



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΑΚΡΑΙΩΝ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ
ΜΕ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΗΣ ΜΟΧΙΑΝΑΚΗΣ ΚΑΡΑΜΠΑΤΖΑΚΗΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΑΚΡΑΙΩΝ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ
ΜΕ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΗΣ ΜΟΧΙΑΝΑΚΗΣ ΚΑΡΑΜΠΑΤΖΑΚΗΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Οκτωβρίου 2021.

.....
N. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής
ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Καθηγητής
ΕΜΠ

.....
Γ. Κορρές
Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

.....
Αντώνης Μοχιανάκης Καραμπατζάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Αντώνης Μοχιανάκης Καραμπατζάκης, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι φυσικές καταστροφές αποτελούν ένα σημαντικό κίνδυνο για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) με βαρύνουσες κοινωνικές και οικονομικές προεκτάσεις, όπως η απώλεια ανθρώπινων ζώων και η καταστροφή κρίσιμων υποδομών. Συνεπώς καθίσταται επιτακτική η ανάγκη ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των ΣΗΕ απέναντι στις φυσικές καταστροφές, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Στόχος είναι το δίκτυο να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τέτοια γεγονότα, να ανακάμπτει γρήγορα μετά από το πέρας τους και να προσαρμόζει τη δομή και τη λειτουργία του για να μειώσει τις επιπτώσεις αντίστοιχων φαινομένων στο μέλλον.

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του ΣΗΕ έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι τυφώνες, τα οποία αποτελούν συμβάντα μικρής πιθανότητας αλλά μεγάλων επιπτώσεων, μέσω της επιλεκτικής υπογειοποίησης γραμμών μεταφοράς, προκειμένου να προστατευτούν από μελλοντικούς τυφώνες. Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους υπό το δυσμενέστερο σενάριο βλάβης λόγω της φυσικής καταστροφής. Ιστορικά δεδομένα τυφώνων λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να αποφασιστεί ποιες γραμμές θα υπογειοποιηθούν. Το συνολικό κόστος αποκοπής υπολογίζεται με το άθροισμα του κόστους αποκοπής φορτίου κάθε φορά που ένας τυφώνας πλήττει το δίκτυο και προκαλεί βλάβες στις γραμμές, οι οποίες οδηγούν σε μη εξυπηρέτηση της συνολικής ζήτησης και το κόστος επένδυσης για την υπογειοποίηση των γραμμών. Οι πιθανότητες βλάβης των γραμμών υπολογίζονται ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες ευθραυστότητας. Θεωρείται ότι η πιθανότητα βλάβης των υπόγειων γραμμών κατά τη διάρκεια του τυφώνα είναι ίση με την πιθανότητα υπό κανονικές συνθήκες. Οι πιθανότητες αυτές λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος αποκοπής φορτίου υπό το δυσμενέστερο σενάριο. Ένα πρόβλημα εύρωστου προγραμματισμού αναπτύχθηκε ώστε να εντοπιστεί το δυσμενέστερο σενάριο θεωρώντας τις υποβαθμισμένες καταστάσεις του συστήματος με πιθανότητα άνω ενός ορίου, το οποίο τίθεται από τον διαχειριστή του συστήματος.

Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως ένα min-max-min πρόβλημα τριών επιπέδων και στη συνέχεια αναδιαμορφώνεται ως ένα min-max πρόβλημα δύο επιπέδων. Εφαρμόζοντας τη θεωρία δυικότητας και τεχνικές γραμμικοποίησης, το εσωτερικό max-min πρόβλημα διαμορφώνεται ως γραμμικό πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού ενός επιπέδου. Το πρόβλημα δύο επιπέδων επιλύεται ως πρόβλημα δύο σταδίων με τη χρήση της μεθόδου Column & Constraint Generation. Το κύριο πρόβλημα αποφασίζει την βέλτιστη υπογειοποίηση των γραμμών, ενώ το υποπρόβλημα εντοπίζει τις βλάβες γραμμών που οδηγούν στη μεγιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε στο πρότυπο δίκτυο 24 ζυγών της IEEE, για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά της. Η επίλυση της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε με την εργαλειοθήκη YALMIP, στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου, τα οποία αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της υπογειοποίησης γραμμών μεταφοράς για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου.

Λέξεις – κλειδιά: ανθεκτικότητα, ακραία καιρικά φαινόμενα, φυσικές καταστροφές, τυφώνες, υπογειοποίηση γραμμών μεταφοράς, ελαχιστοποίηση κόστους

Abstract

Natural disasters pose a significant risk to Power Systems with significant social and economic implications, such as the loss of human lives and the destruction of critical infrastructure. Therefore, the need to strengthen the resilience of Power Systems against natural disasters, such as extreme weather events, becomes urgent. The aim is the network to deal effectively with such events, to recover quickly after their completion, to be able to adapt its structure and operation to reduce the effects of similar phenomena in the future.

This dissertation aims to enhance the resilience of Power Systems to extreme weather events, such as hurricanes, which are “High-Impact Low-Probability Events” (HILP), through the selective undergrounding of electric power transmission lines in order to protect them from future hurricanes. The aim of the problem is to minimize the total cost under the worst case scenario (due to damages provoked by natural disaster). Historical hurricane data is taken into account in deciding which power lines will go underground. The total cost is calculated by summing the load shedding cost each time a hurricane hits the grid and causes damage to the power lines, leading to non-service of total demand and the investment cost for the undergrounding of the lines. The line failure probabilities due to extreme weather are calculated as a function of wind speed using fragility curves. The damage probability of undergrounding lines during the hurricane is equal with the probability under normal weather circumstances. These probabilities are taken into account in order to minimize the load shedding cost under the worst case scenario. A robust programming problem has been developed to identify the worst case scenario by considering degraded system states with a probability over a threshold, which is set by the system administrator.

The problem is formulated as a tri-level min-max-min problem and then reformulated as a bi-level min-max problem. Applying duality theory and linearization techniques, the internal max-min problem is formed as mixed integer programming. The two-level problem is solved as a two-stage problem using the Column & Constraint Generation (C&CG) method. The master problem calculates the optimal undergrounding of power lines, while the subproblem determines the line failures that lead to the maximization of the operating cost of the system. The proposed method was applied to the standard IEEE 24-bus test system to evaluate its effectiveness. The optimization solution was performed with the modeling and optimization toolbox YALMIP, in the MATLAB programming environment. The last chapter presents the results of the application of the method, which highlight the effectiveness of the undergrounding of transmission lines to enhance the resilience of the network.

Keywords: resilience, extreme weather events, natural disasters, hurricanes, underground transmission lines, cost minimization

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021 στα πλαίσια του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλα Χατζηαργυρίου για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος κ. Δημήτρη Τράκα για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και την υπομονή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, στις ιδιαίτερες συνθήκες που δημιούργησε η πανδημία του covid-19.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιώργο και Δέσποινα, την αδερφή μου Μαριλένα για την αμέριστη, πολυεπίπεδη στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και όλους τους φίλους μου, όλους όσοι διανύσαμε μαζί, δίπλα δίπλα, αυτά τα όμορφα φοιτητικά χρόνια.

