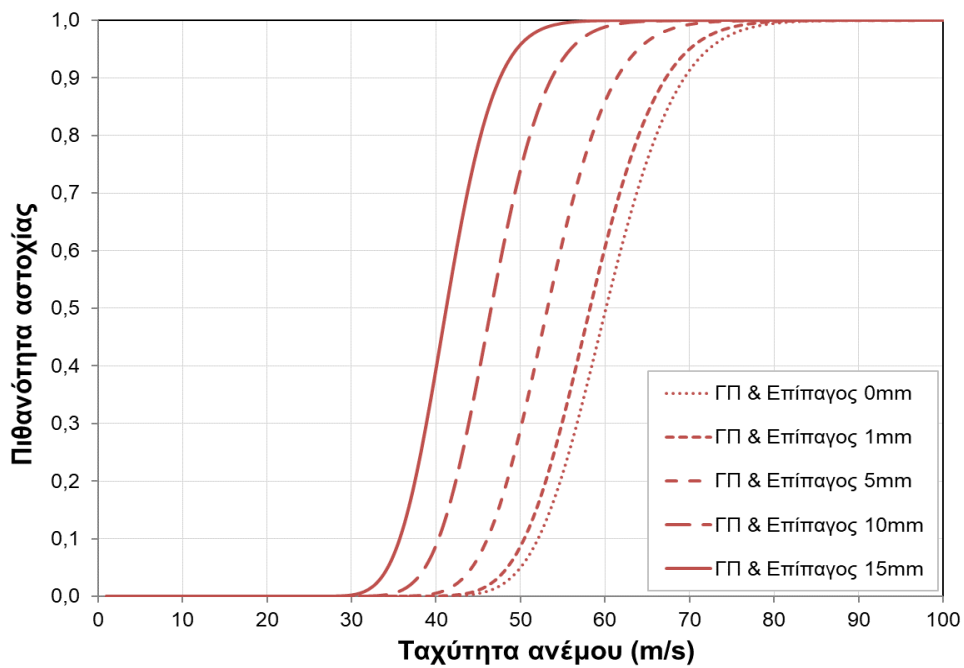
Σχήμα 2-14: Καμπύλες τρωτότητας διαβρωμένων πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 45°



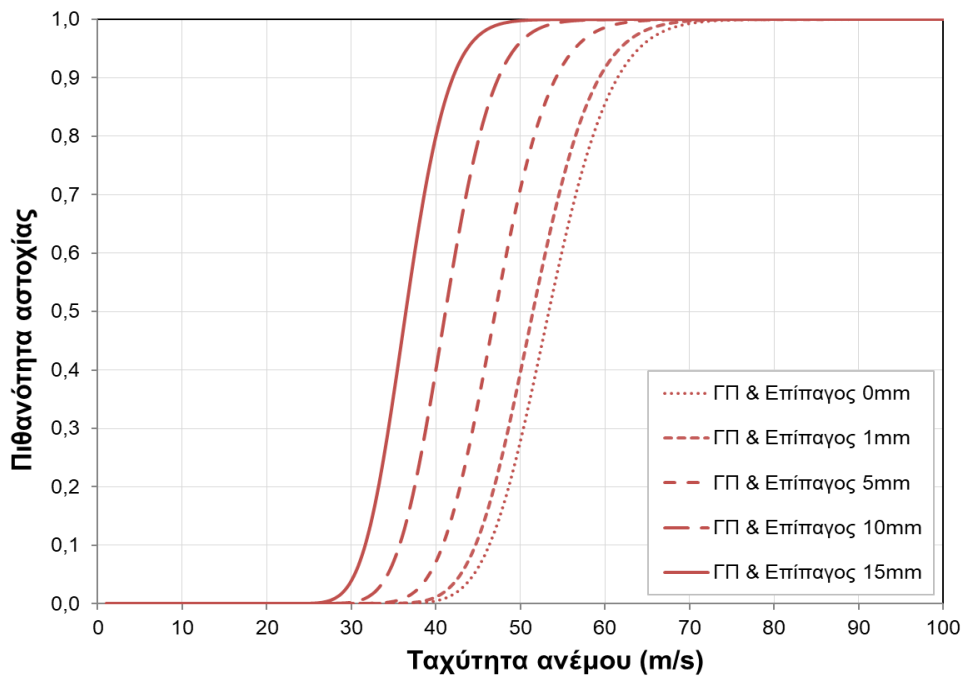
Σχήμα 2-15: Καμπύλες τρωτότητας διαβρωμένων πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 0°

Πίνακας 2-5: Παράμετροι τρωτότητας ενισχυμένων γωνιακών/τερματικών πυλώνων [17]

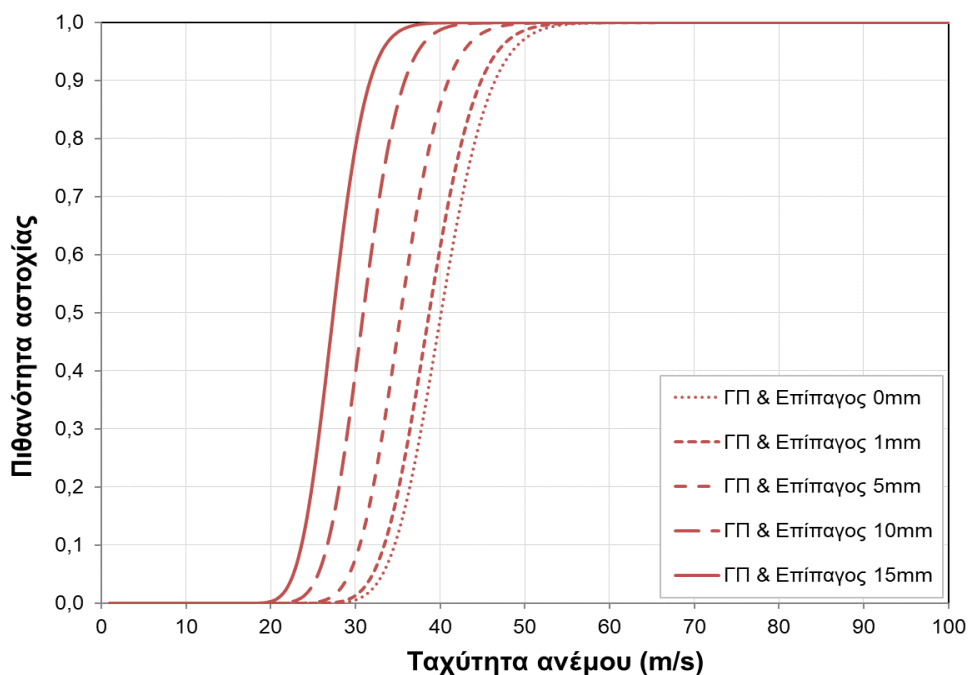
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	60,34	0,1109	53,56	0,1113	40,27	0,1155
1	58,46	0,1109	51,88	0,1113	39,01	0,1155
5	53,45	0,1109	46,60	0,1113	35,67	0,1155
10	47,00	0,1109	40,98	0,1113	31,36	0,1155
15	41,89	0,1109	36,52	0,1113	27,95	0,1155



Σχήμα 2-16: Καμπύλες τρωτότητας ενισχυμένων γωνιακών/τερματικών πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 90°



Σχήμα 2-17: Καμπύλες τρωτότητας ενισχυμένων γωνιακών/τερματικών πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 45°



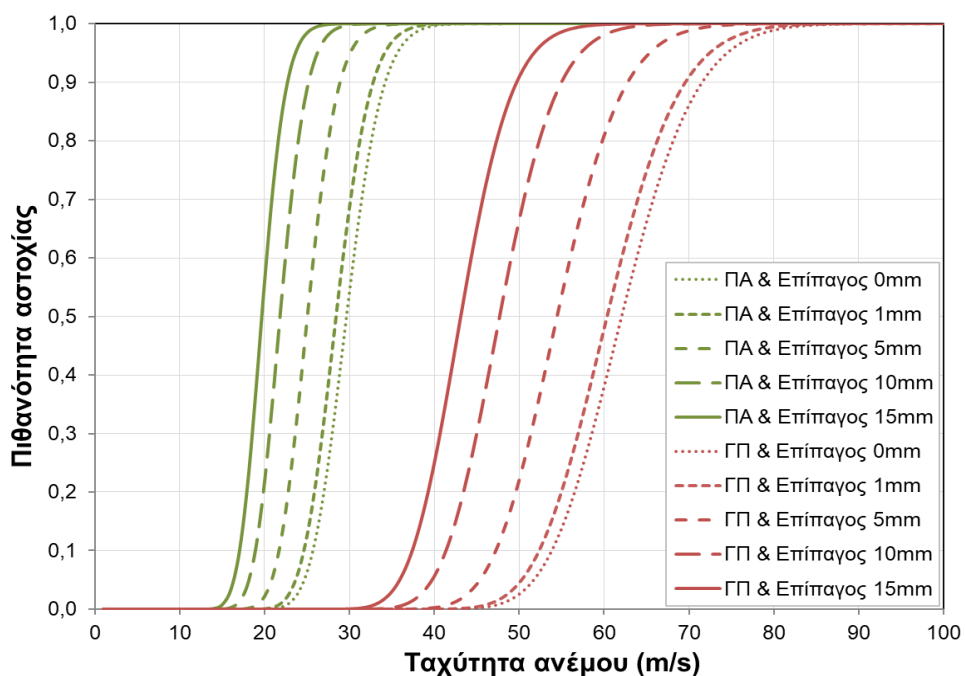
Σχήμα 2-18: Καμπύλες τρωτότητας ενισχυμένων γωνιακών/τερματικών πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 0°

Πίνακας 2-6: Παράμετροι τρωτότητας συμβατικών πυλώνων ανάρτησης [17]

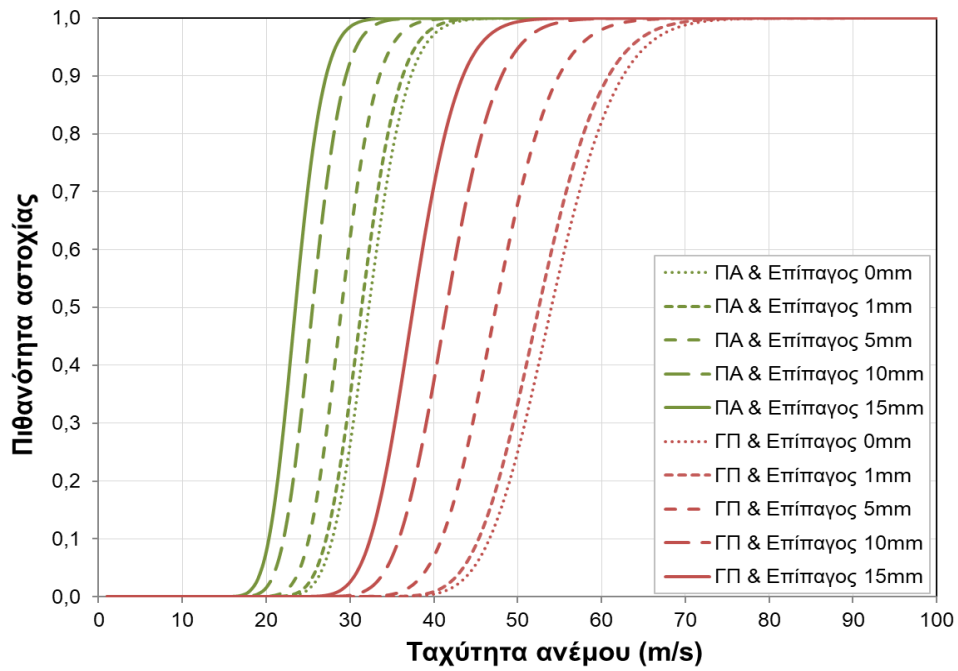
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	29,64	0,1117	32,21	0,1132	30,74	0,1149
1	28,41	0,1117	31,35	0,1132	30,59	0,1149
5	25,03	0,1117	28,96	0,1132	29,38	0,1149
10	21,81	0,1117	25,49	0,1132	26,12	0,1149
15	19,66	0,1117	23,45	0,1132	21,92	0,1149

Πίνακας 2-7: Παράμετροι τρωτότητας συμβατικών γωνιακών/τερματικών πυλώνων [17]

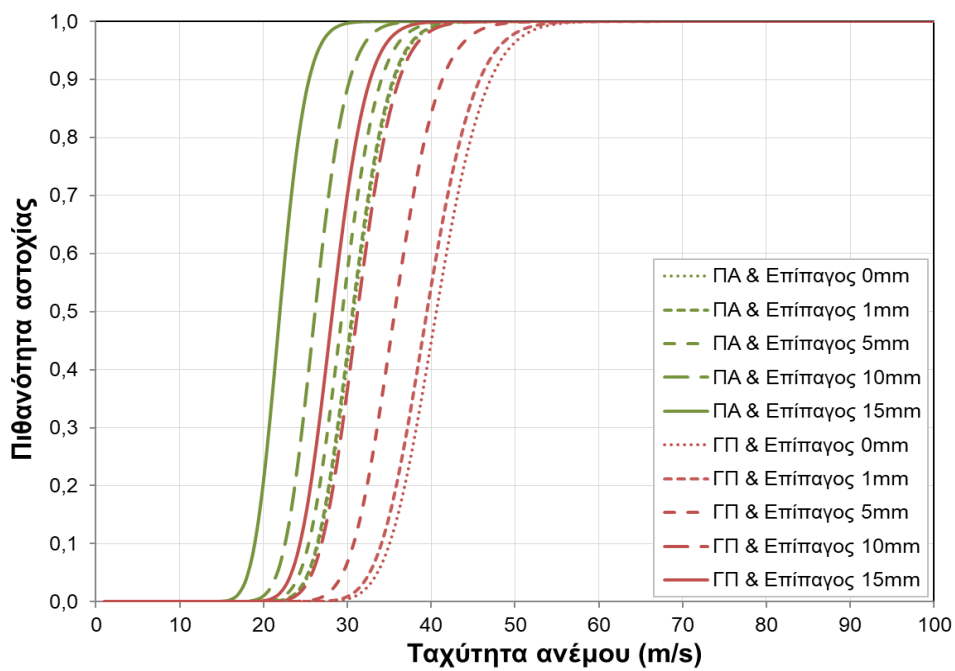
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	62,06	0,111	54,00	0,1147	40,60	0,1155
1	60,34	0,111	52,51	0,1147	39,48	0,1155
5	54,45	0,111	47,38	0,1147	35,63	0,1155
10	47,68	0,111	41,49	0,1147	31,19	0,1155
15	43,10	0,111	37,51	0,1147	28,20	0,1155



Σχήμα 2-19: Καμπύλες τρωτότητας συμβατικών πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 90°



Σχήμα 2-20: Καμπύλες τρωτότητας συμβατικών πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 45°



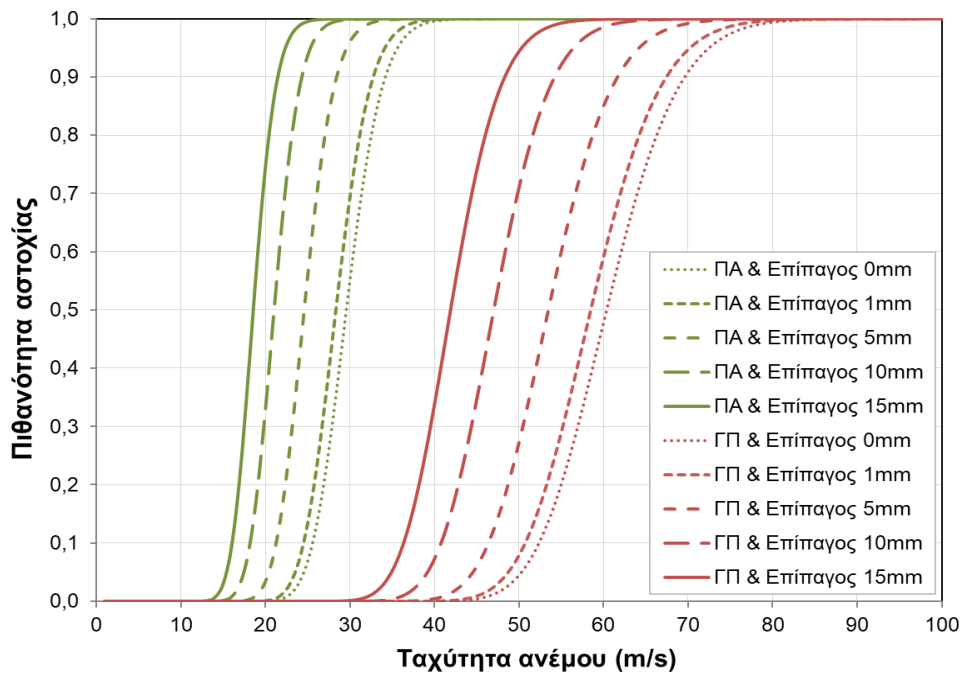
Σχήμα 2-21: Καμπύλες τρωτότητας συμβατικών πυλώνων για διεύθυνση πρόσπτωσης 0°

Πίνακας 2-8: Παράμετροι τρωτότητας πυλώνων ανάρτησης υψηλής αντοχής [17]