Αντώνης Μοχιανάκης Καραμπατζάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Εικόνων	12
Κεφάλαιο 1° - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	13
Εισαγωγή.....	13
Φυσικοί κίνδυνοι, ακραία καιρικά φαινόμενα.....	14
Επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων στα ηλεκτρικά δίκτυα.....	14
Παραδείγματα από τις χώρες του εξωτερικού	16
Πρόσφατα παραδείγματα από την Ελλάδα.....	21
Ανθεκτικότητα	23
Καμπύλη ανθεκτικότητας.....	24
Μέτρα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας.....	25
Επικαιρότητα συζήτησης για την ανθεκτικότητα των δικτύων	27
Υπογειοποίηση γραμμών ηλεκτρικού δικτύου	29
Έργα υπογειοποίησης	32
Κεφάλαιο 2° - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	34
Κατάλογος συμβόλων	35
Υπολογισμός των πιθανοτήτων βλάβης στις γραμμές	37
Πρόβλημα βελτιστοποίησης	38
Εξισώσεις προβλήματος βελτιστοποίησης	39
Επίλυση προβλήματος	41
Αναδιαμόρφωση προβλήματος	41
Αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος.....	44
Κεφάλαιο 3° - ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	46
YALMIP	46
Εφαρμογή στο πρότυπο δίκτυο 24 ζυγών της IEEE.....	46
Περίπτωση 1 - Μεταβολή της τιμής της παραμέτρου π_{thres}	53
Περίπτωση 2 – Μεταβολή της τιμής της παραμέτρου N.....	57
Περίπτωση 3 – Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου	59
Περίπτωση 4 – Μεταβολή του φορτίου	61
Χρόνος επίλυσης προβλήματος	61
Κεφάλαιο 4° – ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
Σύνοψη.....	63
Συμπεράσματα.....	64
Κεφάλαιο 5° - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	65

Βιβλιογραφία 66

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Παραδείγματα ακραίων φαινομένων.....	15
Σχήμα 2. Καμπύλη Ανθεκτικότητας.....	24
Σχήμα 3. Αριθμός καταγεγραμμένων φυσικών καταστροφών 1900-2019	28
Σχήμα 4. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπόγειων και εναέριων γραμμών.....	30
Σχήμα 5. Καμπύλες ευθραστότητας.....	37
Σχήμα 6. Πρότυπο 24 ζυγών της ΙΕΕΕ.....	49
Σχήμα 7. Διάγραμμα εξέλιξης της ταχύτητας του ανέμου στη διάρκεια του 24ώρου για 3 διαφορετικές περιπτώσεις τυφώνων	50
Σχήμα 8. Ημερήσια ζήτηση φορτίου	50

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Αιτίες διακοπών ρεύματος, μέγεθος ισχύς και μέσος αριθμός καταναλωτών που επηρεάστηκαν	15
Πίνακας 2. Μεγάλες διακοπές ρεύματος παγκόσμια το διάστημα 2011-2016	16
Πίνακας 3. Σύγκριση κατεστραμμένων πυλώνων διανομής εξαιτίας διαφορετικών τυφώνων	18
Πίνακας 4. Πίνακας γραμμών για το Πρότυπο 24 ζυγών της IEEE.....	48
Πίνακας 5. Ταχύτητες ανέμου ανά ώρα για τρεις περιπτώσεις τυφώνων	51
Πίνακας 6. Ευάλωτες γραμμές μεταφορές εξαιτίας των ισχυρών ανέμων που χτυπούν το δίκτυο.....	52
Πίνακας 7. Μεταβολή παραμέτρου π_{thres} (N=3)	53
Πίνακας 8. Μεταβολή παραμέτρου π_{thres} (N=7)	54
Πίνακας 9. Παραδείγματα αλλαγής των γραμμών που επιλέγονται για υπογειοποίηση. Μεγαλύτερος προϋπολογισμός	54
Πίνακας 10. Παραδείγματα αλλαγής των γραμμών που επιλέγονται για υπογειοποίηση. Μικρότερος προϋπολογισμός	55
Πίνακας 11. Αποτελέσματα μεθόδου για δεύτερο τυφώνα στη δεύτερη περιοχή.....	56
Πίνακας 12. Αποτελέσματα μεθόδου για τρίτο τυφώνα στη δεύτερη περιοχή.....	57
Πίνακας 13. Μεταβολή παραμέτρου N ($\pi_{thres} = 1\%$).....	58
Πίνακας 14. Μεταβολή παραμέτρου N ($\pi_{thres} = 3\%$).....	58
Πίνακας 15. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά +2%.....	59
Πίνακας 16. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά +4%.....	60
Πίνακας 17. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά -2%.....	60
Πίνακας 18. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά -4%.....	60
Πίνακας 19. Μεταβολή φορτίου	61
Πίνακας 20. Χρόνος εκτέλεσης με μεταβολή παραμέτρου π_{thres}	61
Πίνακας 21. Χρόνος εκτέλεσης με μεταβολή ταχύτητας ανέμου	62

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Κατεστραμμένος πυλώνας διανομής ενέργειας στην περιοχή Guayama, Puerto Rico.....	17
Εικόνα 2. Κατεστραμμένος πυλώνας μεταφοράς ενέργειας έξω από την πόλη της Νέας Ορλεάνης μετά τον τυφώνα "Ida"	18
Εικόνα 3. Συνεργεία αποκατάστασης πυλώνων διανομής μετά τον τυφώνα "Ida".....	19
Εικόνα 4. Κατεστραμμένος πυλώνας μεταφοράς στην Αυστραλία. Σεπτέμβριος 2016.....	20
Εικόνα 5. Στιγμιότυπο από την αποκατάσταση των βλαβών στην Αττική μετά την κακοκαιρία "Μήδεια", 2021	22
Εικόνα 6. Υπόγειες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας	30

Εισαγωγή

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) παίζουν ζωτικό ρόλο στις σύγχρονες κοινωνίες και οικονομίες. Μέσα από αυτά παράγεται, μεταφέρεται και διανέμεται η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για τη βιομηχανία, όλες τις παραγωγικές δραστηριότητες και την οικιακή κατανάλωση. Η ποικιλία των καθημερινών δραστηριοτήτων που απαιτούν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας αρκεί για να γίνει αντιληπτή η σημασία τους. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται άμεσα με το βιοτικό επίπεδο, την ποιότητα ζωής, όπως μαρτυρούν και οι συνθήκες ζωής των 759 εκατομμυρίων ανθρώπων που ζουν χωρίς πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια [1]. Για όλους τους παραπάνω λόγους τα ενεργειακά δίκτυα εντάσσονται στις κρίσιμες υποδομές κάθε κράτους.

Ως υποδομές ζωτικής σημασίας (ή κρίσιμες υποδομές) ορίζονται τα περιουσιακά στοιχεία, συστήματα ή μέρη αυτών που βρίσκονται εντός των κρατών και τα οποία είναι ουσιώδη για τη διατήρηση των λειτουργιών ζωτικής σημασίας της κοινωνίας, της υγείας, της ασφάλειας, της οικονομικής και κοινωνικής ευημερίας των μελών της, και των οποίων η διακοπή λειτουργίας ή η καταστροφή θα είχε σημαντικό αντίκτυπο για ένα κράτος, ως αποτέλεσμα της αδυναμίας διατήρησης των λειτουργιών αυτών [2]. Επομένως βασικός στόχος προς επίτευξη είναι η δημιουργία ενός αξιόπιστου, αποτελεσματικού, ασφαλούς και ανθεκτικού ηλεκτρικού δικτύου σε όλους τους παράγοντες που μπορεί να επιδράσουν και να διαταράξουν τη λειτουργία του, να προκαλέσουν διακοπές. Σε αυτή την κατεύθυνση καλούνται να δουλέψουν οι μηχανικοί.

Οι μηχανικοί είναι υπεύθυνοι για το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των τεχνικών έργων, τα οποία περιλαμβάνουν ποικιλία κατηγοριών, όπως κτίρια όλων των τύπων, εγκαταστάσεις επικοινωνίας, εγκαταστάσεις παραγωγής και διανομής ενέργειας, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και δίκτυα μεταφοράς. Τα έργα αυτά σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με μεγάλη αναμενόμενη διάρκεια ζωής, που κυμαίνεται συνήθως από 50 έως περισσότερα από 100 χρόνια. Εκτίθενται, και ενδεχομένως είναι ευάλωτα, σε ακραίες συνθήκες του κλίματος και του καιρού, όπως η ξηρασία, οι πλημμύρες, τα κύματα καύσωνα, οι ισχυροί άνεμοι, τα κύματα καταιγίδων, οι πυρκαγιές, τα χιόνια κτλ. Επομένως στόχος είναι οι χαμηλοί κίνδυνοι αστοχίας των έργων, των υποδομών, αναφορικά με τη λειτουργικότητα, την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια κατά τη διάρκεια ζωής τους.

Φυσικοί κίνδυνοι, ακραία καιρικά φαινόμενα

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα (τυφώνες, ανεμοστρόβιλοι, πλημμύρες, μεγαπυρκαγιές – megafires, σεισμοί, τσουνάμι κ.ο.κ) έχουν πολύ σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζωών, την καταστροφή περιουσιών, σοβαρές ζημιές σε υποδομές, ενεργειακά δίκτυα και επομένως σημαντικό οικονομικό κόστος. Επιπρόσθετος παράγοντας που τα καθιστά τόσο καταστροφικά είναι ότι συχνά υπάρχει δυσκολία πρόβλεψης των ακραίων καιρικών φαινομένων από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες.

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Μπορούν να οριστούν ως τα στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος που είναι βλαβερά για τον άνθρωπο και προκαλούνται από εξωγενείς δυνάμεις [3]. Σύμφωνα με έναν άλλον ορισμό, ακραίο καιρικό φαινόμενο είναι μια φυσική διαδικασία που μπορεί να προκαλέσει απώλεια ζωής, τραυματισμούς ή άλλες επιπτώσεις στην υγεία, ζημία περιουσίας, απώλεια βιοτικών πόρων και υπηρεσιών, κοινωνικές και οικονομικές διαταραχές ή περιβαλλοντικές βλάβες [4]. Ένας αυστηρότερος ορισμός ορίζει ως ακραίο καιρικό φαινόμενο την καταγραφή μιας τιμής μιας σχετικής με τον καιρό μεταβλητής πάνω (ή κάτω) από μια τιμή κατωφλίου, η οποία είναι κοντά στην άνω τιμή (ή κάτω) του εύρους των παρατηρούμενων τιμών αυτής της μεταβλητής [5].

Επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων στα ηλεκτρικά δίκτυα

Σημαντική διάσταση των ακραίων καιρικών φαινομένων είναι η επίδραση που έχουν συγκεκριμένα στα ηλεκτρικά δίκτυα, τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και στην μεταφορά και διανομή της. Ο Πίνακας 1 καταγράφει τις πιο συχνές αιτίες διακοπών ρεύματος στις ΗΠΑ. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα καιρικά φαινόμενα που σχετίζονται με μεγάλες ταχύτητες ανέμου (στον πίνακα: ανεμοστρόβιλοι, τυφώνες, άνεμοι/βροχές) αντιστοιχούν στο 21,8% των συμβάντων. Δηλαδή μετά την αστοχία εξοπλισμού, οι δυνατοί άνεμοι είναι η πιο συχνή αιτία που εμφανίζεται διακοπή ρεύματος στο δίκτυο [6]. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν εξετάζοντας μεγάλες διακοπές ρεύματος παγκόσμια (2011-2016) στον Πίνακα 2 [7] και στο Σχήμα 1 [8] που δίνονται παραδείγματα ακραίων φαινομένων και των επιπτώσεών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΟΠΟΣ	ΑΚΡΑΙΟ ΚΑΙΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ ΧΩΡΙΣ ΡΕΥΜΑ
Σεπτέμβριος 2016	Νότια Αυστραλία	Σίφωνας (tornado) "Blyth"	1.700.000
Σεπτέμβριος 2016	Φλόριντα, ΗΠΑ	Τυφώνας "Hermine"	300.000
Νοέμβριος 2015	Ουάσινγκτον, ΗΠΑ	Ανεμοθύελλα	>161.000
Νοέμβριος 2015	Βανκούβερ, Καναδάς	Ανεμοθύελλα	700.000
Ιούλιος 2014	Λουζόν, Φιλιππίνες	Τυφώνας "Rammason"	1.3000.000
Δεκέμβριος 2013	Οντάριο, Καναδάς	Χιονοθύελλα	~300.000
Απρίλιος 2013	Πολωνία	Βαριά χιονόπτωση	100.000
Μάρτιος 2013	Μπέλφαστ, Βόρεια Ιρλανδία	Βαριά χιονόπτωση	200.000
Φεβρουάριος 2013	ΒΑ περιοχές των ΗΠΑ	χιονοθύελλα της Β. Αμερικής	650.000
Ιανουάριος 2013	Κουίνσλαντ, Αυστραλία	Κυκλώνας "Oswald"	250.000
Οκτώβριος 2012	Ανατολικές περιοχές, ΗΠΑ	Τυφώνας "Sandy"	8.100.000
Ιούλιος 2012	Βόρεια Ινδία	Ινδικός Μουσώνας	>600.000.000
Ιούνιος 2012	Οχάιο, ΗΠΑ	Καταιγίδα	3.800.000
Φεβρουάριος 2011	Κράιστσερτς, Νέα Ζηλανδία	Σεισμός	~160.000