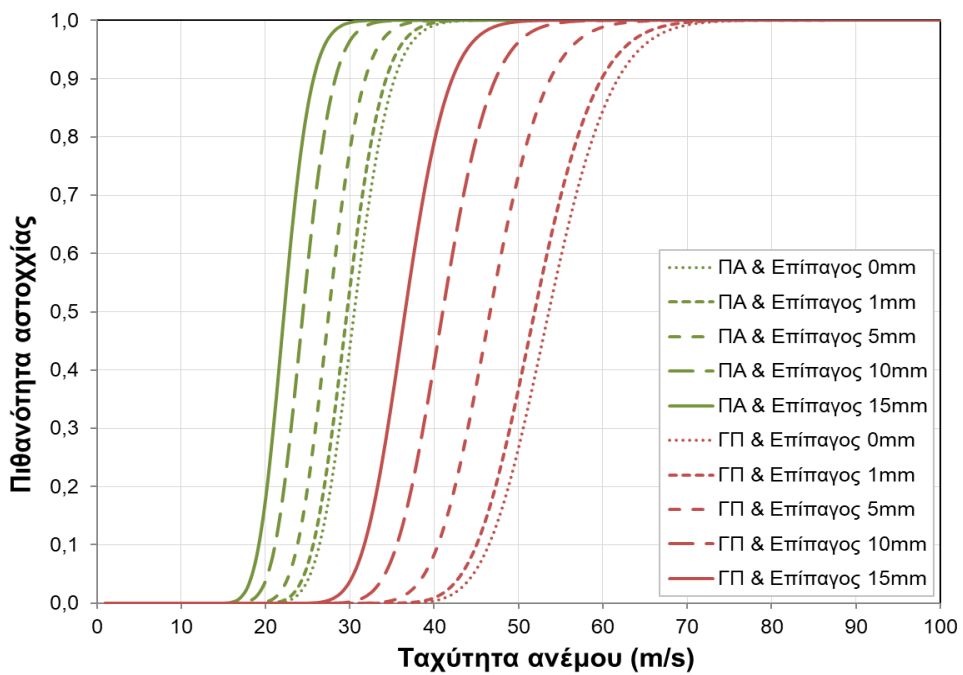
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	29,57	0,1129	30,49	0,1137	31,35	0,1138
1	28,33	0,1129	29,63	0,1137	30,49	0,1138
5	24,59	0,1129	27,48	0,1137	29,05	0,1138
10	21,03	0,1129	24,41	0,1137	25,72	0,1138
15	18,57	0,1129	22,18	0,1137	21,33	0,1138

Πίνακας 2-9: Παράμετροι τρωτότητας γωνιακών/τερματικών πυλώνων υψηλής αντοχής [17]

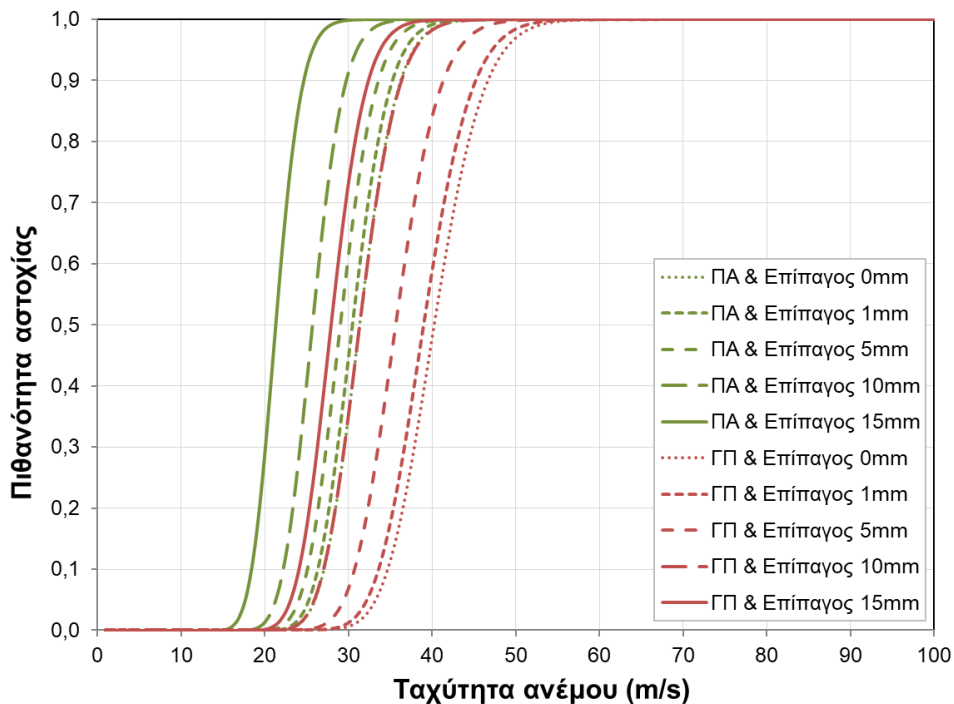
Επίπαγος (mm)	Γωνία πρόσπτωσης 90°		Γωνία πρόσπτωσης 45°		Γωνία πρόσπτωσης 0°	
	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά	Διάμεσος (m/s)	Διασπορά
0	60,10	0,1119	53,34	0,1106	40,10	0,1150
1	58,21	0,1119	51,46	0,1106	38,69	0,1150
5	53,18	0,1119	47,01	0,1106	35,34	0,1150
10	46,51	0,1119	41,11	0,1106	30,91	0,1150
15	41,20	0,1119	36,42	0,1106	27,38	0,1150



Σχήμα 2-22: Καμπύλες τρωτότητας πυλώνων υψηλής αντοχής για διεύθυνση πρόσπτωσης 90°



Σχήμα 2-23: Καμπύλες τρωτότητας πυλώνων υψηλής αντοχής για διεύθυνση πρόσπτωσης 45°



Σχήμα 2-24: Καμπύλες τρωτότητας πυλώνων υψηλής αντοχής για διεύθυνση πρόσπτωσης 0°

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στο Σχήμα 2-13 έως Σχήμα 2-24 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι καμπύλες τρωτότητας που ανταποκρίνονται στους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες και με πράσινο οι αντίστοιχες για τους πυλώνες ανάρτησης

Στην φύση δεν εμφανίζονται τιμές της διεύθυνσης του ανέμου που εμπίπτουν μόνο σε κάποια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις (0° , 45° , 90°), καθώς και τιμές του επίπαγου αποκλειστικά μικρότερες από 15mm. Προκειμένου να υπολογιστούν οι τιμές της διαμέσου και της διασποράς που αντιστοιχούν σε γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες των 90° χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής, ενώ για μεγαλύτερες τιμές αξιοποιείται η συμμετρία του πυλώνα ως προς τους τοπικούς άξονες X και Y. Όσον αφορά τις τιμές του επίπαγου χρησιμοποιείται η μέθοδος της λογαριθμικής παρεμβολής/παρέκτασης.

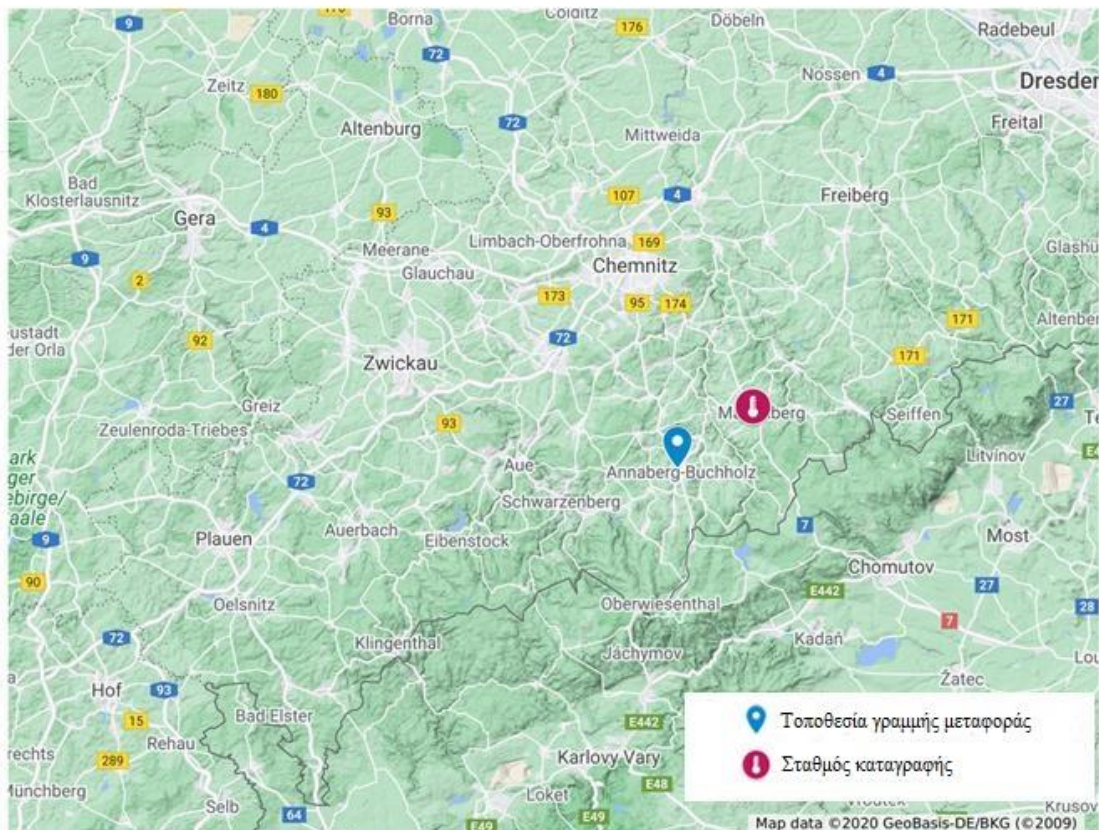
Εξετάζοντας τις παραπάνω καμπύλες, προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι πυλώνες ανάρτησης είναι τρωτότεροι σε καιρικούς κινδύνους συγκριτικά με τους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες. Ακόμα, όσο αυξάνεται ο επίπαγος αυξάνεται η τρωτότητα σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Οι διαβρωμένοι πυλώνες (ανάρτησης και γωνιακοί/τερματικοί) έχουν την μεγαλύτερη τρωτότητα σε καιρικούς κινδύνους και ακολουθούν οι πυλώνες των οποίων τα μέλη είναι κατασκευασμένα από χάλυβα S460 και S355. Για τα μεταλλικά μέλη κατασκευασμένα από χάλυβα S460 οι διαστάσεις είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση των διαβρωμένων πυλώνων. Ακολουθούν οι ενισχυμένοι πυλώνες και την μικρότερη τρωτότητα έχουν οι πυλώνες που είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα υψηλής αντοχής.

Στην συνέχεια εξετάζεται η επιρροή των διευθύνσεων φόρτισης λόγω ανέμου. Όσον αφορά τους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες, η πιο καταστροφική διεύθυνση πρόσπτωσης λόγω ανέμου είναι η διεύθυνση παράλληλα στη γραμμή μεταφοράς (γωνία πρόσπτωσης 0°) και η διεύθυνση του ανέμου που επηρεάζει λιγότερο την συμπεριφορά τους είναι των 90° .

Αντίθετα, όσον αφορά τους πυλώνες ανάρτησης, η πιο καταστροφική διεύθυνση είναι αυτή των 90°, ενώ η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου με την μικρότερη επίδραση εξαρτάται και από την τιμή του επίπαγου.

2.4 Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι

Η υποθετική γραμμή μεταφοράς που εξετάζεται, εδράζεται στην περιοχή Annaberg-Buchholz στη Γερμανία. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι καιρικοί κίνδυνοι στην εξεταζόμενη περιοχή, λαμβάνονται δεδομένα από τον κοντινότερο σταθμό καταγραφής. Ο κοντινότερος σταθμός καταγραφής βρίσκεται στην περιοχή Marienberg (Σχήμα 2-25).



Σχήμα 2-25: Χάρτης περιοχής Annaberg-Buchholz, Γερμανία.

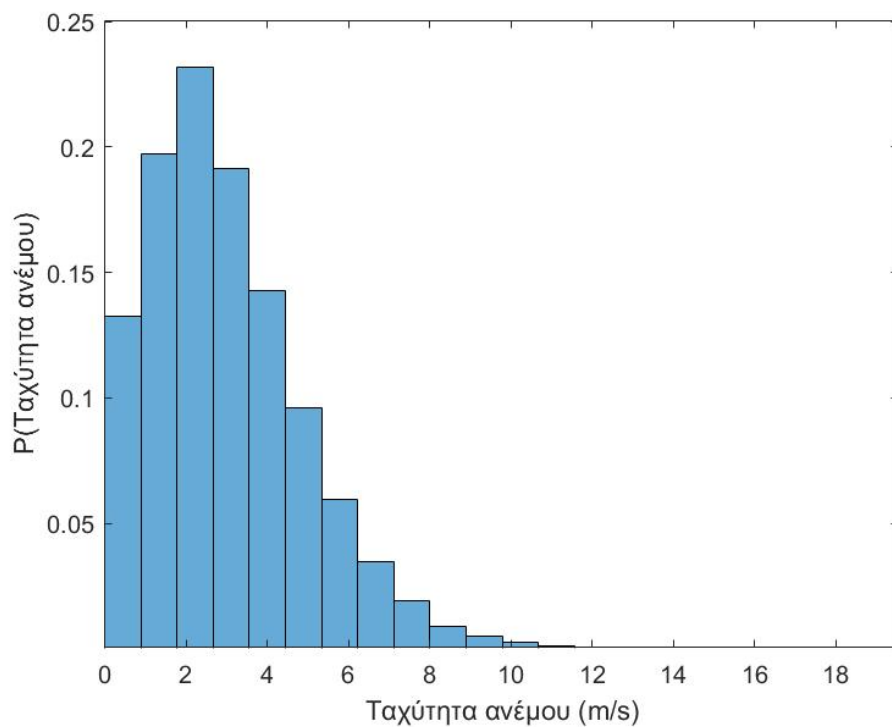
Από τον σταθμό αυτό λαμβάνονται καταγραφές που αφορούν το διάστημα από το 1991 έως το 2013. Οι καταγραφές περιλαμβάνουν πληροφορίες για την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές λαμβάνονται σε υψόμετρο 10m από την επιφάνεια του εδάφους και έχουν περίοδο επαναφοράς 10 λεπτά.

2.4.1 Άνεμος

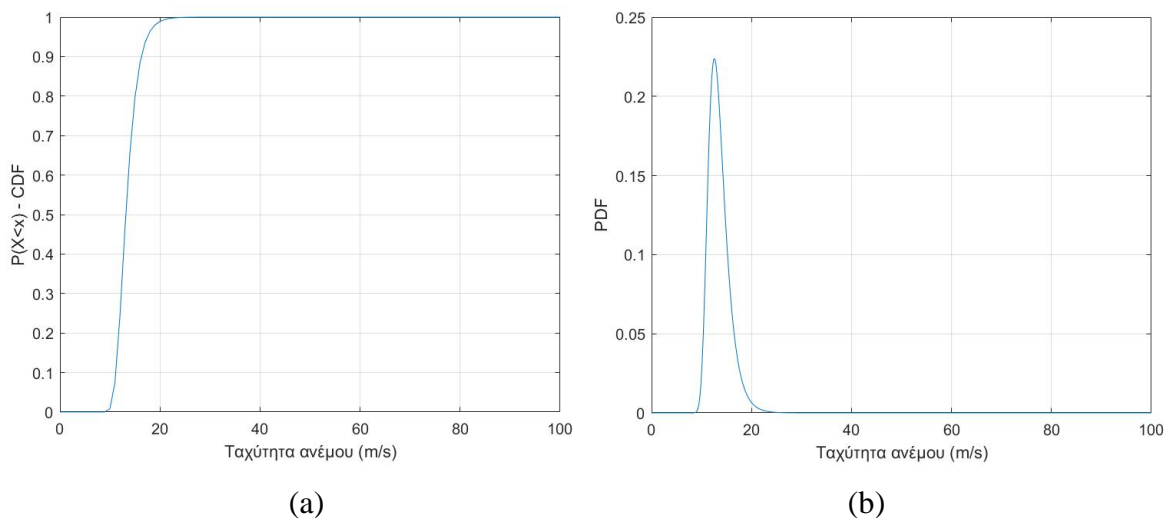
Προκειμένου να εξεταστούν οι καταγραφές της ταχύτητας του ανέμου με περίοδο επαναφοράς 10 λεπτά για διάστημα 22 ετών παράγεται το ιστόγραμμα που απεικονίζεται στο 3 στ. Σχήμα 2-26. Οι τιμές που παρατηρούνται έχουν μικρές ταχύτητες ανέμου γι' αυτό αποφασίζεται η μελέτη να γίνει σε επίπεδο ετήσιων ταχυτήτων ανέμου. Από τα δεδομένα των καταγραφών λαμβάνονται οι ετήσιες μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και σε

αυτές εφαρμόζεται η κατανομή Gumbel. Η κατανομή Gumbel χρησιμοποιείται συχνά για την μοντελοποίηση των μεγίστων τιμών κάποιας καταγραφής. Στο Σχήμα 2-27 απεικονίζονται η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική κατανομή αντίστοιχα.