Πίνακας 2. Μεγάλες διακοπές ρεύματος παγκόσμια το διάστημα 2011-2016

Παραδείγματα από τις χώρες του εξωτερικού

Συχνά οι τυφώνες στις βορειοανατολικές ακτές των ΗΠΑ προκαλούν διακοπή ηλεκτροδότησης. Ο τυφώνας «Irene» το 2011 είχε ως αποτέλεσμα 6 εκατομμύρια καταναλωτές να βρεθούν χωρίς ρεύμα για μεγάλο διάστημα και τεράστιες ζημιές, ο τυφώνας «Sandy» το 2012 άφησε στο πέρασμά του 8 εκατομμύρια καταναλωτές χωρίς ρεύμα. Υπολογίζεται ότι οι καταστροφές στο δίκτυο από τις καιρικές συνθήκες στις ΗΠΑ από το 1980-2019 ξεπερνούν σε κόστος το 1,8 τρισεκατομμύρια δολάρια. Την χρονική περίοδο 2018-2020, σημειώθηκαν 50 καιρικά γεγονότα που ξεπέρασαν το 1 δισεκατομμύριο σε κόστος. Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι από τις 258 φυσικές καταστροφές που καταγράφονται στις ΗΠΑ από το 1980, υπολογίζεται ότι το μεγαλύτερο κόστος, αθροιστικού ύψους 945,9 δισεκατομμυρίων, έχει προκληθεί από τροπικούς κυκλώνες, με μέσο κόστος 21,5 δισεκατομμύρια για κάθε φυσική καταστροφή [9].

Χαρακτηριστικό για τις επιπτώσεις των ακραίων φαινομένων στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι ότι, σύμφωνα με μελέτες, εξαιτίας του τυφώνα Maria το 2017, οι υποδομές του Πουέρτο Ρίκο υπέστησαν τρομακτικές καταστροφές και το συνολικό κόστος υπολογίζεται στα 90 δισεκατομμύρια δολάρια [10]. Είναι ενδεικτικό ότι το νησί αποκατέστησε ολοκληρωτικά την πρόσβαση στο ηλεκτρικό ρεύμα μετά από δέκα μήνες [11]. Στην Εικόνα 1 φαίνονται οι καταστροφές που προκλήθηκαν στο δίκτυο λόγω του τυφώνα Maria.

Ο τυφώνας Ida που έπληξε τις ΗΠΑ τον Σεπτέμβριο του 2021, είχε ως αποτέλεσμα περίπου 1 εκατομμύριο καταναλωτές να μείνουν χωρίς ρεύμα, αφού 8 γραμμές μεταφοράς που εξασφάλιζαν την τροφοδοσία της μητροπολιτικής περιοχής στη Νέα Ορλεάνη βγήκαν εκτός λειτουργίας. Ενδεικτικά του μεγέθους των βλαβών είναι δύο στοιχεία: α) Μία εβδομάδα μετά την εκδήλωση του τυφώνα είχε αποκατασταθεί το ρεύμα στο 42% των καταναλωτών, β) σύμφωνα με την καταγραφή της "Entergy Corporation", ο αριθμός των πυλώνων που έπαθαν βλάβη ή καταστράφηκαν είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό που προκάλεσαν οι τυφώνες "Katrina"(2005), "Ike" (2008), "Delta" (2020) and "Zeta" (2020) αθροιστικά. Στον Πίνακα 3 φαίνεται για σύγκριση ο αριθμός των κατεστραμμένων πυλώνων διανομής λόγω διαφορετικών τυφώνων που έπληξαν τις ΗΠΑ από το 2005 ως το 2021 [12] [13]. Στην Εικόνα 2 φαίνεται ένας κατεστραμμένος πυλώνας μεταφοράς κοντά στη Νέα Ορλεάνη εξαιτίας του τυφώνα «Ida». Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από τη δουλειά των συνεργείων αποκατάστασης της βλάβης στο δίκτυο διανομής της ίδιας περιοχής.



Εικόνα 1. Κατεστραμμένος πυλώνας διανομής ενέργειας στην περιοχή Guayama, Puerto Rico

	Katrina (2005)	Rita (2005)	Ike (2008)	Laura (2020)	Ida (2021)
Πυλώνες διανομής που έπαθαν βλάβη ή καταστράφηκαν	17.400	11.000	8.200	14.000	30.679

Πίνακας 3. Σύγκριση κατεστραμμένων πυλώνων διανομής εξαιτίας διαφορετικών τυφώνων



Εικόνα 2. Κατεστραμμένος πυλώνας μεταφοράς ενέργειας έξω από την πόλη της Νέας Ορλεάνης μετά τον τυφώνα "Ida"



Εικόνα 3. Συνεργεία αποκατάστασης πυλώνων διανομής μετά τον τυφώνα "Ida"

28 Σεπτεμβρίου 2016, Αυστραλία

Στις 28 Σεπτεμβρίου 2016, σίφουνες με ταχύτητες ανέμου που κυμαίνονταν μεταξύ 190 – 260 χιλιάμετρα/ώρα χτύπησαν τη Νότια Αυστραλία με αποτέλεσμα να σημειωθούν εκτεταμένες βλάβες στο δίκτυο μεταφοράς. Συγκεκριμένα βγήκε εκτός λειτουργίας μια γραμμή μεταφοράς μονού κυκλώματος 275 kV και μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος 275 kV, που απείχαν μεταξύ τους 170 χιλιάμετρα. Ως συνέπεια 850.000 καταναλωτές έμειναν χωρίς ρεύμα. Σε κάποιες περιοχές η αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης έγινε μετά από 2 βδομάδες [14]. Στην Εικόνα 4 φαίνεται ένας κατεστραμμένος πυλώνας μεταφοράς στην Αυστραλία ως αποτέλεσμα των δυνατών ανέμων.



Εικόνα 4. Κατεστραμμένος πυλώνας μεταφοράς στην Αυστραλία. Σεπτέμβριος 2016

Όπως είναι φανερό, εκτεταμένες διακοπές ρεύματος μπορούν να προκληθούν από καταστροφές τόσο στο δίκτυο μεταφοράς όσο και στο δίκτυο διανομής. Ωστόσο πιο συχνά το πρόβλημα εντοπίζεται στο δίκτυο διανομής. Αυτό εξηγείται γιατί πολλές φορές μια γραμμή διανομής είναι η μοναδική που αναλαμβάνει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Επομένως αν προκύψει βλάβη σε αυτές τις γραμμές διανομής, σημειώνεται διακοπή ρεύματος σε αυτή την περιοχή. Αντίθετα, συνήθως μια γραμμή μεταφοράς δεν είναι η μοναδική που τροφοδοτεί μια μεγάλης έκτασης περιοχή με ηλεκτρικό ρεύμα. Επομένως αν σημειωθεί μια βλάβη διασφαλίζεται παροχή ρεύματος από μια άλλη γραμμή μεταφοράς. Σε περίπτωση όμως που σημειωθούν εκτεταμένες βλάβες σε γραμμές μεταφοράς οι επιπτώσεις είναι πολύ πιο σοβαρές και επηρεάζουν πολλούς περισσότερους καταναλωτές σε σχέση με τις βλάβες στις γραμμές διανομής [15].