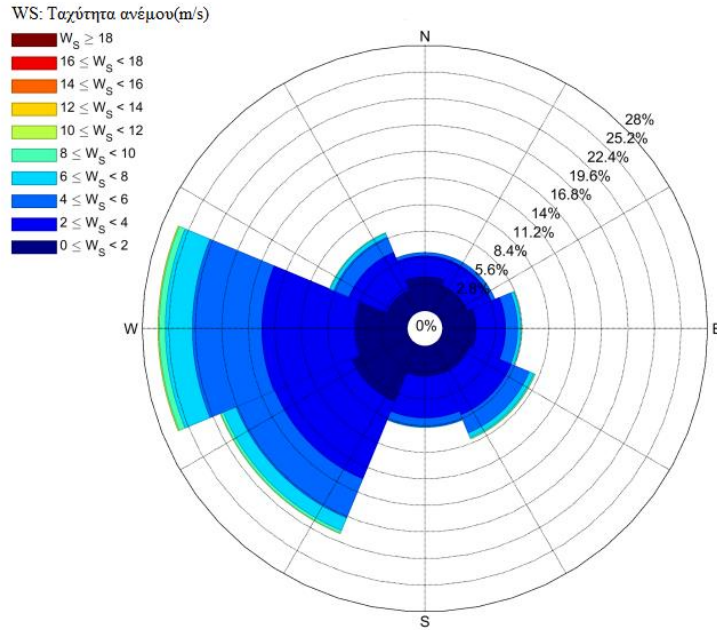
Ακολουθεί η επεξεργασία των καταγραφών για τις διευθύνσεις του ανέμου. Στο Σχήμα 2-28 εικονίζεται η σχετική συχνότητα των διευθύνσεων του ανέμου στην περιοχή Marienberg και για κάθε διεύθυνση οι συχνότητες των ταχυτήτων του ανέμου που επικρατούν. Οι κύριοι άνεμοι που εμφανίζονται στην περιοχή έχουν δυτική και νοτιοδυτική διεύθυνση και οι ταχύτητες τους είναι μικρότερες από 12m/s.



3 στ.Σχήμα 2-26: Κατανομή ταχύτητας ανέμου



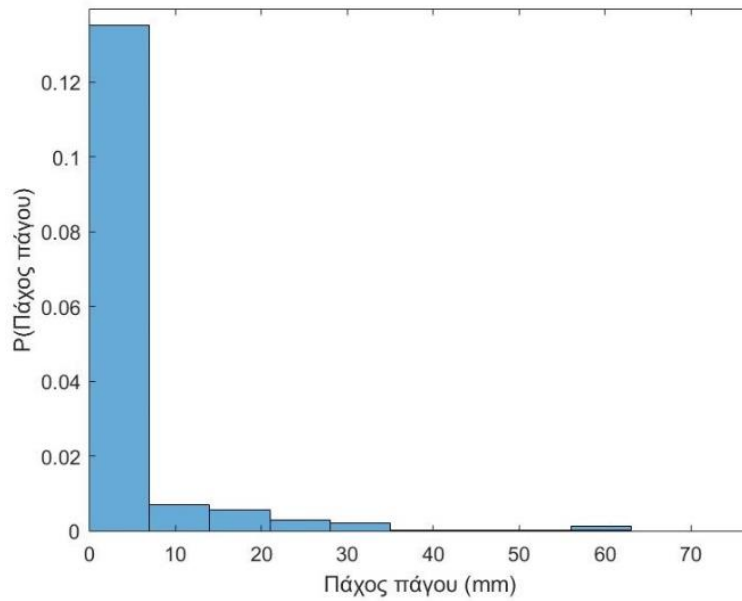
Σχήμα 2-27: (a) Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας (b) Αθροιστική κατανομή Gumbel



Σχήμα 2-28: Κατανομή διευθύνσεων ανέμου

2.4.2 Επίπαγος

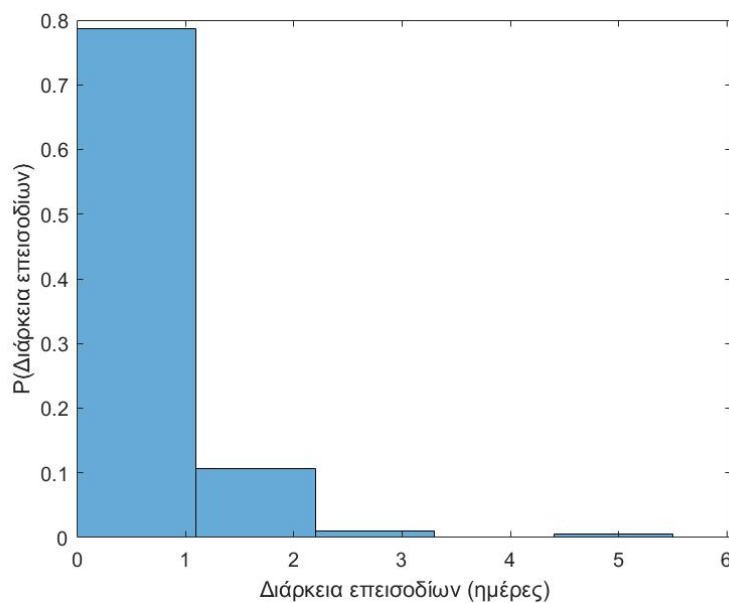
Εκτός από τον άνεμο, ένας ακόμη περιβαλλοντικός κίνδυνος που λαμβάνεται υπόψη είναι ο επίπαγος για τον οποίο δεν υπάρχουν απευθείας διαθέσιμες καταγραφές από τον σταθμό. Οι τιμές του επίπαγου προκύπτουν υπολογιστικά από την επεξεργασία καταγραφών της ταχύτητας του ανέμου και των κατακρημνίσεων, όπως παρουσιάζεται στο [16]. Ακολουθεί η κατανομή των αποτελεσμάτων (Σχήμα 2-29).



Σχήμα 2-29: Κατανομή επίπαγου

2.4.3 Επεισόδια ακραίων φαινομένων

Οι καταγραφές δίνονται σε επίπεδο δεκαλέπτων, γεγονός που δεν ενδιαφέρει άμεσα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της γραμμής μεταφοράς. Η συμπεριφορά της γραμμής μεταφοράς εξετάζεται για επεισόδια ακραίων φαινομένων που παράγονται με δεδομένες τις υπόψη καταγραφές. Το κάθε επεισόδιο ακραίων φαινομένων αποτελείται από τρεις χρονοϊστορίες, μία για την ταχύτητα του ανέμου, μία για τη διεύθυνση του καθώς και μια για τις τιμές του επίπαγου. Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός των χρονοϊστοριών ταχύτητας ανέμου, οι χρονοϊστορίες αυτές αποτελούνται από διαδοχικές καταγραφές ταχύτητας ανέμου και εμπεριέχονται μεταξύ κρίσιμων ταχυτήτων. Ως κρίσιμες ορίζονται οι ταχύτητες ανέμου που είναι μεγαλύτερες ή ίσες από 10 m/s. Βασική παραδοχή είναι ότι η χρονική διάρκεια μεταξύ δυο επεισοδίων είναι μεγαλύτερη από 24 ώρες. Αφού οριστούν οι χρονοϊστορίες της ταχύτητας του ανέμου, οι χρονοϊστορίες διεύθυνσης ανέμου και επίπαγου λαμβάνονται για τις αντίστοιχες δεκάλεπτες διαδοχικές καταγραφές. Εξετάζεται η διάρκεια των επεισοδίων ακραίων φαινομένων και στο Σχήμα 2-30 φαίνεται η κατανομή τους. Στη διάρκεια των 22 ετών παρατηρείται ότι τα περισσότερα επεισόδια έχουν διάρκεια μιας ημέρας και σε λίγες περιπτώσεις ξεπερνούν τις 5 ημέρες.



Σχήμα 2-30: Κατανομή διάρκειας επεισοδίων ακραίων φαινομένων

2.4.4 Στοχαστικός κατάλογος επεισοδίων ακραίων φαινομένων

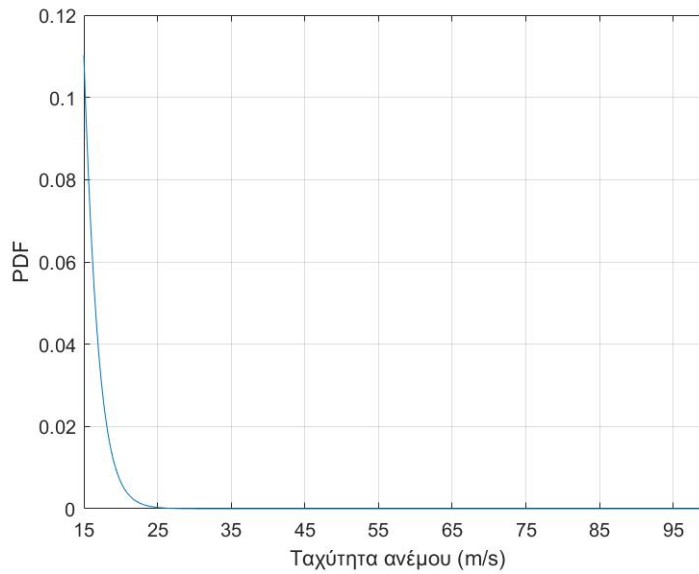
Τα επεισόδια ακραίων φαινομένων που προκύπτουν από τις καταγραφές καλύπτουν μια μικρή περίοδο μερικών δεκαετιών. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένας συνθετικός κατάλογος επεισοδίων ακραίας φόρτισης που θα είναι αντιπροσωπευτικός των καιρικών κινδύνων που εμφανίζονται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Αυτή η μεγάλη διάρκεια του συνθετικού καταλόγου, δίνει μια αμερόληπτη εκτίμηση του κινδύνου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Κάθε συμβάν, δηλαδή στη συγκεκριμένη μελέτη το επεισόδιο ακραίων φαινομένων, που συμβάλλει στον κίνδυνο μπορεί να θεωρηθεί άμεσα ως ένα πιθανό σενάριο εμφάνισης.

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα στοχαστικό σύνολο γεγονότων, πρέπει να γίνουν υποθέσεις για την καιρική επικινδυνότητα που θα επικρατεί στο μέλλον. Η βασική παραδοχή είναι ότι οι καιρικές συνθήκες που παρατηρήθηκαν στο παρελθόν θα ισχύουν και τότε. Ένας στοχαστικός κατάλογος μπορεί να κατασκευαστεί μέσω μιας διαδικασίας Monte Carlo (δηλαδή με χρήση τυχαίων αριθμών, εξ ου και το όνομα «στοχαστικός»).

Δημιουργείται ένα σύνολο συνθετικών συμβάντων που περιέχει ισοδύναμο αριθμό συμβάντων με τον αρχικό κατάλογο καταγραφών. Αυτό οδηγεί σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό συνθετικών γεγονότων και μειώνει τα σφάλματα κατά την εκτίμηση της ετήσιας πιθανότητας αστοχίας. Συγκεκριμένα, δημιουργείται ένας στοχαστικός κατάλογος επεισοδίων ακραίας φόρτισης με χρονική διάρκεια 1.000.000 ετών.

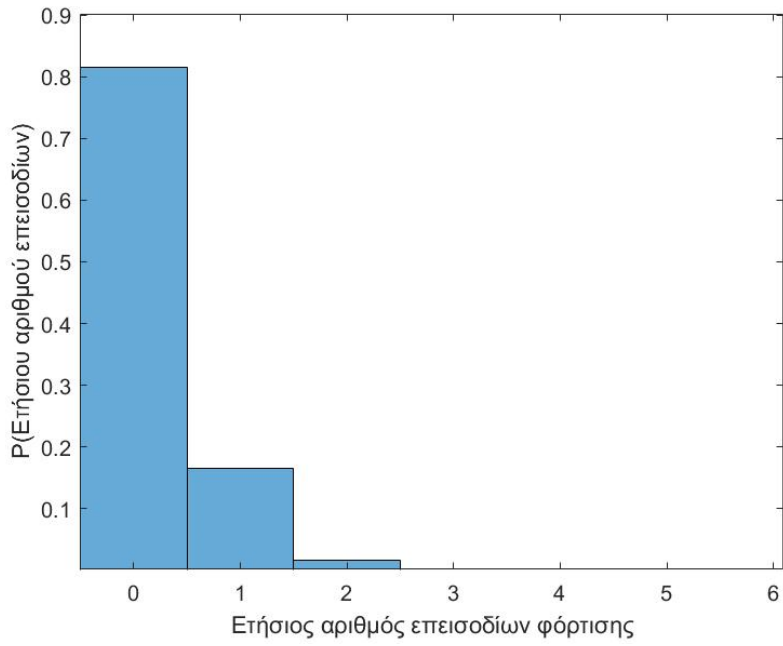
Για κάθε έτος καθορίζεται ο αριθμός των επεισοδίων ακραίων φαινομένων με βάση την κατανομή Poisson. Έπειτα, κάθε επεισόδιο ακραίων φαινομένων επιλέγεται από τη λίστα των καταγεγραμμένων επεισοδίων. Υπενθυμίζεται ότι το κάθε επεισόδιο φόρτισης αποτελείται από μια χρονοϊστορία ταχύτητας και την αντίστοιχη χρονοϊστορία διεύθυνσης ανέμου καθώς και την χρονοϊστορία φόρτισης λόγω επίταγος. Οι χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου κλιμακώνονται προς τα πάνω με μια τιμή που επιλέγεται από ένα οριοθετημένο τμήμα της κατανομής Gumbel σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία. Η κλιμάκωση γίνεται μόνο στις τιμές της ταχύτητας ανέμου, ενώ οι διευθύνσεις και τα πάχη του πάγου παραμένουν αμετάβλητα.

Δεδομένου ότι η συνολική περιοχή κάτω από οποιοδήποτε αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (CDF) είναι πάντα 1, το CDF θα έχει πάντα ως αποτέλεσμα μια αντιστοίχιση για οποιαδήποτε τυχαία μεταβλητή σε έναν αριθμό μεταξύ 0 και 1. Το ζητούμενο είναι να δημιουργηθούν τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την ίδια κατανομή με την δεδομένη κατανομή CDF. Αυτό είναι ακριβώς το αντίστροφο της διαδικασίας που περιγράφεται. Αντί να αντιστοιχίζεται μια τυχαία μεταβλητή σε μια ομοιόμορφη μεταβλητή $[0,1]$, μια ομοιόμορφη τυχαία μεταβλητή $[0, 1]$ πρέπει να αντιστοιχιστεί σε μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί ένα οριοθετημένο τμήμα της κατανομής. Το τμήμα αυτό είναι η «ουρά» της κατανομής Gumbel (Σχήμα 2-31) και πρόκειται για την κατανομή των ταχυτήτων ανέμου που είναι μεγαλύτερες από 15m/s.

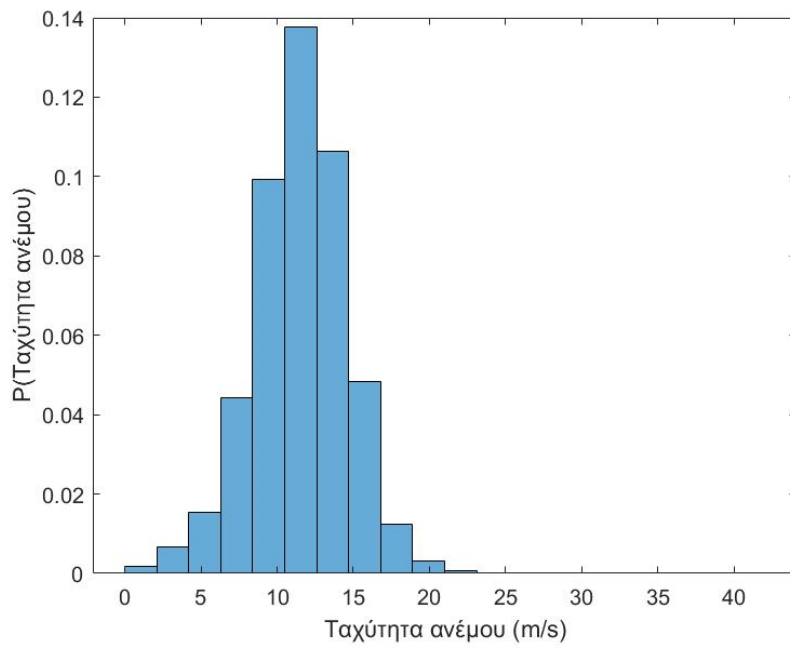


Σχήμα 2-31: «Ουρά» κατανομής Gumbel

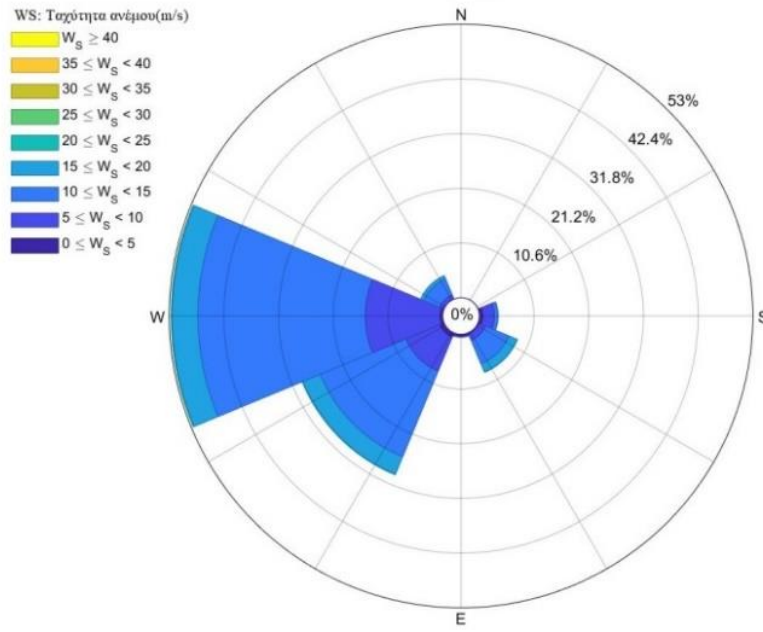
Σημειώνεται, ότι η παράμετρος λ , που αντιστοιχεί στην μέση τιμή του ετήσιου αριθμού εμφανίσεων των επεισοδίων ακραίων φαινομένων σύμφωνα με την κατανομή Poisson, ισούται με 0,2035. Η τιμή αυτή είναι η πιθανότητα υπέρβασης ταχύτητας ανέμου μεγαλύτερης από 15m/s σύμφωνα με την κατανομή Gumbel. Με βάση τα παραπάνω στο Σχήμα 2-32 απεικονίζεται η τελική κατανομή του ετήσιου αριθμού επεισοδίων ακραίων φαινομένων από τον στοχαστικό κατάλογο γεγονότων. Όπως ήταν αναμενόμενο, το ιστόγραμμα αυτό έχει την ίδια μορφή με αυτό που αντιστοιχούσε στα 22 έτη. Ακόμα, στα Σχήματα 2-33 έως 2-35 απεικονίζονται οι κατανομές των ταχυτήτων και διευθύνσεων του ανέμου και του επίπαγου όπως προκύπτουν από τον στοχαστικό κατάλογο γεγονότων.