Πρόσφατα παραδείγματα από την Ελλάδα

Σοβαρές βλάβες στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικού ρεύματος, που προκάλεσαν φαινόμενα εκτεταμένων διακοπών ρεύματος καταγράφηκαν τα τελευταία χρόνια σε αρκετές περιοχές και της Ελλάδας. Παρατηρείται ότι οι βλάβες στην ηλεκτροδότηση στις αναφερόμενες περιοχές αποδίδονται κατά κύριο λόγο σε κακοκαιρία λόγω έντονων ακραίων καιρικών (έντονη βροχόπτωση, χιονόπτωση, πλημύρα, έντονη ανεμοθύελλα, ανεμοστρόβιλος), είτε σε πυρκαγιές. Αναφέρονται ενδεικτικά κάποια πρόσφατα παραδείγματα που σχετίζονται με δυνατούς ανέμους.

Κακοκαιρία “Μήδεια”, Αττική και Εύβοια – Φεβρουάριος 2021

Κατά τις ημέρες της σφοδρής κακοκαιρίας, δύο ήταν τα κυριότερα προβλήματα στην Αττική που προκάλεσαν εκτεταμένες βλάβες και έθεσαν εκτός λειτουργίας πάνω από 40 γραμμές μέσης τάσης και εκατοντάδες γραμμές της χαμηλής τάσης: αφενός οι πτώσεις των δέντρων, πλησίον των στύλων που είχαν ως αποτέλεσμα να κοπούν οι γραμμές του δικτύου και αφετέρου οι χιονοπτώσεις, που σε πολλές περιοχές δεν επέτρεψαν την πρόσβαση των συνεργείων αποκατάστασης στα σημεία όπου είχαν εκδηλωθεί οι βλάβες. Επίσης και πανελλαδικά σημειώθηκε πληθώρα βλαβών σε γραμμές Μέσης Τάσης, αλλά και πολύ μεγάλο αριθμό μεμονωμένων βλαβών στη Χαμηλή Τάση.

Ενδεικτικά του μεγέθους των ζημιών είναι ότι 3 μέρες μετά την έναρξη της κακοκαιρίας, στις 17/2/2021, από το σύνολο του τεχνικού προσωπικού του ΔΕΔΔΗΕ στην Αττική, περί τα 440 άτομα, που συνέχιζαν τις εργασίες αποκατάστασης στις περιοχές με προβλήματα ηλεκτροδότησης (Εικόνα 5), είχαν αποκατασταθεί οι ζημιές σε 15 γραμμές Μέσης Τάσης, από ένα σύνολο 43 γραμμών που παρουσίαζαν προβλήματα. Τρεις μέρες μετά 70.000 νοικοκυριά στο νόμο Αττικής βρίσκονταν αποκομμένα από την πρόσβαση στο ηλεκτρικό ρεύμα [16]. Αναφορικά με το δίκτυο μεταφοράς, βλάβη σημειώθηκε στην Εύβοια, λόγω της σφοδρής χιονόπτωσης, στη Γραμμή Μεταφοράς Μαντουδίου – Ψαχνών.

Κακοκαιρία «Ιανός», Επτάνησα - Σεπτέμβριος 2020

Θυελλώδεις άνεμοι που έφτασαν ως και τα 12 μποφόρ προκάλεσαν προβλήματα ηλεκτροδότησης σε Κεφαλονιά, Ιθάκη και Λευκάδα, εξαιτίας πτώσης δέντρων πάνω σε γραμμές διανομής αλλά και την καταστροφή πυλώνων διανομής.



Εικόνα 5. Στιγμιότυπο από την αποκατάσταση των βλαβών στην Αττική μετά την κακοκαιρία "Μήδεια", 2021

Κακοκαιρία «Ωκεανίς», Ανατολική Αττική - Φεβρουάριος 2019

Εξαιτίας της κακοκαιρίας «Ωκεανίς» σημειώθηκε διακοπή ηλεκτροδότησης σε περιοχές της Ανατολικής Αττικής, ιδιαίτερα στο Κορωπί, τη Νέα Μάκρη και τα Σπάτα, όπου έσπασαν κολώνες και κόπηκαν καλώδια.

Κακοκαιρία, Χαλκιδική – Ιούλιος 2019

Στις 9 Ιουλίου 2019 ισχυρή καταιγίδα έπληξε την περιοχή της Χαλκιδικής στην Βόρεια Ελλάδα. Με βάση τα στοιχεία της περιόδου στην περιοχή έπνεαν ισχυροί άνεμοι με ταχύτητα άνω των 100 χιλιομέτρων την ώρα. Περισσότεροι από 5.000 κεραυνοί έπεσαν στην περιοχή. Το αποτέλεσμα ήταν 7 νεκροί, 120 τραυματίες και τεράστιες καταστροφές σε υποδομές στο οδικό δίκτυο και στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και υδροδότησης, σε κατοικίες, καταστήματα και καλλιέργειες. Πρόβλημα ηλεκτροδότησης προέκυψε σχεδόν στο σύνολο του νομού Χαλκιδικής από πτώσεις πυλώνων υψηλής και μέσης τάσης του δικτύου της ΔΕΗ. Συγκεκριμένα, είχε τεθεί εκτός λειτουργίας η Γραμμή Μεταφοράς 150 kV Μουδανίων - Κασσανδρείας, από την απώλεια δύο ιστών της Γραμμής Μεταφοράς στην περιοχή της Ποτίδαιας. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ηλεκτροδότησης κινητοποιήθηκαν γεννήτριες του στρατού αλλά και του ΑΔΜΗΕ, προκειμένου κατά προτεραιότητα να διατεθούν για την κάλυψη των πιο επείγουσών αναγκών και για τη λειτουργία των αντλιοστασίων σε δήμους και σε υποδομές. Ο ΔΕΔΔΗΕ ανέφερε ότι η κακοκαιρία προκάλεσε την μερική ή ολική καταστροφή περίπου 300 πυλώνων λόγω πτώσης κλαδιών, δέντρων και άλλων αντικειμένων.