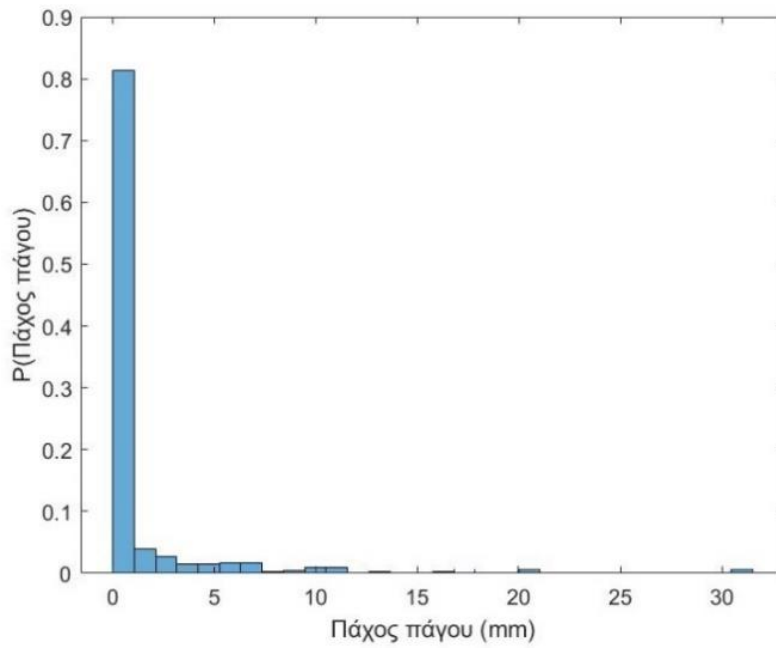
Σχήμα 2-32: Κατανομή ετήσιου αριθμού επεισοδίων ακραίων φαινομένων



Σχήμα 2-33: Κατανομή ταχυτήτων ανέμου



Σχήμα 2-34: Κατανομή διευθύνσεων ανέμου



Σχήμα 2-35: Κατανομή επίπαγου

3 Αποτελέσματα

3.1 Ακριβής μέθοδος υπολογισμού

Η εκτίμηση της διακινδύνευσης για την εξεταζόμενη γραμμή μεταφοράς ενέργειας, στην περιοχή Annaberg-Buchholz της Γερμανίας, πραγματοποιήθηκε για πέντε περιπτώσεις. Αρχικά, εξετάστηκε η γραμμή γραμμή μεταφοράς ενέργειας ύστερα από 60 έτη λειτουργίας αποτελούμενη από πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα S355 που έχουν υποστεί διάβρωση και εξετάστηκε η συμπεριφορά της στην περίπτωση που δεν γίνεται καμία ενέργεια αποκατάστασης (Περίπτωση 1). Έπειτα, εξετάστηκε η γραμμή μεταφοράς, όμοια με την προηγούμενη, με την βασική διαφορά ότι όλοι οι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες ενισχύθηκαν με ανθρακοελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) (Περίπτωση 2). Η τρίτη περίπτωση μελέτης αφορά τη γραμμή μεταφοράς ενέργειας στην οποία όλοι οι πυλώνες αντικαταστάθηκαν με καινούργιους κατασκευασμένους από συμβατικό χάλυβα S355 (Περίπτωση 3). Έπειτα, διερευνήθηκε η περίπτωση της γραμμής μεταφοράς όπου αντικαταστάθηκαν όλοι οι πυλώνες, με καινούργιους με όμοια γεωμετρία και υλικό με την προηγούμενη περίπτωση, με την διαφορά ότι οι ορθοστάτες και διαγώνια μεταλλικά μέλη των πυλώνων είναι κατασκευασμένα από χάλυβα υψηλής αντοχής S460 (Περίπτωση 4). Τέλος, εξετάστηκε η γραμμή μεταφοράς στην οποία δεν γίνεται καμία παρέμβαση στους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες, αλλά οι πυλώνες ανάρτησης αντικαθίστανται με πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα S355 στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους (Περίπτωση 5).

Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις μελέτης υπολογίστηκε η διακινδύνευση της γραμμής μεταφοράς υπό καιρική επικινδυνότητα λαμβάνοντας υπόψη αλυσιδωτές αστοχίες των πυλώνων. Υπολογίζεται η ετήσια συχνότητα αστοχίας της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως το άθροισμα των πιθανοτήτων αστοχίας για κάθε έτος προς τον συνολικό αριθμό των ετών του στοχαστικού καταλόγου (1.000.000 έτη). Αντίστοιχα για κάθε έτος υπολογίζεται η πιθανότητα αστοχίας ως η μέση τιμή της πιθανότητας αστοχίας των επεισοδίων ακραίων φαινομένων του αντίστοιχου έτους. Όσον αφορά την πιθανότητα αστοχίας της γραμμής για ένα συγκεκριμένο επεισόδιο ακραίων φαινομένων αυτή υπολογίζεται ακολουθώντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.

Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά της γραμμής μεταφοράς έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές. Αρχικά θεωρήθηκε ότι η γραμμή μεταφοράς ενέργειας αποτελείται από δύο τύπους πυλώνων. Οι γωνιακοί και οι τερματικοί πυλώνες ανήκουν στην μία κατηγορία και οι πυλώνες ανάρτησης στην άλλη (Σχήμα 2-2). Ακόμα, επιλέγεται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε πυλώνα (Σχήμα 2-12), ο άξονας X να είναι παράλληλος με την διεύθυνση της γραμμής μεταφοράς. Όσον αφορά την τρωτότητα των πυλώνων, αυτή εκφράζει την πιθανότητα αστοχίας των πυλώνων ως προς την ταχύτητα του ανέμου και λαμβάνει υπόψη την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στον εκάστοτε πυλώνα καθώς και του επίπαγου. Βασικό στοιχείο της μελέτης είναι οι αλυσιδωτές αστοχίες λόγω πρωτογενούς κατάρρευσης κάποιου πυλώνα. Όσον αφορά την προτεινόμενη μεθοδολογία αποτίμησης (Ενότητα 2.2) γίνεται η παραδοχή ότι όταν ένας πυλώνας ανάρτησης καταρρεύσει γύρω από έναν λειτουργικό γωνιακό/τερματικό πυλώνα, τότε ο τελευταίος εντάσσεται στην κατάσταση βλαβών 1. Η αλλαγή της κατάστασης βλαβών γίνεται για να

ληφθεί υπόψη η αλλαγή της αντοχής και κατ'επέκταση της τρωτότητας. Διαθέσιμες καμπύλες τρωτότητας για την περίπτωση αυτή δεν υπήρχαν για όλες τις διευθύνσεις ανέμου, γι' αυτό μια εύλογη παραδοχή με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα ήταν η απομείωση των τιμών της διαμέσου θ των καμπυλών τρωτότητας κατά 30%. Τέλος, όσον αφορά τους καιρικούς κινδύνους, δημιουργήθηκε ένας στοχαστικός κατάλογος γεγονότων με διάρκεια 1.000.000 ετών. Το κάθε έτος περιλαμβάνει ένα πλήθος επεισοδίων ακραίων φαινομένων που καταπονούν τη γραμμή μεταφοράς. Τα επεισόδια αυτά θεωρείται ότι προκαλούν τις ίδιες συνθήκες φόρτισης σε κάθε πύργο (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου καθώς και πάχος πάγου) παρά τη χωρική τους απόσταση.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση για κάθε περίπτωση φαίνονται στο Πίνακα 3-1, όπου παρουσιάζονται η μέση ετήσια συχνότητα αστοχίας και η αντίστοιχη περίοδος επαναφοράς για κάθε εναλλακτική περίπτωση μελέτης. Για να γίνει πλήρως κατανοητός ο όρος της ετήσιας συχνότητας αστοχίας δίνεται ένα παράδειγμα. Ας υποθεθεί ότι μια γραμμή μεταφοράς έχει ετήσια συχνότητα αστοχίας ίση με 0.01. Αυτό σημαίνει ότι κάθε έτος έχει 1% πιθανότητα να αστοχήσει. Για ένα χρονικό ορίζοντα 100 ετών λειτουργίας αναμένουμε $100 \times 0.01 = 1$ αστοχία κατά μέσο όρο. Από εδώ προκύπτει ότι η μέση περίοδος επαναφοράς μιας αστοχίας υπολογίζεται ως το αντίστροφο της μέσης ετήσιας συχνότητας αστοχίας. Έπειτα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για την ετήσια συχνότητα αστοχίας για κάθε περίπτωση συγκριτικά με την αρχική γραμμή μεταφοράς η οποία αποτελείται αποκλειστικά από διαβρωμένους πυλώνες (Περίπτωση 1).

Από τα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα 3-1 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Η διάβρωση απομειώνει ιδιότητες των μεταλλικών διατομών όπως το εμβαδό και τη ροπή αδράνειας με αποτέλεσμα να οδηγεί σε απομείωση της συνολικής αντοχής των πυλώνων. Η γραμμή μεταφοράς ενέργειας που αποτελείται από πυλώνες κατασκευασμένους με συμβατικό χάλυβα έχει μικρότερη, κατά 69%, συχνότητα αστοχίας από την αρχική περίπτωση μελέτης και η αντίστοιχη με πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα υψηλής αντοχής κατά 52%. Παρατηρείται ότι η επιλεκτική ενίσχυση των γωνιακών/τερματικών πυλώνων με ανθρακοελάσματα FRP δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά της γραμμής. Επίσης διαπιστώνεται ότι η αντικατάσταση μόνο των πυλώνων ανάρτησης οδηγεί στην ίδια ετήσια συχνότητα αστοχίας με την αντικατάσταση όλων των πυλώνων με καινούργιους κατασκευασμένους από χάλυβα S355, τουλάχιστον για το δεδομένο επίπεδο διάβρωσης.

Πίνακας 3-1: Μέση ετήσια συχνότητα αστοχίας και περίοδος επαναφοράς εξεταζόμενων περιπτώσεων

Περίπτωση	Μέση ετήσια συχνότητα αστοχίας	Διαφορά	Περίοδος επαναφοράς
1	0,0091	—	110 έτη
2	0,0091	0%	110 έτη
3	0,0028	-69%	352 έτη
4	0,0044	-52%	227 έτη
5	0,0028	-69%	352 έτη

Κύριος σκοπός μας είναι η αποτίμηση της διακινδύνευσης των γραμμών μεταφοράς ενέργειας και κατά την διαδικασία αυτή λαμβάνονται υπόψη οι αλυσιδωτές αστοχίες λόγω της πρωτογενούς κατάρρευσης ενός πυλώνα. Όσον αφορά την ετήσια συχνότητα αστοχίας της συνολικής γραμμής δεν δίνεται κάποια πληροφορία για τις διαδοχικές αστοχίες, αφού οι γραμμές μεταφοράς είναι σειριακά συστήματα και με την κατάρρευση έστω και ενός πυλώνα επέρχεται η συνολική αστοχία τους. Προκειμένου να εξεταστούν οι συνέπειες των αλυσιδωτών αστοχιών, στον Πίνακα 3-2 δίνονται οι μέσες ετήσιες συχνότητες αστοχίας για κάθε ομάδα πυλώνων (Σχήμα 2-6). Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η κύρια αστοχία της γραμμής μεταφοράς προέρχεται από την αστοχία 4 πυλώνων, ενώ στις τρεις τελευταίες προέρχεται από την αστοχία 2 πυλώνων. Όπως ήταν αναμενόμενο, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε κάθε περίπτωση οι πυλώνες ανάρτησης είναι οι κρίσιμοι πυλώνες που καθορίζουν κυρίως την αστοχία των γραμμών μεταφοράς.

Πίνακας 3-2: Μέση ετήσια συχνότητα αστοχίας διαφορετικού αριθμού πυλώνων

Περίπτωση	Ετήσια συχνότητα αστοχίας					
	2	3	4	5	6	7
1	2,74E-03	6,01E-05	3,68E-03	1,36E-03	1,14E-03	1,20E-04
2	2,78E-03	4,05E-05	4,18E-03	1,14E-03	8,70E-04	7,60E-05
3	1,29E-03	1,03E-04	4,35E-04	3,79E-04	4,32E-04	1,99E-04
4	1,84E-03	1,34E-04	8,51E-04	5,97E-04	6,86E-04	2,94E-04
5	1,08E-03	1,62E-04	2,44E-04	3,75E-04	5,83E-04	3,90E-04

3.2 Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού

Προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, υπολογίζεται η ετήσια συχνότητα αστοχίας της εξεταζόμενης γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 2-2) υπό καιρική επικινδυνότητα με βάση μια απλοποιημένη μέθοδο υπολογισμού. Στην απλοποιημένη μέθοδο όλοι οι πυλώνες προσομοιώνονται ως πυλώνες ανάρτησης και έχουν δύο καταστάσεις βλάβης (Σχήμα 2-4), είναι είτε λειτουργικοί είτε αστοχούν.

Αρχικά για τους λειτουργικούς πυλώνες εκτιμάται η πιθανότητα αστοχίας των πυλώνων ανάρτησης για συγκεκριμένο μέτρο έντασης με βάση την αντίστοιχη καμπύλη τρωτότητας. Δεδομένου ότι όλοι οι πυλώνες ανήκουν στον ίδιο τύπο και ισχύουν οι ίδιες συνθήκες σε κάθε έναν, η πιθανότητα που υπολογίζεται είναι η ίδια. Στη συνέχεια παράγονται N τυχαίες τιμές (0 ή 1) για κάθε πυλώνα με βάση αυτή την πιθανότητα αστοχίας και την κατανομή Bernoulli. Όπως στην προτεινόμενη μεθοδολογία, στην περίπτωση που η τιμή είναι ίση με 1, τότε θεωρείται ότι ο πυλώνας καταρρέει και το αντίστροφο.

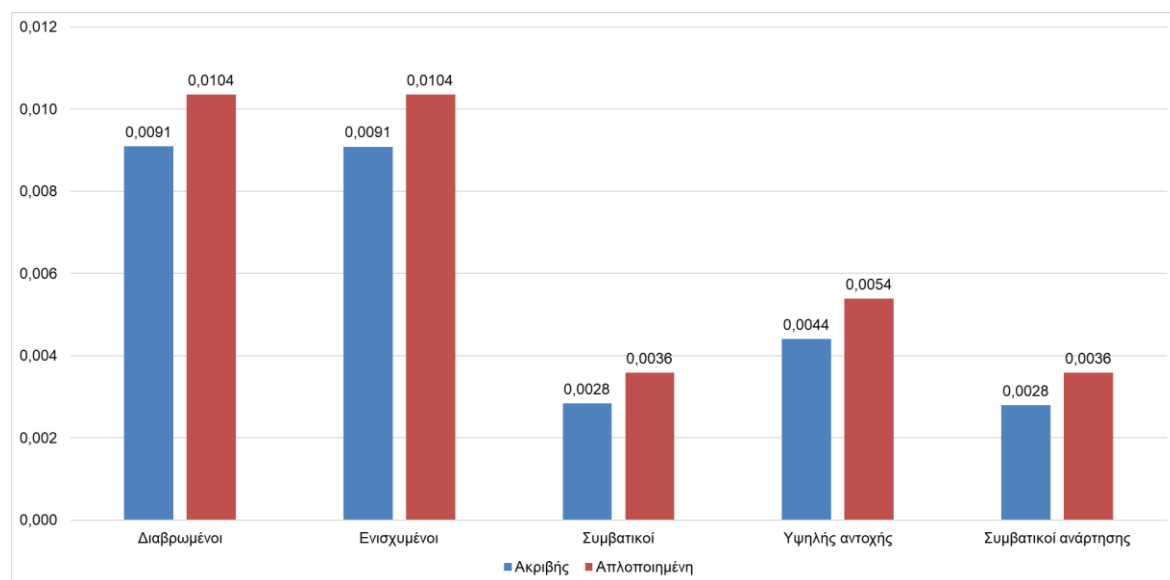
Οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας είναι σειριακά συστήματα με αποτέλεσμα όταν αστοχεί έστω και ένας πυλώνας να διακόπτεται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και να θεωρείται αστοχία ολόκληρης της γραμμής μεταφοράς ενέργειας. Η εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας της γραμμής μεταφοράς για κάθε επεισόδιο ακραίων φαινομένων υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (1). Προκειμένου να υπολογιστεί η ετήσια συχνότητα αστοχίας αξιοποιείται ο στοχαστικός κατάλογος γεγονότων που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.4.4. Στον Πίνακα 3-3 δίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση

την ακριβή μέθοδο και την απλοποιημένη. Στην τελευταία στήλη του ίδιου πίνακα δίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς την ακριβή μεθοδολογία. Όσον αφορά την ενίσχυση της γραμμής δεν υπάρχουν στοιχεία για την τρωτότητα των ενισχυμένων πυλώνων ανάρτησης από τους οποίους απαρτίζεται η γραμμή σύμφωνα με την απλοποιημένη μεθοδολογία, γι αυτό το λόγο τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την περίπτωση της γραμμής που αποτελείται αποκλειστικά από διαβρωμένους πυλώνες, δηλαδή τα αντίστοιχα με την πρώτη περίπτωση. Αντίστοιχα στην περίπτωση 5 που εξετάζονται 2 τύποι πυλώνων με διαφορετικές αντοχές η σύγκριση γίνεται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την αντικατάσταση όλων των πυλώνων με καινούργιους από συμβατικό χάλυβα.

Παρατηρείται ότι σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση τα αποτελέσματα που προκύπτουν σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο είναι πιο συντηρητικά. Στη συνέχεια απεικονίζονται και σχηματικά οι αντίστοιχες ετήσιες συχνότητες (Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.).

Πίνακας 3-3: Σύγκριση μέσης ετήσιας συχνότητας αστοχίας εξεταζόμενων περιπτώσεων
Ετήσια συχνότητα αστοχίας

Περίπτωση	Προτεινόμενη μέθοδος	Απλοποιημένη μέθοδος	Διαφορά
1	0,0091	0,0104	+14%
2	0,0091	0,0104	+14%
3	0,0028	0,0036	+29%
4	0,0044	0,0054	+23%
5	0,0028	0,0036	+29%



Σχήμα 3-1: Σύγκριση μέσης ετήσιας συχνότητας αστοχίας γραμμής για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις

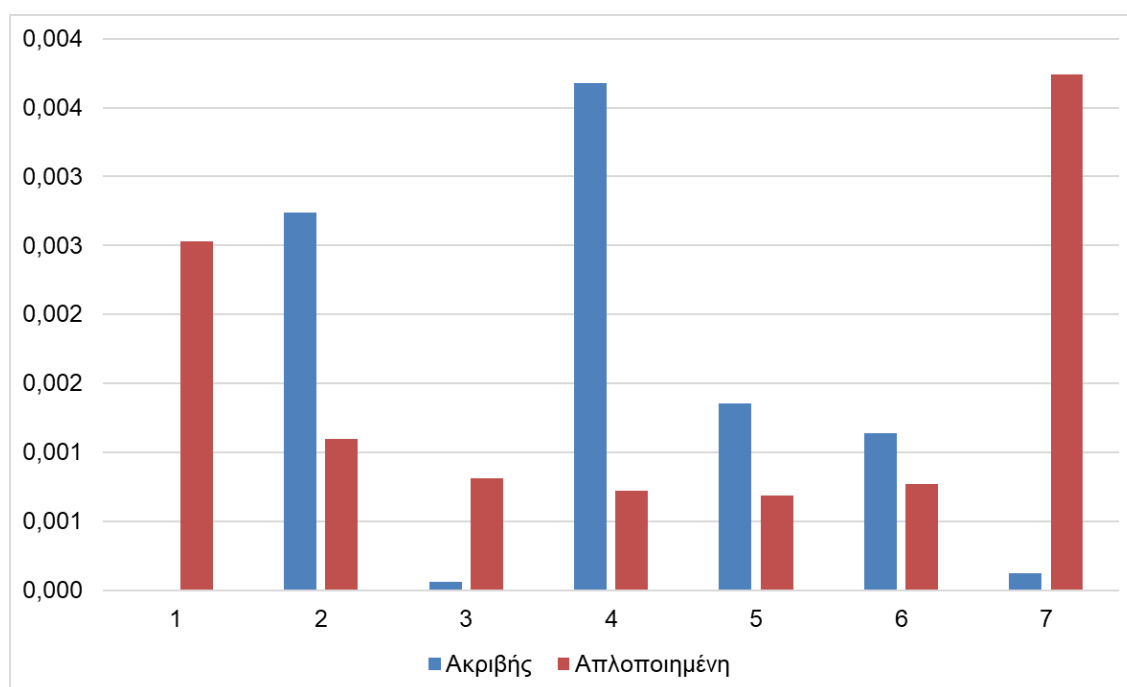
Έπειτα, δίνεται ο Πίνακας 3-4 όπου εξετάζεται η ετήσια συχνότητα αστοχίας διαφορετικού αριθμού πυλώνων για τις 3 περιπτώσεις που μπορούν να μελετηθούν. Η πρώτη περίπτωση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι η περίπτωση όπου όλοι οι πυλώνες θεωρούνται πυλώνες ανάρτησης ύστερα από 60 έτη ζωής (Περίπτωση 1), έπειτα η περίπτωση πυλώνων ανάρτησης κατασκευασμένων από συμβατικό χάλυβα στην αρχική

κατάσταση λειτουργίας τους (Περίπτωση 3), και τέλος η αντίστοιχη περίπτωση από πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα υψηλής αντοχής (Περίπτωση 4). Στην κάθε περίπτωση επισημαίνεται ποια ομάδα πυλώνων συνεισφέρει περισσότερο στην αστοχία της γραμμής μεταφοράς. Στην πρώτη περίπτωση όλοι οι πυλώνες είναι κρίσιμοι, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις η κύρια αστοχία της γραμμής προκύπτει από την αστοχία ενός πυλώνα.

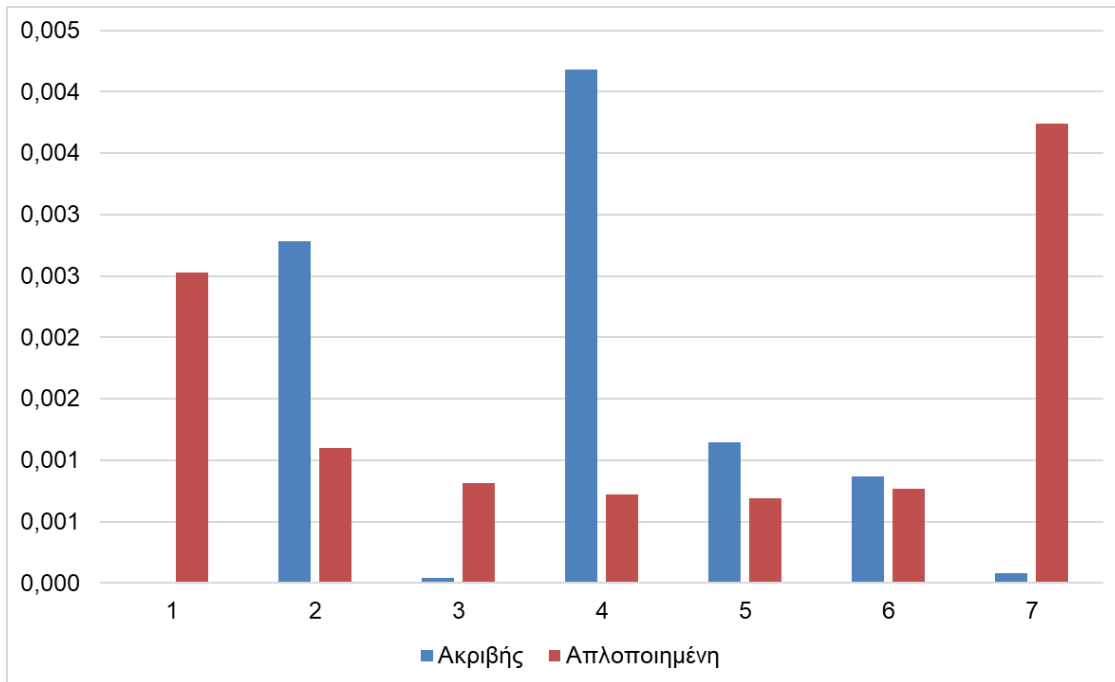
Πίνακας 3-4: Ετήσια συχνότητα αστοχίας διαφορετικού αριθμού πυλώνων

Περίπτωση	Ετήσια συχνότητα αστοχίας						
	1	2	3	4	5	6	7
1	2,53E-03	1,10E-03	8,141E-06	7,18E-04	6,88E-04	7,70E-04	3,74E-03
3	1,53E-03	6,20E-04	3,60E-04	2,55E-04	2,00E-04	1,98E-04	4,20E-04
4	1,95E-03	9,30E-04	5,85E-04	4,30E-04	3,57E-04	3,45E-04	7,89E-04

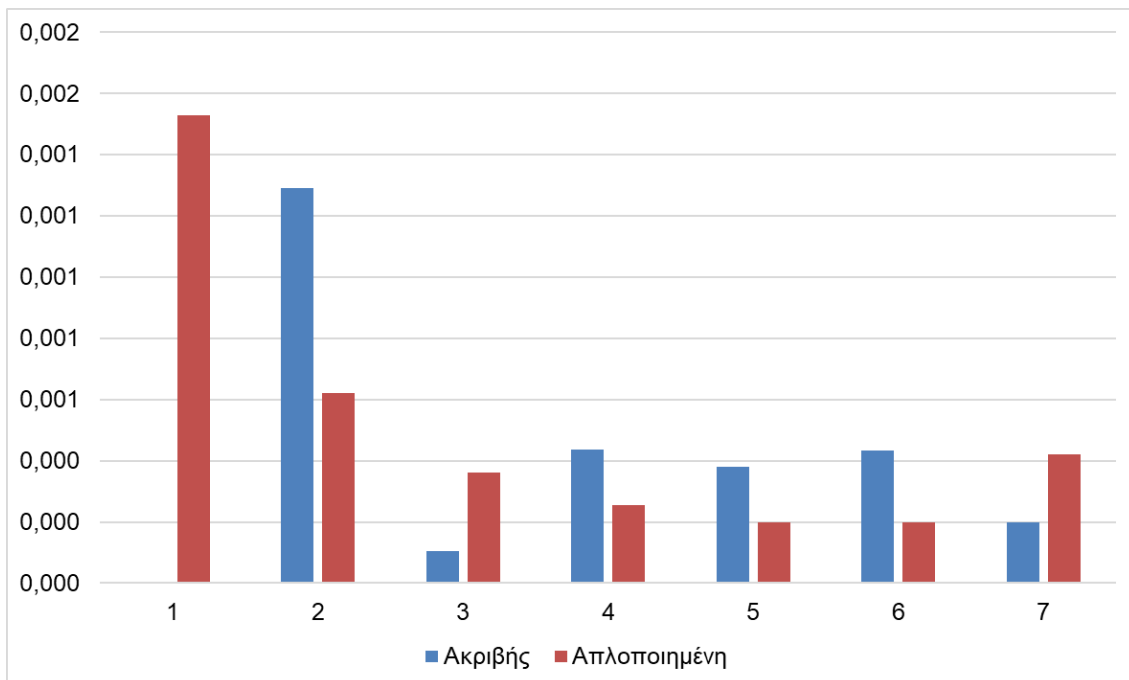
Στα Σχήματα 3-2 έως 3-6 απεικονίζονται οι διαφορές στις ετήσιες συχνότητες αστοχίας μεταξύ της ακριβούς και της απλοποιημένης μεθοδολογίας για διαφορετικό αριθμό πυλώνων. Όπως αναφέρθηκε και για τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 3-1 έτσι και στο Σχήμα 3-3 τα αποτελέσματα για την απλοποιημένη μέθοδο αναφέρονται στην περίπτωση που η γραμμή αποτελείται από διαβρωμένους πυλώνες και αντίστοιχα για το Σχήμα 3-6 αναφέρονται στην αντικατάσταση όλων των πυλώνων με πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα S355.



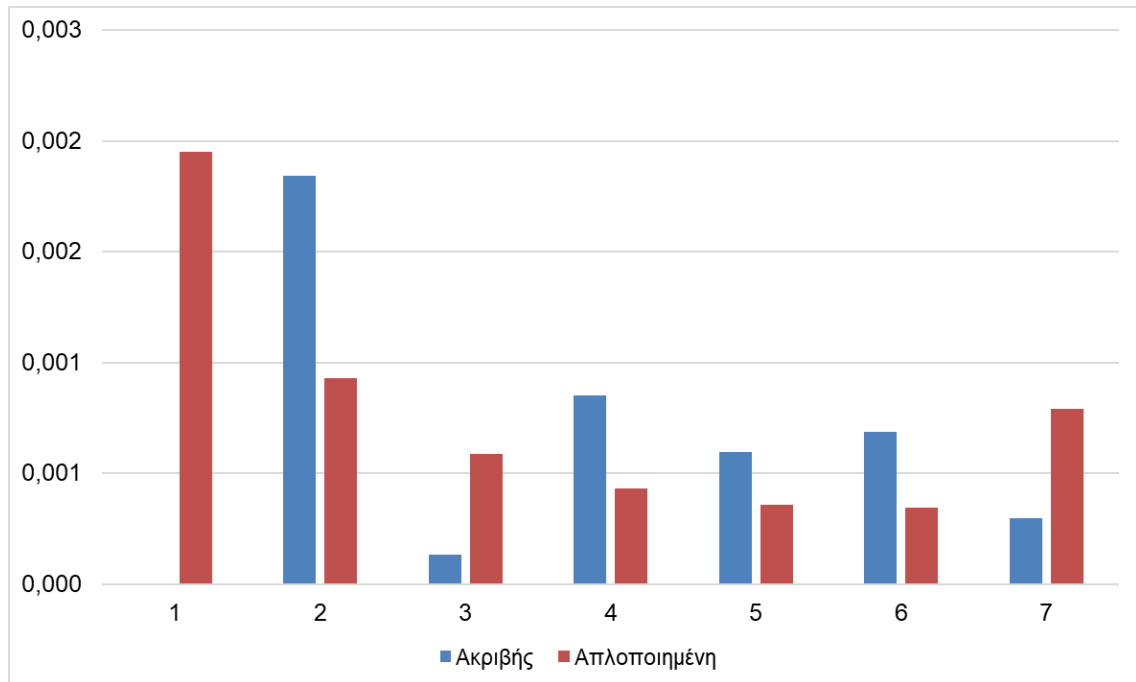
Σχήμα 3-2: Σύγκριση ετήσιας συχνότητας αστοχίας διαφορετικού αριθμού διαβρωμένων πυλώνων



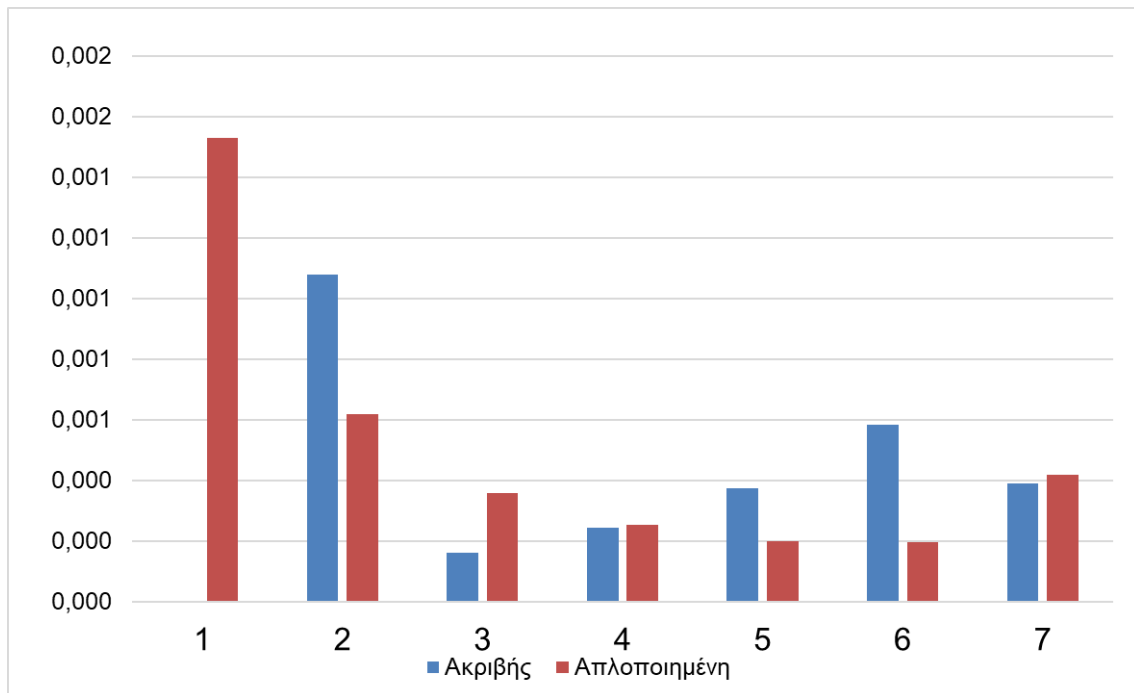
Σχήμα 3-3: Σύγκριση ετήσιας συχνότητας αστοχίας διαφορετικού αριθμού ενισχυμένων πυλώνων



Σχήμα 3-4: Σύγκριση ετήσιας συχνότητας αστοχίας διαφορετικού αριθμού συμβατικών πυλώνων



Σχήμα 3-5: Σύγκριση ετήσιας συχνότητας αστοχίας διαφορετικού αριθμού πυλώνων υψηλής αντοχής



Σχήμα 3-6: Σύγκριση ετήσιας συχνότητας αστοχίας διαφορετικού αριθμού συμβατικών πυλώνων ανάρτησης

3.3 Υπολογισμός κόστους αποκατάστασης

Εξετάστηκαν πέντε εναλλακτικές στρατηγικές αποκατάστασης της εξεταζόμενης γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να επιλεγεί η πιο αποδοτική. Η πρώτη στρατηγική θεωρεί ότι δεν γίνεται καμία παρέμβαση στην γραμμή η οποία αποτελείται αποκλειστικά από διαβρωμένους πυλώνες έπειτα από 60 έτη ζωής. Ύστερα, εξετάζεται η ενίσχυση μόνο των γωνιακών/τερματικών πυλώνων με ανθρακοελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή σε συγκεκριμένα τμήματα των πυλώνων. Ως τρίτη στρατηγική αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς, εξετάζεται η αντικατάσταση όλων των διαβρωμένων πυλώνων κατασκευασμένων από συμβατικό χάλυβα S355 στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους και έπειτα από αντίστοιχους πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα S460 και S355. Τέλος, διερευνάται η περίπτωση αντικατάστασης μόνο των πυλώνων ανάρτησης από καινούργιους κατασκευασμένους από συμβατικό χάλυβα S355. Προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη επιλογή υπολογίστηκαν οι συνολικές απώλειες σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση ύστερα από επιπλέον 60 έτη ωφέλιμης λειτουργίας της γραμμής μεταφοράς ενέργειας.