Ανθεκτικότητα

Με τον όρο ανθεκτικότητα ενός συστήματος γίνεται αναφορά στην ικανότητά του να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά γεγονότα μικρής πιθανότητας με μεγάλη επίπτωση στο σύστημα, να επανέρχεται γρήγορα μετά από το πέρας των γεγονότων αυτών. Επίσης η ανθεκτικότητα συμπεριλαμβάνει την ικανότητα του δικτύου να μαθαίνει από προηγούμενες καταστάσεις, έτσι ώστε να προσαρμόζει την λειτουργία του και τη δομή του, όπως επίσης να προλαμβάνει αλλά και να μετριάξει τις επιπτώσεις από παρόμοια περιστατικά στο μέλλον [17]. Σύμφωνα με ένα άλλον ορισμό του οργανισμού «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC), η ανθεκτικότητα ενός συστήματος είναι η ικανότητα του να αναμένει (μέσω πρόβλεψης), να απορροφά και να ανακάμπτει από τις επιπτώσεις βλαβερών συμβάντων αποδοτικά και εντός εύλογου χρονικού διαστήματος [18].

Από όλα τα παραπάνω που έχουν αναφερθεί είναι αντιληπτό ότι οι φυσικές καταστροφές μπορούν να προκαλέσουν τεράστιες ζημιές στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στις γραμμές μεταφοράς και γενικότερα στα στοιχεία ενός δικτύου. Προβάλλει λοιπόν η αναγκαιότητα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των ηλεκτρικών δικτύων με αποτέλεσμα να συγκεντρώνεται σημαντική ερευνητική δραστηριότητα. Συγκεκριμένα γίνεται εστίαση σε τρία στοιχεία: την πρόληψη, την ανάκτηση και την επιβίωση.

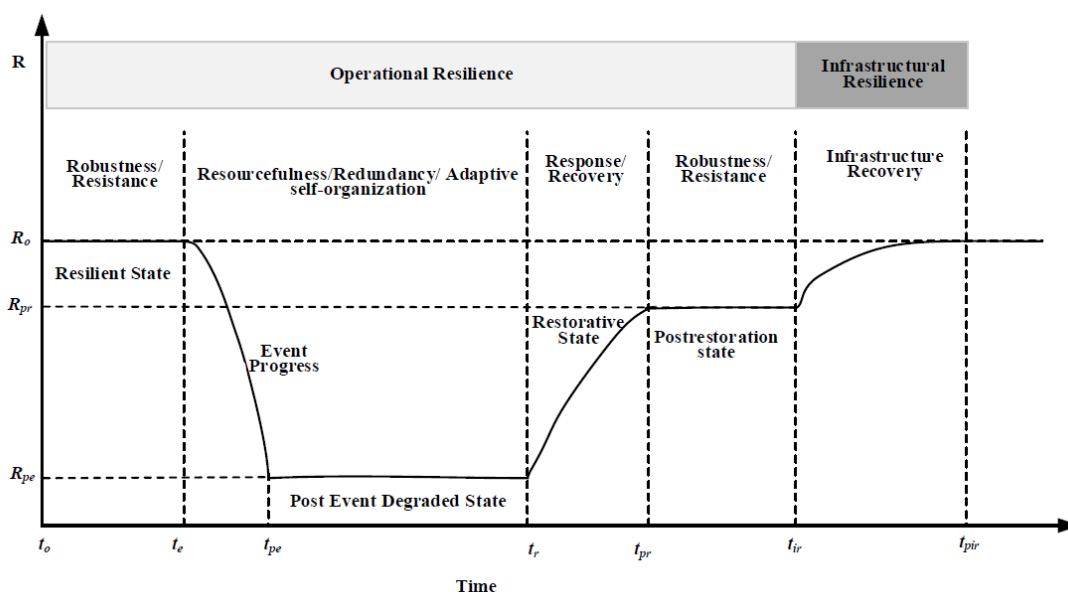
Πρόληψη: Προκειμένου να προβλεφθούν οι βλάβες στο δίκτυο, απαιτούνται αλλαγές τόσο στα σχεδιαστικά πρότυπα και στις κατευθυντήριες γραμμές που αφορούν στην επισκευή του, όσο και στις διαδικασίες επιθεώρησής του με την εισαγωγή και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών.

Ανάκτηση: Για να είναι το δίκτυο ανθεκτικό απαιτείται σωστός σχεδιασμός με υιοθέτηση κατάλληλων προτύπων, ο οποίος θα προβλέπει την ταχύτατη εκτίμηση των ζημιών και την άμεση δημιουργία ομάδας αποκατάστασης βλαβών.

Επιβίωση: Η επιβίωση έχει σχέση με το κατά πόσο το ΣΗΕ είναι ικανό, με την εισαγωγή και χρήση ανθεκτικών τεχνολογιών, να λειτουργεί έστω σε ένα ελάχιστο επίπεδο, προκειμένου να είναι εφικτή η εξυπηρέτηση μεμονωμένων καταναλωτών και κοινοτήτων. Στην επιβίωση ειδικότερα συμπεριλαμβάνεται η επικοινωνία με τους καταναλωτές, η ικανότητα τροφοδοσίας σημαντικών φορτίων π.χ. κινητής τηλεφωνίας, φωτεινών σηματοδοτών ρύθμισης της κυκλοφορίας, κτηρίων δημοσίου ενδιαφέροντος όπως σχολεία, νοσοκομεία, γηροκομεία.

Καμπύλη ανθεκτικότητας

Η καμπύλη της ανθεκτικότητας (Σχήμα 2), επεξηγεί παραστατικά την έννοια της ανθεκτικότητας ενός ΣΗΕ [19]. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αποτύπωσης των επιπέδων ανθεκτικότητας, καθόλη τη διάρκεια που λαμβάνει χώρα το γεγονός το οποίο παράγει τη διαταραχή. Σε κάθε κατάσταση που μπορεί να βρεθεί το σύστημα παρουσιάζονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε σε εξελισσόμενες καταστάσεις ενός ακραίου φαινομένου να ανταποκριθεί αυτό αποτελεσματικά.



Σχήμα 2. Καμπύλη Ανθεκτικότητας

Σύμφωνα με την γραφική παράσταση του Σχήματος 2, στο δίκτυο κατά την χρονική στιγμή t_e , και πριν το γεγονός εξελιχθεί, το αρχικό επίπεδο ανθεκτικότητας έχει την τιμή R_0 . Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του γεγονότος, η τιμή του επιπέδου ανθεκτικότητας πέφτει στο R_{pe} , καθώς η κατάσταση του συστήματος επιβαρύνεται. Το σύστημα πρέπει να είναι ικανό σε αυτή τη χρονική περίοδο να προσαρμοστεί και να αντιμετωπίσει την κατάσταση που βρίσκεται σε φάση εξέλιξης. Τη χρονική στιγμή t_r ξεκινάει η διαδικασία αποκατάστασης του δικτύου. Σε αυτή τη φάση που είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, θα πρέπει να εφαρμοστούν οι απαραίτητες διαδικασίες που χρειάζεται να έχουν σχεδιαστεί προκαταβολικά προκειμένου το σύστημα να επανέρθει στο αρχικό επίπεδο ανθεκτικότητας το συντομότερο δυνατό.