3.3.1 Annaberg-Buchholz

Οι συνολικές απώλειες ύστερα από 60 έτη ωφέλιμης λειτουργίας της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε στρατηγική αποκατάστασης που εξετάζεται υπολογίζονται ως το άθροισμα του αρχικού κόστους των παρεμβάσεων στην υφιστάμενη γραμμή A_0 και του συνόλου των άμεσων και έμμεσων απωλειών λόγω αστοχίας στη λειτουργία της γραμμής. Προκειμένου να υπολογιστούν οι άμεσες και έμμεσες απώλειες πολλαπλασιάζονται οι μέσες ετήσιες τιμές (MEA_A και MEA_E αντίστοιχα) με το χρονικό διάστημα T_L που εξετάζεται (Εξίσωση 3).

$$K_{60} = A_0 + (MEA_A + MEA_E) \cdot T_L \quad (3)$$

Ο υπολογισμός του αρχικού κόστους παρεμβάσεων στην γραμμή βασίζεται αποκλειστικά στην ενίσχυση ή αντικατάσταση των πυλώνων μεταφοράς. Όσον αφορά την ενίσχυση με ανθρακοελάσματα FRP, το κόστος για τους γωνιακούς πυλώνες υπολογίζεται με βάση το μήκος των μελών που ενισχύονται και το κόστος του υλικού ενίσχυσης. Επίσης λαμβάνεται υπόψη ένα πάγιο κόστος της συνολικής διαδικασίας ενίσχυσης με ανθρακοελάσματα. Όσον αφορά την αντικατάσταση των πυλώνων καταρχάς λαμβάνεται υπόψη το κόστος των μεταλλικών μελών, το οποίο είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνεται η αντοχή του χάλυβα, καθώς και το κόστος μεταφοράς και τοποθέτησης του πυλώνα. Στην περίπτωση επιλεκτικής χρήσης μελών κατασκευασμένων από χάλυβα υψηλής αντοχής στους ορθοστάτες και τα κύρια διαγώνια μέλη, αυτά αποτελούν περίπου τα τρία τέταρτα των συνολικών μεταλλικών μελών. Η χρήση υψηλότερης κατηγορίας χάλυβα συνδυάζεται με την μείωση των διαστάσεων κάποιων μελών με αποτέλεσμα το συνολικό κόστος των

υπόψη πυλώνων να μειώνεται. Οι αναλυτικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς υπάρχουν στο [17].

Οι τελικές τιμές που προκύπτουν για κάθε πυλώνα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-5 και στην τελευταία στήλη του πίνακα φαίνεται το αρχικό κόστος παρεμβάσεων της εκάστοτε εξεταζόμενης γραμμής μεταφοράς, ανάλογα με τον αριθμό των πυλώνων που επηρεάζονται. Στην πρώτη περίπτωση δεν δίνονται τιμές τόσο για τους πυλώνες όσο και για τη γραμμή, διότι δεν γίνεται καμία ενέργεια αποκατάστασης. Στην περίπτωση ενίσχυσης με ανθρακοελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή, επηρεάζονται μόνο οι γωνιακοί/τερματικοί πυλώνες, άρα μόνο τρεις από τους επτά και στην τελευταία περίπτωση αντικαθίστανται μόνο οι τέσσερις πυλώνες ανάρτησης.

Πίνακας 3-5: Κόστος ενίσχυσης/αντικατάστασης

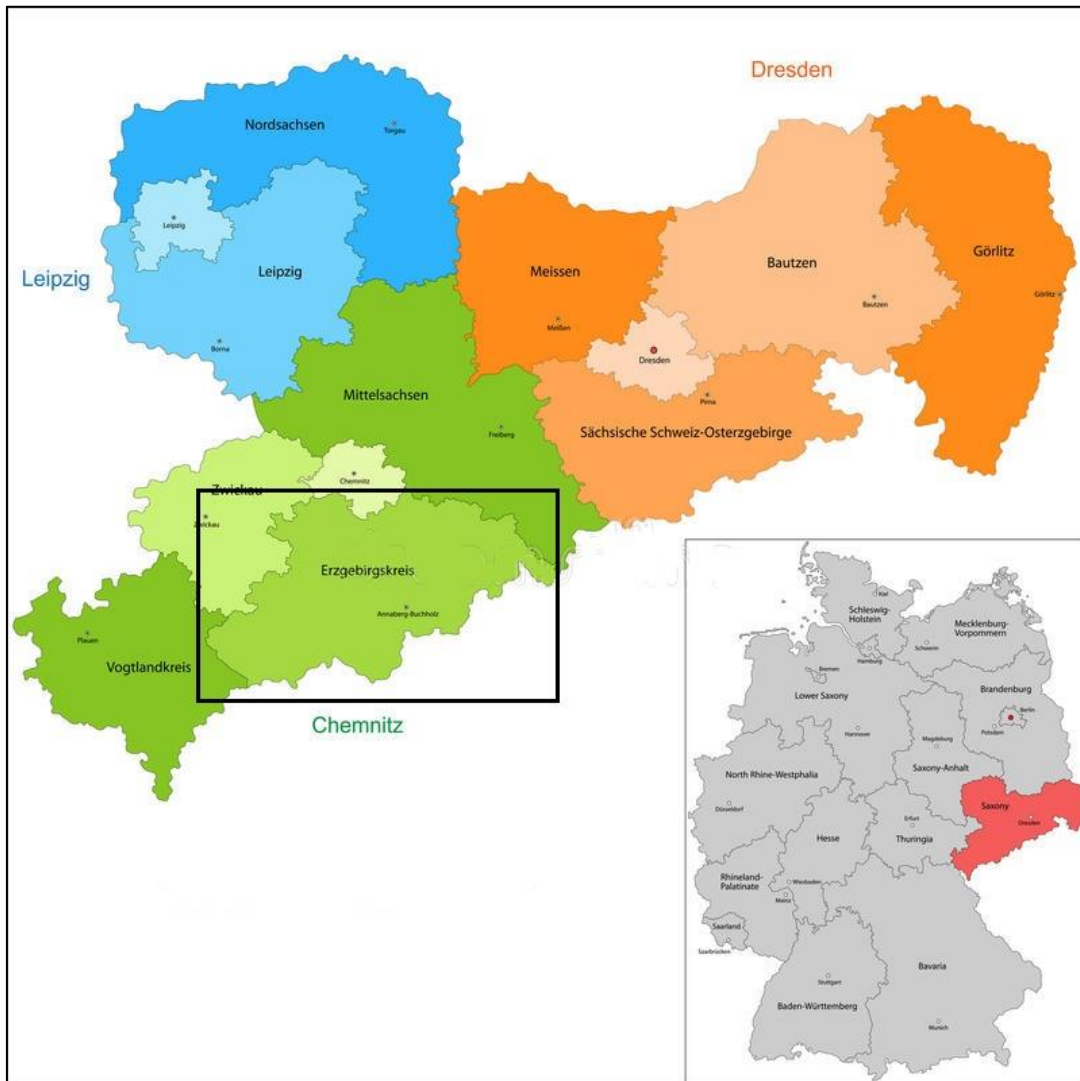
Περίπτωση	Κόστος		
	Πυλώνες ανάρτησης	Γωνιακοί πυλώνες	Γραμμή μεταφοράς
Καμία ενέργεια	—	—	—
Ενίσχυση με FRP	—	27.042€	81.127€
Αντικατάσταση με συμβατικούς πυλώνες	68.439€	223.378€	943.892€
Αντικατάσταση με πυλώνες υψηλής αντοχής	66.052€	194.368€	847.311€
Αντικατάσταση με συμβατικούς πυλώνες ανάρτησης	68.439€	—	273.756€

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι άμεσες ετήσιες απώλειες λόγω αστοχίας της γραμμής μεταφοράς ενέργειας. Οι άμεσες ετήσιες απώλειες υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξίσωση 4 ως το συνολικό άθροισμα του γινομένου του κόστους της κάθε ομάδας πυλώνων (K_i) που αστοχούν επί την ετήσια συχνότητα αστοχίας της ομάδας ($E\Sigma A_i$) με τιμές από τον Πίνακα 3-2. Υπενθυμίζεται ότι οι ομάδες πυλώνων που αστοχούν είναι 6, διότι δεν λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση αστοχίας μόνο ενός πυλώνα. Για τον υπολογισμό του κόστους της κάθε ομάδας πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των πυλώνων που αστοχούν (ανάρτησης ή γωνιακός/τερματικός) με το κόστος αντικατάστασης του αντίστοιχου τύπου πυλώνα με κάποιον καινούργιο κατασκευασμένο από συμβατικό χάλυβα S355 (Πίνακας 3-5).

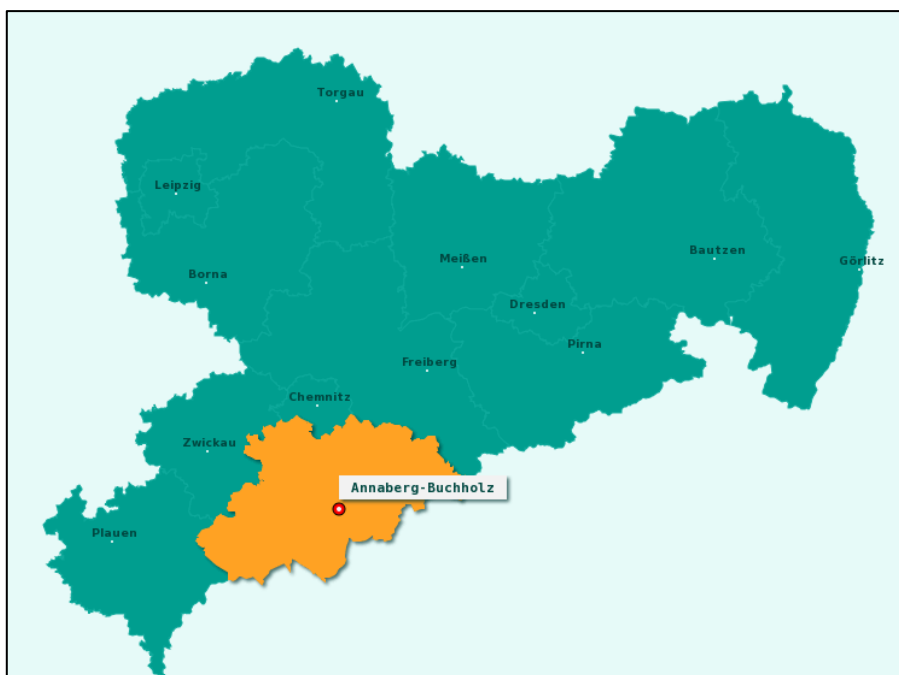
$$ME A_A = \sum_{i=2}^7 K_i * E\Sigma A_i \quad (4)$$

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος που πρέπει να υπολογιστεί είναι οι έμμεσες ετήσιες απώλειες εξαιτίας των διακοπών ηλεκτροδότησης. Οι έμμεσες ετήσιες απώλειες υπολογίζονται ως το γινόμενο του κόστους μιας διακοπής επί την συχνότητα εμφάνισης μιας διακοπής, η συχνότητα αυτή ισούται με την μέση ετήσια συχνότητα αστοχία της γραμμής μεταφοράς ενέργειας. Το κόστος μιας διακοπής ηλεκτροδότησης εξαρτάται από τον συνολικό πληθυσμό που επηρεάζει καθώς και την διάρκεια της διακοπής. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε τόσο για την περιοχή Annaberg-Buchholz όσο και την περιοχή Erzgebirgskreis. Η περιοχή Erzgebirgskreis ανήκει στην ευρύτερη περιοχή της Σαξονίας που

αποτελεί κρατίδιο της Ανατολικής Γερμανίας (Σχήμα 3-7). Η πόλη Annaberg-Buchholz είναι μια από τις πόλεις της περιοχής Erzgebirgskreis (Σχήμα 3-8) με σημαντικά μικρότερο πληθυσμό. Η πόλη αυτή αποτελείται κατά μέσο όρο από 36.525 κατοίκους. Για τον υπολογισμό των έμμεσων απωλειών εκτός από τον αριθμό των κατοίκων γίνεται η παραδοχή ότι μια διακοπή χρειάζεται 9 μέρες για την πλήρη αποκατασταση της, με αποτέλεσμα το συνολικό κόστος μιας διακοπής να προκύπτει ίσο με 1.369.688€. Το κόστος αυτό πολλαπλασιάζεται με την ετήσια συχνότητα αστοχίας της γραμμής μεταφοράς και προκύπτει ο προσδιορισμός των έμμεσων ετήσιων απωλειών.



Σχήμα 3-7: Χάρτης Σαξονίας



Σχήμα 3-8: Χάρτης Erzgebirgskreis

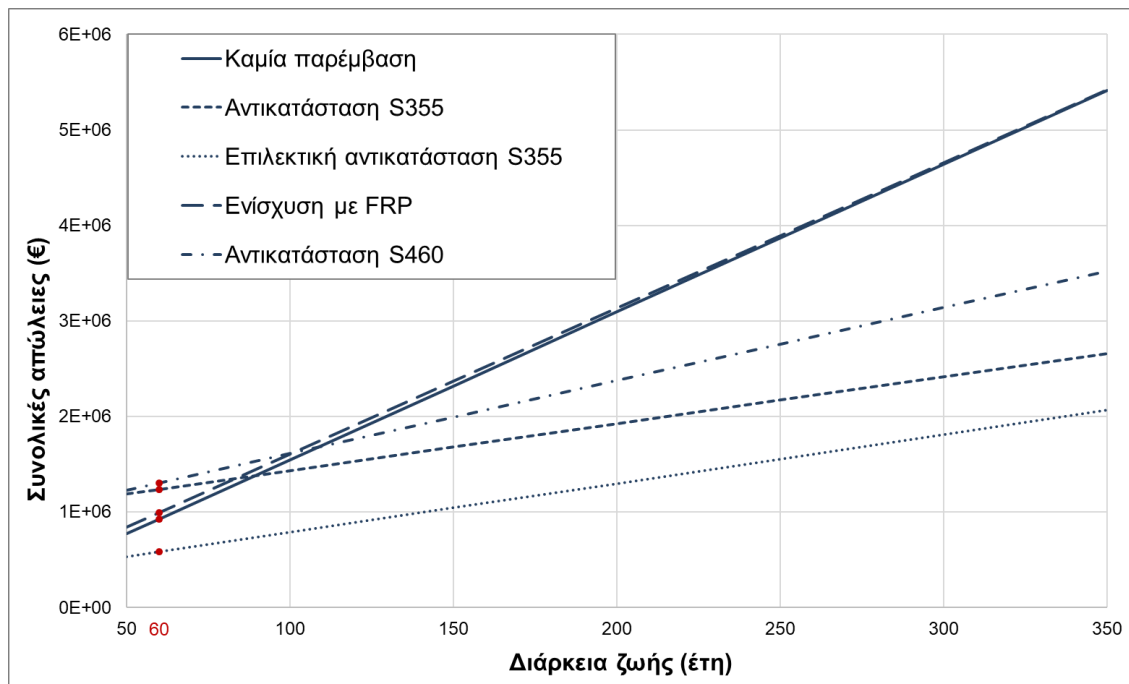
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο υπολογισμός των συνολικών απωλειών της γραμμής ύστερα από επιπλέον 60 έτη λειτουργίας προκύπτει ως το άθροισμα του κόστους των αρχικών παρεμβάσεων και του συνόλου των άμεσων και έμμεσων ετήσιων απωλειών πολλαπλασιασμένο με την εξεταζόμενη διάρκεια ζωής του έργου. Στον Πίνακα 3-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και η σύγκριση τους σε σχέση με το κόστος της πρώτης περίπτωσης, όπου δεν γίνεται καμία αρχική ενέργεια στη γραμμή. Όλες οι στρατηγικές αποκατάστασης που εξετάζονται για τη γραμμή μεταφοράς παρουσιάζουν μεγαλύτερο κόστος για διάρκεια ζωής επιπλέον 60 ετών της γραμμής, με δυσμενέστερη την περίπτωση αντικατάστασης πυλώνων με κατασκευασμένους από χάλυβα S460, πλην της τελευταίας η οποία είναι η βέλτιστη από οικονομικής άποψης. Η αντικατάσταση μόνο των πυλώνων ανάρτησης με πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα S355 στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους έχει το μικρότερο συνολικό κόστος.

Πίνακας 3-6: Συνολικό κόστος γραμμής ύστερα από 60 έτη λειτουργίας-Annaberg

Περίπτωση	Συνολικό κόστος	Διαφορά
Καμία ενέργεια	9,28E+05€	—
Ενίσχυση με FRP	9,96E+05€	+7%
Αντικατάσταση πυλώνων χάλυβα S355	1,24E+06€	+33%
Αντικατάσταση πυλώνων με χάλυβα S460	1,31E+06€	+41%
Αντικατάσταση πυλώνων ανάρτησης χάλυβα S355	5,81E+05€	-37%

Στην συνέχεια γίνεται διερεύνηση των συνολικών απωλειών ως προς την διάρκεια ζωής της γραμμής μεταφοράς ενέργειας όλων των περιπτώσεων. Στο Σχήμα 3-9 απεικονίζονται

τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσον αφορά την διάβρωση των πυλώνων, θεωρείται ότι γίνονται ενέργειες για την διακοπή της στα 60 έτη και δεν συνεχίζει προκαλώντας μεγαλύτερη απομείωση των χαρακτηριστικών των μεταλλικών μελών και κατ' επέκταση της τρωτότητας των πυλώνων έναντι καιρικών κινδύνων. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που δόθηκαν στον Πίνακα 2-6 και αφορούσαν την εξεταζόμενη περίπτωση των επιπλέον 60 ετών διάρκειας ζωής της γραμμής.

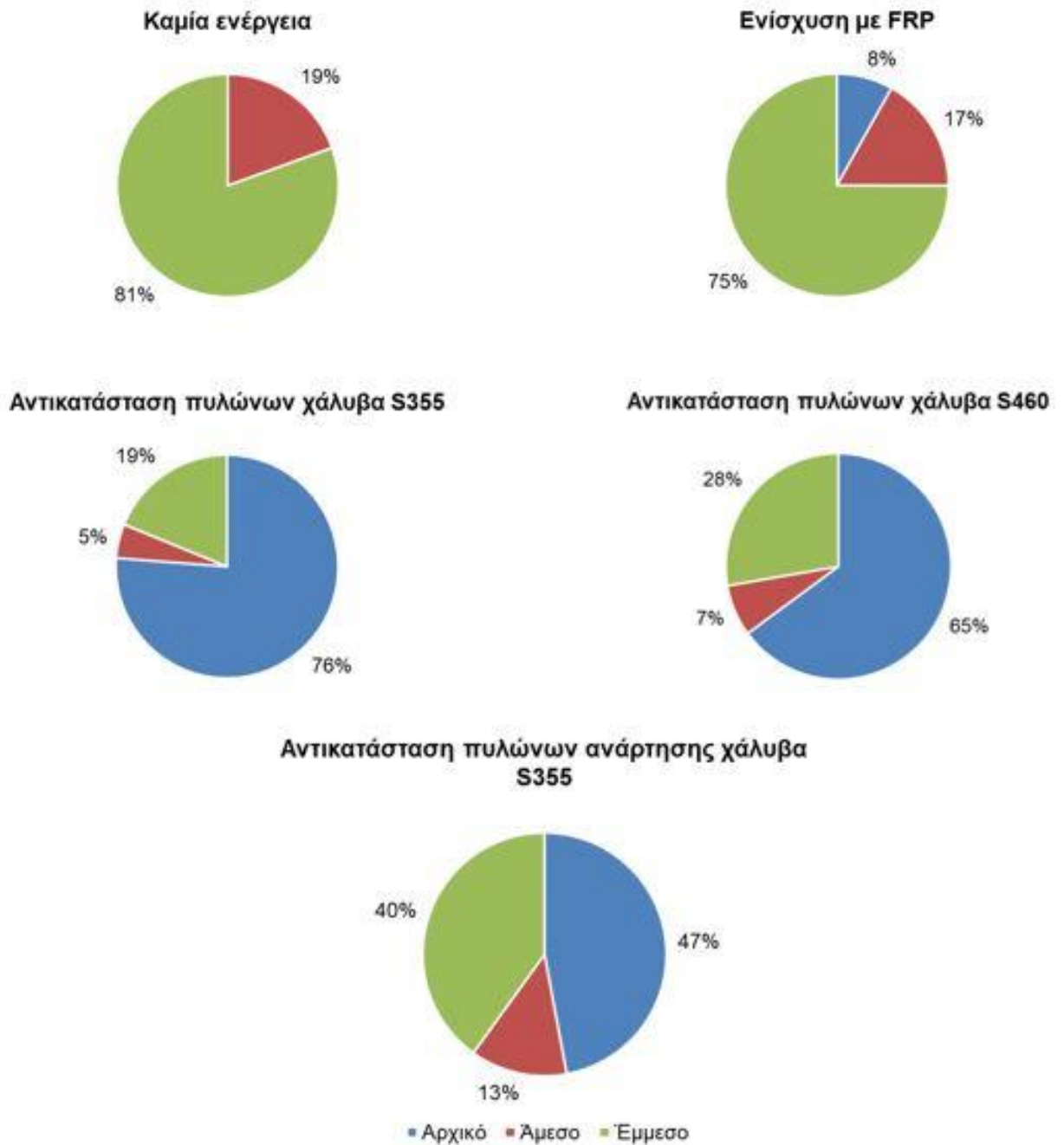


Σχήμα 3-9: Σύγκριση συνολικού κόστους στρατηγικών αποκατάστασης γραμμής ως προς τα έτη λειτουργίας

Από το Σχήμα 3-9 εξάγεται το συμπέρασμα ότι από οικονομικής άποψης η βέλτιστη επιλογή, σε κάθε περίπτωση, είναι η αντικατάσταση των πυλώνων ανάρτησης. Η ενίσχυση των πυλώνων με ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) δεν μεταβάλλει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα. Αν αγνοηθεί η περίπτωση αντικατάστασης των πυλώνων με καινούργιους από χάλυβα S355, μέχρι την διάρκεια των 90 ετών η καλύτερη επιλογή είναι να μην γίνει κάποια ενέργεια αποκατάστασης στην γραμμή μεταφοράς αλλά για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα η αντικατάσταση με πυλώνες κατασκευασμένους από συμβατικό χάλυβα S355 στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους είναι σχεδόν απαραίτητη.

Ακολουθεί η διερεύνηση του κάθε παράγοντα οικονομικών απωλειών στο συνολικό κόστος της κάθε εξεταζόμενης στρατηγικής αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς ενέργειας. Για κάθε περίπτωση της γραμμής μεταφοράς ενέργειας εξετάζεται το ποσοστό συμμετοχής του αρχικού κόστους και των άμεσων και έμμεσων απωλειών στο συνολικό κόστος. Είναι προφανές ότι στις περιπτώσεις αντικατάστασης των πυλώνων το αρχικό κόστος καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό. Φυσικά η αντικατάσταση μόνο των πυλώνων ανάρτησης μειώνει σημαντικά αυτό το κόστος με αποτέλεσμα να μειώνεται και το συνολικό κόστος της γραμμής, παράλληλα όμως αυξάνεται το ποσοστό των έμμεσων

απωλειών εξαιτίας της ύπαρξης των διαβρωμένων γωνιακών/τερματικών πυλώνων. Ακόμα όσο μειώνεται η τρωτότητα των πυλώνων παρατηρείται ότι μειώνονται οι άμεσες.



Σχήμα 3-10: Ποσοστό συμμετοχής στο συνολικό κόστος του αρχικού κόστους, των άμεσων και έμμεσων απωλειών

3.3.2 Erzgebirgskreis

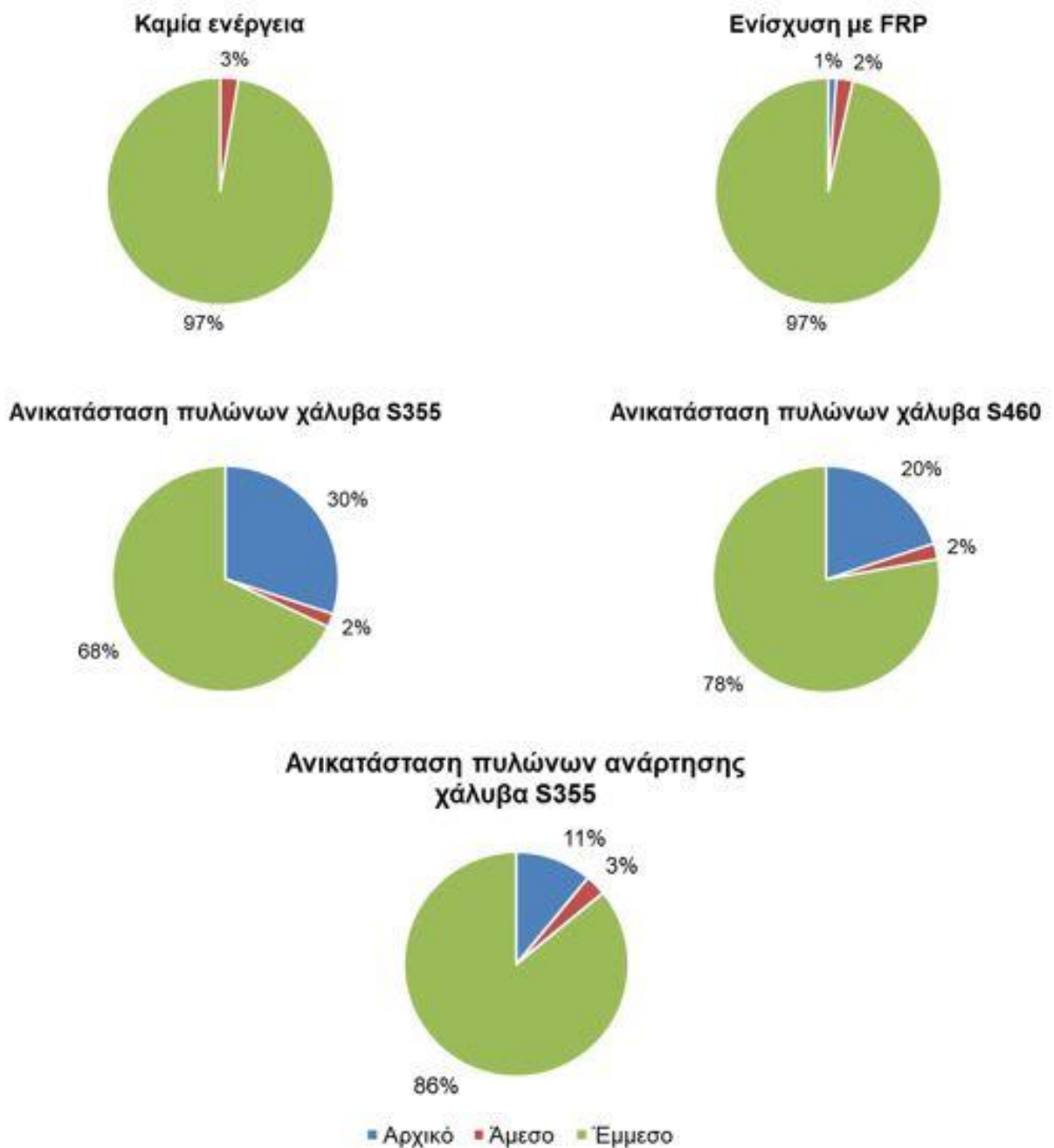
Σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους των γραμμών μεταφοράς ενέργειας είναι οι έμμεσες ετήσιες απώλειες οι οποίες εξαρτώνται από τον πληθυσμό των κατοίκων που εξυπηρετεί η γραμμή μεταφοράς ενέργειας. Με δεδομένα τα αποτελέσματα της ετήσιας συχνότητας αστοχίας των ομάδων πυλώνων (Πίνακας 3-2) επαναυπολογίζονται οι έμμεσες απώλειες σε μια μεγαλύτερης κλίμακας περιοχή. Επιλέγεται ολόκληρη η περιοχή

Erzgebirgskreis (Σχήμα 3-8) με συνολικό πληθυσμό 334.948 κατοίκων. Ακολουθώντας την διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως υπολογίζονται τα συνολικά κόστη για επιπλέον 60 έτη ωφέλιμης ζωής της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 3-7: Συνολικό κόστος γραμμής ύστερα από 60 έτη λειτουργίας-Erzgebirgskreis

Περίπτωση	Συνολικό κόστος	Διαφορά
Καμία ενέργεια	7,03E+06€	—
Ενίσχυση με FRP	7,10E+06€	+1%
Αντικατάσταση πυλώνων χάλυβα S355	3,14E+06€	-55%
Αντικατάσταση πυλώνων με χάλυβα S460	4,26E+06€	-39%
Αντικατάσταση πυλώνων ανάρτησης χάλυβα S355	2,48E+06€	-65%

Όπως στη γραμμή μεταφορά στην πόλη Annaberg-Buchholz έτσι και σ' αυτή την περίπτωση η βέλτιστη στρατηγική αποκατάστασης της γραμμής έπειτα από επιπλέον 60 έτη ζωής είναι η αντικατάσταση μόνο των πυλώνων ανάρτησης (Πίνακας 3-7). Παρατηρείται ακόμη ότι όσον αφορά την περιοχή Erzgebirgskreis όλες οι στρατηγικές οδηγούν σε μείωση του συνολικού κόστους συγκριτικά με το να μην γίνει κάποια ενέργεια αποκατάστασης στη γραμμή μεταφοράς ενέργειας. Ακολουθεί και πάλι η διερεύνηση των επιμέρους απωλειών στο συνολικό κόστος των εξεταζόμενων περιπτώσεων στο Σχήμα 3-11.

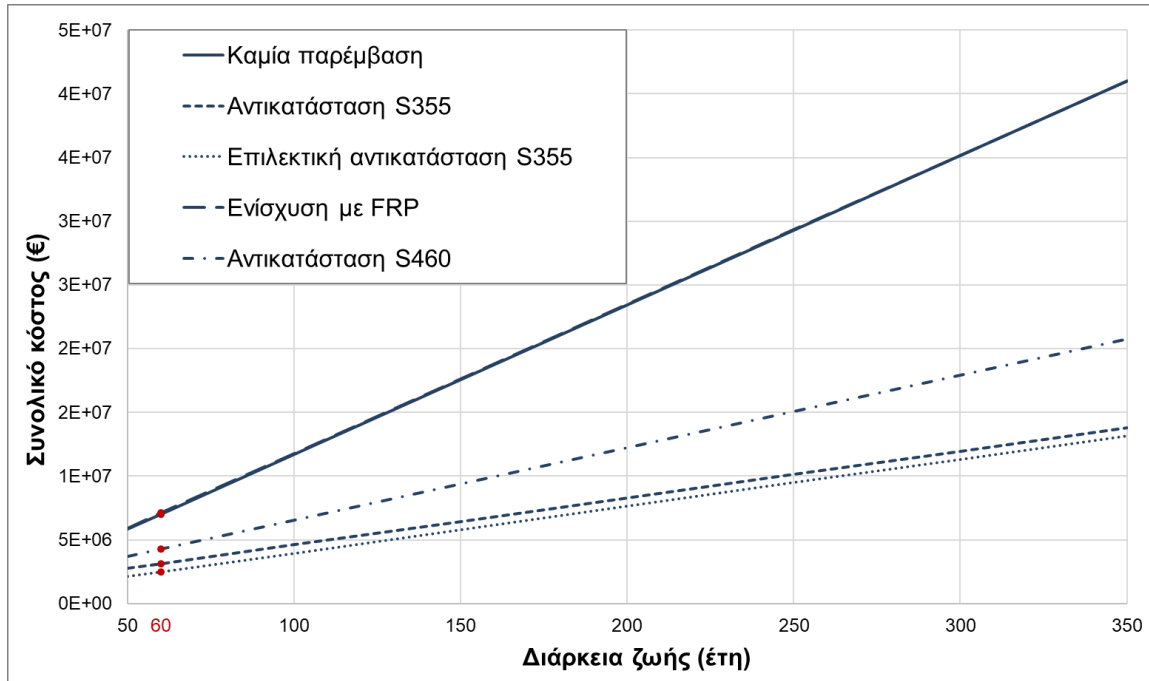


Σχήμα 3-11: Ποσοστό συμμετοχής στο συνολικό κόστος του αρχικού κόστους, των άμεσων και έμμεσων απωλειών

Σε αντίθεση με τη γραμμή μεταφοράς στην πόλη Annaberg-Buchholz, σ' αυτή την περίπτωση το αρχικό κόστος αντικατάστασης των πυλώνων είναι αρκετά μικρό σε σχέση με τα έμμεσα κόστη λόγω των διακοπών ηλεκτροδότησης, ενώ οι άμεσες απώλειες είναι πρακτικά αμελητέες ως προς το τελικό κόστος. Όσο αυξάνεται ο πληθυσμός των ατόμων στους οποίους μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια οι έμμεσες απώλειες είναι ο κυριότερος παράγοντας κόστους.