Οι τιμές από t_{pr} έως και t_{ir} απεικονίζουν το χρονικό διάστημα που ακολουθεί την περίοδο αποκατάστασης και στη διάρκεια του οποίου το σύστημα σταθεροποιεί το επίπεδο της ανθεκτικότητάς του. Το επίπεδο αυτό μπορεί να είναι μικρότερο ή στην ιδανική περίπτωση ίσο με το επίπεδο R_0 πριν την εξέλιξη του γεγονότος, το οποίο επέφερε καταστροφές σε υποδομές του δικτύου. Τη στιγμή t_{pir} το σύστημα αποκτά την τιμή ανθεκτικότητας R_0 , αυτή που είχε στην αρχική κατάσταση. Το χρονικό διάστημα από t_{ir} έως και t_{pir} έχουμε

αποκατάσταση των υποδομών και επαναφορά τους στην αρχική κατάσταση. Η ανθεκτικότητα των υποδομών, έχει άμεση σχέση με το χρόνο αποκατάστασης.

Γίνεται φανερό ότι όλες οι παρεμβάσεις που αφορούν στο δίκτυο, στοχεύουν στη μείωση του χρόνου επαναφοράς του συστήματος στην αρχική του κατάσταση, από την κατάσταση της μειωμένης ανθεκτικότητας λόγω εμφάνισης κάποιου γεγονότος ή φαινομένου. Σε αυτό αποσκοπούν και τα παρακάτω αναλυόμενα μέτρα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας.

Μέτρα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας

Προκειμένου να υπάρξει μείωση στο μέλλον των επιπτώσεων των ακραίων γεγονότων, τίθεται ο στόχος προσαρμογής του δικτύου, με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των ΣΗΕ. Σκοπός είναι, σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης του γεγονότος, το σύστημα να αντέξει, να «λυγίσει» αλλά όχι να «σπάσει». Η επίτευξη του παραπάνω στόχου, επιτυγχάνεται με τα **μέτρα ενδυνάμωσης** (hardening measures) και τα **λειτουργικά, «ευφυή» μέτρα** (operational/smart measures) [20] [21] [22]. Η βελτίωση της ανθεκτικότητας του ΣΗΕ προϋποθέτει την υιοθέτηση μιας κατάλληλης στρατηγικής που θα λαμβάνει υπόψη το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των μέτρων, καθώς και το βαθμό αποτελεσματικότητας αυτών.

Τα μέτρα ενδυνάμωσης έχουν ως στόχο την ενίσχυση της ευρωστίας των στοιχείων του δικτύου και ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την υπογειοποίηση γραμμών, τη μεταφορά εγκαταστάσεων σε περιοχές όπου τα ακραία γεγονότα επιφέρουν λιγότερες καταστροφικές συνέπειες, την ανύψωση υποσταθμών, την αναδρομολόγηση γραμμών, την αναβάθμιση των στοιχείων του δικτύου με ισχυρότερα υλικά, την εγκατάσταση πλεοναζόντων γραμμών.

Όλα τα μέτρα ενδυνάμωσης στοχεύουν στο να μην καταστραφούν μεγάλα τμήματα του δικτύου και να περιορίσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις φυσικές επιπτώσεις του καταστροφικού γεγονότος. Προκειμένου να επιλεγούν και να εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα ενδυνάμωσης, είναι απαραίτητο να μελετηθεί και να εκτιμηθεί σε βάθος χρόνου ο βαθμός επίδρασης των καταστροφικών γεγονότων στα ΣΗΕ. Με δεδομένο ότι η πραγματοποίηση παρεμβάσεων σε όλο το δίκτυο έχει πολύ μεγάλος κόστος, η στοχευμένη και με συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα ενδυνάμωση του δικτύου, με βάση την αποδοτικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου κάθε φορά προϋπολογισμού, αποκτά ιδιαίτερη σημασία, αποτελεί τη βιώσιμη οικονομικά λύση για τους διαχειριστές των δικτύων.

Τα λειτουργικά μέτρα έχουν ως στόχο να βελτιώσουν τη λειτουργική ανθεκτικότητα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μέτρα που αναφέρονται στη διαχείριση ζήτησης, στη διεσπαρμένη παραγωγή και στα συστήματα αποθήκευσης, στον προγραμματισμό μονάδων παραγωγής, στην προηγμένη και ακριβή πρόβλεψη καιρικών φαινομένων, στη διαμόρφωση μικροδικτύων, στην ελεγχόμενη νησιδοποίηση, στην αναδιαμόρφωση της τοπολογίας του δικτύου, στον αποκεντρωμένο/κατανεμημένο έλεγχο.

Τα παραπάνω λειτουργικά μέτρα έχουν ως αποτέλεσμα την αποδοτική αντιμετώπιση των ακραίων φαινομένων, όσο αυτά διαρκούν, λόγω της προληπτικής και διορθωτικής ευελιξίας που παρέχουν. Για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας, σημαντικός είναι ο ρόλος των δικτύων

με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, συνδυαστικά με τη διαχείριση της ζήτησης. Το σύστημα καθίσταται ανθεκτικότερο και λιγότερο ευάλωτο καθιερώνοντας και αξιοποιώντας τοπικές μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η παραγωγή παράγεται και καταναλώνεται τοπικά, με αποτέλεσμα να μη γίνεται χρήση μεγάλων γραμμών μεταφοράς, οι οποίες είναι περισσότερο ευάλωτες και υπάρχει η πιθανότητα βλάβης σε ακραία φαινόμενα.

Από τα εφαρμοζόμενα λειτουργικά μέτρα, κάποια σχετίζονται με τις τεχνικές αποκατάστασης και μάλιστα είναι ικανά να αντιμετωπίσουν μεγάλης διάρκειας διακοπές στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των πολλών βλαβών που συνοδεύουν την εκάστοτε φυσική καταστροφή. Είναι κατανοητό ότι ο χρόνος αποκατάστασης της ηλεκτροδότησης, μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά, εάν υπάρξει ικανή οργάνωση και αποτελεσματική διαχείριση των συνεργείων επισκευής. Στην εποχή μας με την αλματώδη ανάπτυξη της πληροφορικής, η εκμετάλλευση των συστημάτων ψηφιοποίησης - οπτικοποίησης και ο συνδυασμός τους με τις εφαρμογές των χωρικών δεδομένων, τα γνωστά GIS συστήματα (Geographic Information System – Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών), δίνουν τη δυνατότητα άντλησης σημαντικών πληροφοριών για την κατάσταση του ΣΗΕ, όχι μόνο στην έναρξη του φαινομένου, αλλά και σε όλη τη διάρκεια και την εξέλιξή του, πράγμα που κάνει δυνατή τη σωστή εκτίμηση των βλαβών και τον καθορισμό των προτεραιοτήτων, προκειμένου να αποκατασταθεί η ηλεκτροδότηση στον ταχύτερο δυνατό χρόνο.

Από όλα τα παραπάνω είναι φανερό ότι ο στόχος της ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των δικτύων σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα ζωής σε κάθε χώρα, την ίδια την προστασία της ζωής και των περιουσιών των κατοίκων.