Ακολουθεί και πάλι η διερεύνηση για πλήθος ετών. Το Σχήμα 3-12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την περιοχή Erzgebirgskreis. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται και πάλι τα αποτελέσματα για τα επιπλέον 60 έτη ζωής της γραμμής. Η βέλτιστη επιλογή είναι πάντοτε

η αντικατάσταση των πυλώνων ανάρτησης με πυλώνες κατασκευασμένους από χάλυβα S355. Βέβαια η διαφορά με του συνολικού κόστους σε σχέση με την αντικατάσταση όλων των πυλώνων είναι σημαντικά μικρότερη συγκριτικά με τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν στο Σχήμα 3-9.



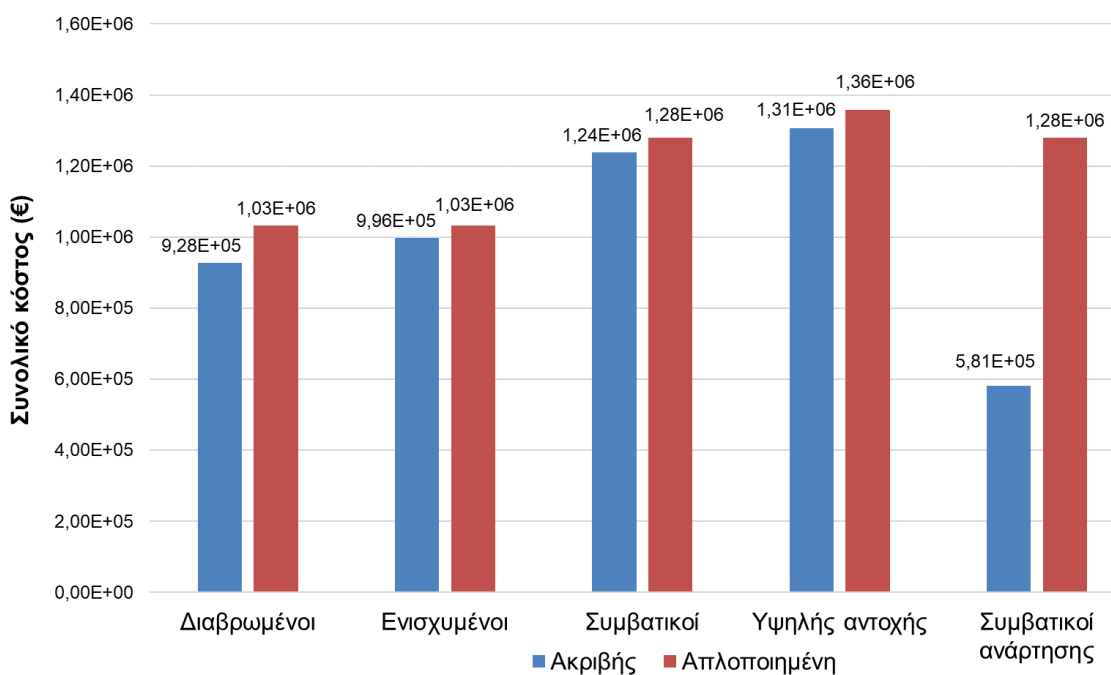
Σχήμα 3-12: Σύγκριση συνολικού κόστους στρατηγικών αποκατάστασης γραμμής ως προς τα έτη λειτουργίας

Τέλος υπολογίζεται το κόστος αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς ενέργειας ύστερα από επιπλέον 60 έτη λειτουργίας της γραμμής χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη μέθοδο και γίνεται και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της ακριβούς μεθόδου. Τα αρχικά κόστη και στις δύο μεθόδους είναι τα ίδια. Ο υπολογισμός των άμεσων και έμμεσων απωλειών ακολουθεί την ίδια υπολογιστική πορεία όπως περιγράφηκε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας φυσικά την ετήσια συχνότητα κάθε ομάδας πυλώνα που αστοχεί με βάση την απλοποιημένη μέθοδο. Ο Πίνακας 3-8 παρουσιάζει τα συνολικά κόστη για την πόλη Annaberg-Buchholz και αντίστοιχα ο Πίνακας 3-9 για την περιοχή Erzgebirgskreis. Τα αποτελέσματα για την ετήσια συχνότητα αστοχίας για την περίπτωση ενίσχυσης των πυλώνων με ανθρακοελάσματα FRP καθώς και την αντικατάσταση αποκλειστικά των πυλώνων ανάρτησης υπολογίστηκαν με βάση τις παραδοχές για την ετήσια συχνότητα που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3-1.

Και στις δύο περιπτώσεις (Annaberg-Buchholz και Erzgebirgskreis) τα αποτελέσματα της απλοποιημένης μεθόδου προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτερα από αυτά που προέκυψαν από την ακριβή μεθοδολογία, ιδιαίτερα στην περίπτωση αντικατάστασης μόνο των πυλώνων ανάρτησης. Ακόμη παρατηρείται ότι σε μεγαλύτερης κλίμακας έργα, όπως στην περίπτωση μελέτης για την περιοχή Erzgebirgskreis οι διαφορές αυτές αυξάνονται σημαντικά.

Πίνακας 3-8: Σύγκριση συνολικού κόστους για 60 έτη ωφέλιμης λειτουργίας-Annaberg

Περίπτωση	Συνολικό κόστος		
	Προτεινόμενη μέθοδος	Απλοποιημένη μέθοδος	Διαφορά
Καμία ενέργεια	9,28E+05€	1,03E+06€	+11%
Ενίσχυση με FRP	9,96E+05€	1,03E+06€	+3%
Αντικατάσταση πυλώνων χάλυβα S355	1,24E+06€	1,30E+06€	+4%
Αντικατάσταση πυλώνων με χάλυβα S460	1,31E+06€	1,38E+06€	+3%
Αντικατάσταση πυλώνων ανάρτησης χάλυβα S355	5,81E+05€	1,30E+06€	+120%

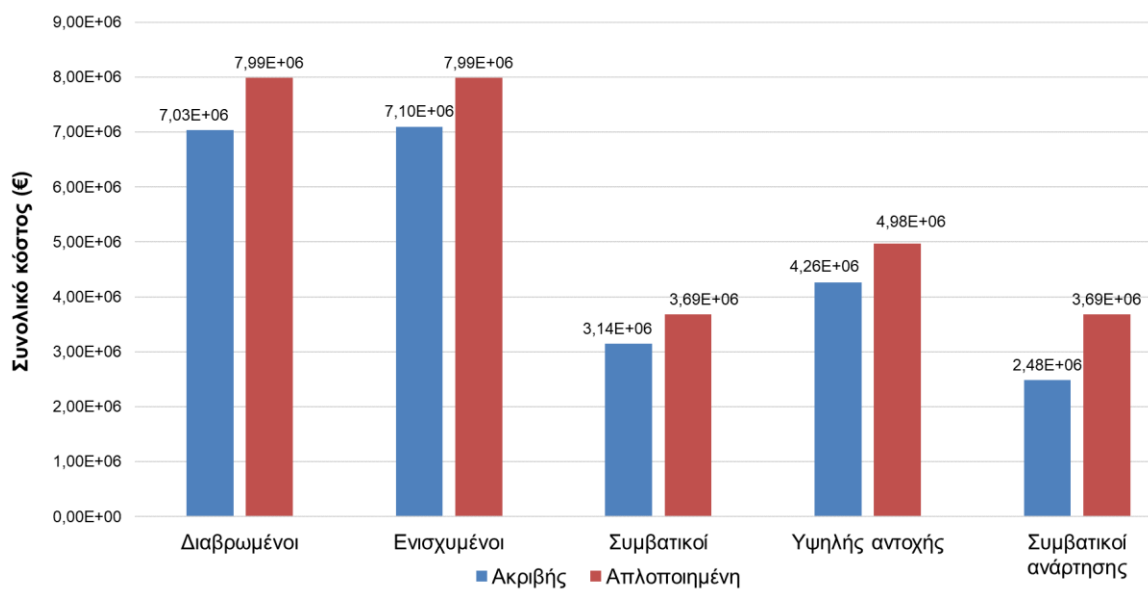


+

Σχήμα 3-13: Σύγκριση συνολικού κόστους για 60 έτη ωφέλιμης λειτουργίας-Annaberg

Πίνακας 3-9: Σύγκριση συνολικού κόστους για 60 έτη ωφέλιμης λειτουργίας-Erzgebirgskreis

Περίπτωση	Συνολικό κόστος		
	Προτεινόμενη μέθοδος	Απλοποιημένη μέθοδος	Διαφορά
Καμία ενέργεια	7,03E+06€	8,01E+06€	+14%
Ενίσχυση με FRP	7,10E+06€	8,01E+06€	+13%
Αντικατάσταση πυλώνων χάλυβα S355	3,14E+06€	3,72E+06€	+17%
Αντικατάσταση πυλώνων με χάλυβα S460	4,26E+06€	5,01E+06€	+17%
Αντικατάσταση πυλώνων ανάρτησης χάλυβα S355	2,48E+06€	3,72E+06€	+48%



Σχήμα 3-14: Σύγκριση συνολικού κόστους για 60 έτη ωφέλιμης λειτουργίας-Erzgebirgskreis

4 Συμπεράσματα

Δεδομένων των αριθμητικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρήθηκε ότι οι πυλώνες ανάρτησης είναι τρωτότεροι συγκριτικά με τους γωνιακούς/τερματικούς πυλώνες. Οι πρώτοι δεν μπορούν να αναλάβουν δυνάμεις κατά μήκος της γραμμής και συνδυάζοντας αυτή την κατάσταση με το γεγονός ότι οι πυλώνες είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με αγωγούς μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η αστοχία ενός πυλώνα είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε αστοχία των γειτονικών πυλώνων ανάρτησης.

Με βάση την εύρεση των κρισιμότερων πυλώνων που προέκυψαν για την κάθε περίπτωση μελέτης και των αλυσιδωτών αστοχιών που πιθανόν να συμβούν, προκύπτει ότι η προσομοίωση μόνο των πυλώνων ανάρτησης, όπως συνηθίζεται στην πράξη, οδηγεί στον υπολογισμό της μέσης ετήσιας συχνότητας αστοχίας της γραμμής αυξημένης σε σχέση με την πραγματική. Επομένως, κρίνεται ότι θα ήταν σκόπιμο κατά την αποτίμηση της διακινδύνευσης να λαμβάνονται υπόψιν οι διαφορετικοί τύποι πυλώνων που απαρτίζουν μια γραμμή μεταφοράς ενέργειας.

Ο ακριβής υπολογισμός της ετήσιας συχνότητας αστοχίας εξυπηρετεί επίσης στον υπολογισμό του συνολικού κόστους της γραμμής μεταφοράς. Έπειτα από τον υπολογισμό του συνολικού κόστους αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς σε μια μικρής και μεγάλης κλίμακας περιοχή (Annaberg-Buchholz και Erzgebirgskreis αντίστοιχα), κρίνεται ότι λαμβάνοντας υπόψη τις αλυσιδωτές αστοχίες και συνεπώς με τον αριθμό των πυλώνων που αστοχούν, τα αποτελέσματα με την απλοποιημένη μέθοδο διαφέρουν σημαντικά ως προς την ακριβή. Όσο αυξάνεται ο πληθυσμός των κατοίκων στους οποίους μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γραμμής μεταφοράς, ο υπολογισμός του συνολικού κόστους με την απλοποιημένη μέθοδο οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές.

Αναφορικά με τις στρατηγικές ενέργειας αποκατάστασης που εξετάζονται για τους πυλώνες μεταφοράς ενέργειας κρίνεται ότι η πιο κερδοφόρα είναι η αντικατάσταση μόνο των πυλώνων ανάρτησης με καινούργιους κατασκευασμένους από συμβατικό χάλυβα S355. Στην περίπτωση αυτή η εξεταζόμενη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει την μικρότερη συχνότητα αστοχίας και το μικρότερο συνολικό κόστος λειτουργίας.

Τέλος, κρίνεται ότι θα ήταν χρήσιμο να εξεταστούν περισσότερες στρατηγικές αποκατάστασης της γραμμής μεταφοράς οι οποίες θα επικεντρώνονται στην βελτίωση της συμπεριφοράς των πυλώνων ανάρτησης.

5 Βιβλιογραφία

- [1].Darestani, Y.M., Shafieezadeh, A., & Cha, K. (2019). Effect of modelling complexities on extreme wind hazard performance of steel lattice transmission towers. *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis 1-16.
- [2].Fu, X., Li, H-N., & Gang, L. (2016). Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads. *Structural Safety*, 58, 1-10.
- [3].Zhang, W., Zhu, J., Liu, H., & Niu, H. (2015). Probabilistic capacity assessment of lattice transmission towers under strong wind. *Frontiers in Built Environment*, 1, 1-12.
- [4].Tian, L., Zhang, X., & Fu, X. (2020). Fragility analysis of a long-span transmission tower–line system under wind loads. *Advances in Structural Engineering*, 136943322090398.
- [5].Fu, X., Li, H-N., Tian, L., Wang, J. & Cheng, H. (2019). Fragility analysis of transmission line subjected to wind loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(4).
- [6].Reinoso, E., Niño, M., Berny, E. & Inzunza, I. (2020). Wind Risk Assessment of Electric Power Lines due to Hurricane Hazard. *Natural Hazards Review*, 21(2), 04020010.
- [7].Rezaei, S. N., Chouinard, L., Langlois, S., & Légeron, F. (2017). A probabilistic framework based on statistical learning theory for structural reliability analysis of transmission line systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(12), 1538–1552.
- [8].Gao, S., Zeng, C., Zhou, L., Liu, X., & Gao, B. (2020). Numerical analysis of the dynamic effects of wine-cup shape power transmission tower-line system under ice-shedding. *Structures*, 24, 1–12.
- [9].Fekr, M., & McClure, G. (1998). Numerical modelling of the dynamic responses of ice-shedding on electrical transmission lines. *Atmospheric Research*, 46(1-2), 1-11.
- [10].Wei, X., Gao, S., & Huang, T. (2020). Analysis of electrical network vulnerability using segmented cascading faults graph. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106519.
- [11].Sperstad, I. B., Solvang, E. H., & Jakobsen, S. H. (2021). A graph-based modelling framework for vulnerability analysis of critical sequences of events in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106408.
- [12].Cadini, F., Agliardi, G. L., & Zio, E. (2017). A modeling and simulation framework for the reliability/availability assessment of a power transmission grid subject to cascading failures under extreme weather conditions. *Applied Energy*, 185, 267–279.
- [13].Sperstad, I. B., Solvang, E. H., & Jakobsen, S. H. (2021). A graph-based modelling framework for vulnerability analysis of critical sequences of events in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106408.
- [14].Guo, H., Zheng, C., Iu, H. H.-C., & Fernando, T. (2017). A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 9–22.

- [15].ILNAS EN 50182:2001 Conductors for overhead lines - Round wire concentric lay stranded conductors European Committee for Electrotechnical Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2001.
- [16].ANGELHY Deliverable 4.1, Parametric Models Of Case Studies And Loads, Research Program of the Research Fund for Coal and Steel ANGELHY, Grant Agreement Number: 753993, European Commission, Brussels, Belgium, 2020.
- [17].ANGELHY Deliverable 4.2, Safety Estimates And Cost Benefit Analyses Of Case Studies, Research Program of the Research Fund for Coal and Steel ANGELHY, Grant Agreement Number: 753993, European Commission, Brussels, Belgium, 2020.
- [18].Ahmed, A., Arthur, C., & Edwards, M. (2010). Collapse and pull – down analysis of high voltage electricity transmission towers subjected to cyclonic wind. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 10, 012004.
- [19].Lee, S., Hwang, S., Park, M., & Lee, H.-S. (2018). "Damage propagation from component level to system level in the electricity sector." *Journal of Infrastructure Systems*, 24(3), 04018016.
- [20].Jaigirdar MA. (2005). Seismic fragility and risk analysis of electric power substations.
- [21].Saafi, M. & Asa, E. (2010). Extending the service life of electric distribution and transmission wooden poles using a wet layup FRP composite strengthening system. *J Perform Constr Facil*, 24 (4), pp. 409-416.
- [22].Yang, SC., Liu, TJ. & Hong, HP. (2017). Reliability of Tower and Tower-Line Systems under Spatiotemporally Varying Wind or Earthquake Loads. *Journal of Structural Engineering*, 143(10): 04017137