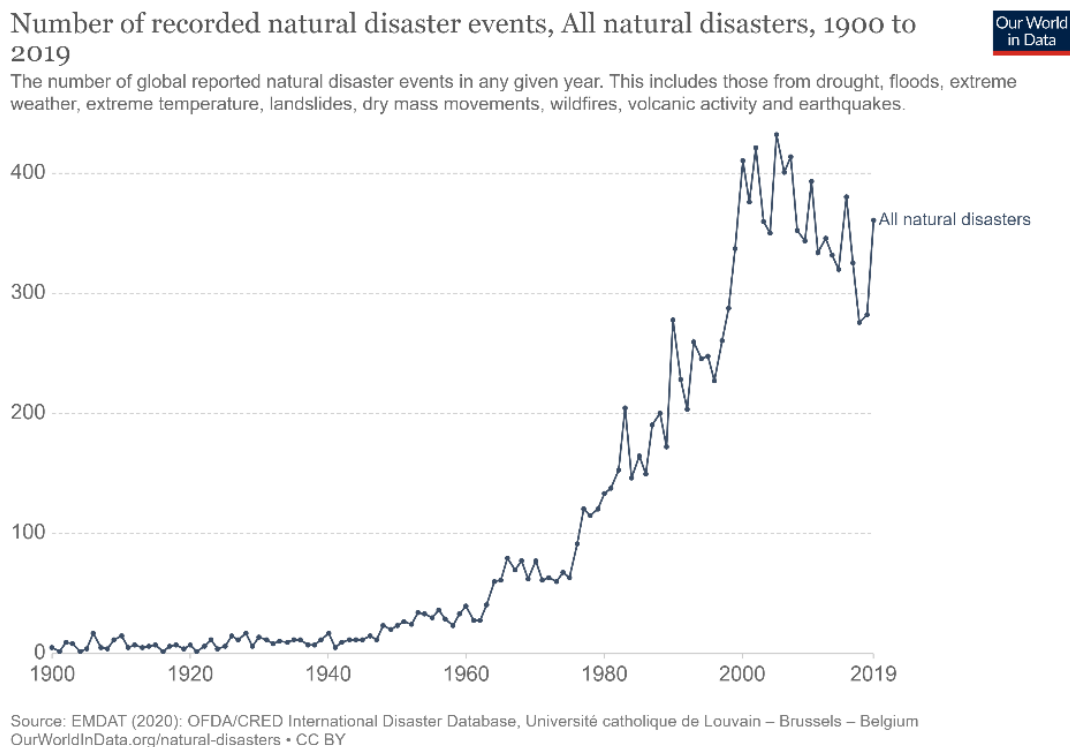
Ακόμα, η ανθεκτικότητα των δικτύων έχει μακροπρόθεσμα οικονομικά πλεονέκτημα, αφού μειώνεται το κόστος αποκατάστασης από τις εκτεταμένες καταστροφές στις υποδομές. Μια βλάβη στο εναέριο δίκτυο, λόγω των έντονων καιρικών φαινομένων, συνήθως επηρεάζει μέρος του γειτονικού δικτύου, με αποτέλεσμα η βλάβη να μην περιορίζεται μόνο στο σημείο του συμβάντος. Αυτό αυξάνει δυσανάλογα το κόστος αποκατάστασης των βλαβών, οι οποίες ως επί το πλείστον πρέπει να αποκαθίστανται κάτω από μεγάλη χρονική πίεση και εν μέσω δύσκολων καιρικών συνθηκών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η ενίσχυση του δικτύου θα έχει εμμέσως ως αποτέλεσμα και την μείωση των δαπανών αποκατάστασης των βλαβών στο δίκτυο.

Για όλους αυτούς τους λόγους, η συζήτηση για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου είναι μια επίκαιρη και κρίσιμη συζήτηση, όπως προκύπτει από τη διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία και την ερευνητική προσπάθεια που εκτυλίσσεται. Η πανδημία του κορονοϊού covid-19 τροφοδότησε ακόμα παραπάνω τη συζήτηση αυτή και έκανε ακόμα πιο επιτακτική την ανάγκη ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των δικτύων, της δυνατότητας τους να αντιμετωπίσουν πολλαπλές κρίσεις [23].

Επιπρόσθετα η κρισιμότητα της ενίσχυσης των δικτύων ισχυροποιείται από το γεγονός ότι παρατηρείται η τάση πολλαπλασιασμού των ακραίων καιρικών φαινομένων, καθώς και της έντασής τους, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Παρατηρείται ότι με την πάροδο των ετών, ο συνολικός αριθμός καταγεγραμμένων φυσικών καταστροφών αυξάνει. Ένα ποσοστό της αύξησης αυτής μπορεί να αποδοθεί στα καλύτερα συστήματα καταγραφής των φυσικών φαινομένων. Ωστόσο, είναι εμφανής ο αυξανόμενος ρυθμός εμφάνισής τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 [24].

Αν και η συζήτηση στην επιστημονική κοινότητα είναι ανοιχτή για το βαθμό επίδρασης του ανθρώπου στο περιβάλλον και τη συσχέτιση με την συχνότητα και την αύξηση ακραίων καιρικών φαινομένων, αρκετές επιτροπές, όπως η Εθνική Επιτροπή Κλίματος των Η.Π.Α. («National Climate Assessment» - NCA) και η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος («Intergovernmental Panel on Climate Change» - IPCC) με εκθέσεις τους τοποθετούνται για τα αποδεικτικά στοιχεία που στοιχειωθετούν την κλιματική αλλαγή. Ενδεικτικά αναφέρονται η άνοδος της στάθμης της θάλασσας κατά 20 cm από το 1880 μέχρι σήμερα και το λιώσιμο των μεγάλων τμημάτων πάγων λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας [25]. Οι προβλέψεις για το βαθμό αλλαγής του κλίματος στο μέλλον γίνεται μέσω των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (Global Climate Models - GCM) που είναι τα κύρια εργαλεία που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες του κλίματος ώστε να προβλέψουν ποσοτικά το μελλοντικό παγκόσμιο και περιφερειακό κλίμα. Τα μοντέλα αυτά αναδεικνύουν τις αλλαγές στο κλίμα και τις καιρικές συνθήκες. Όπως είναι φυσικό, στα μοντέλα αυτά υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα σχετικά με το μέγεθος και το ρυθμό των αλλαγών αυτών.

Σε κάθε περίπτωση, η πρόκληση για τους μηχανικούς είναι η προσαρμογή των τεχνικών έργων, των υποδομών και των ηλεκτρικών δικτύων στις μετεωρολογικές συνθήκες που μεταβάλλονται και επιδρούν πάνω τους με διαφορετικό τρόπο με το πέρασμα των χρόνων. Σε αυτό το έδαφος, για πολλές επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στον τομέα της μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, η ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου τους αποτελεί παράγοντα βιωσιμότητας της επιχειρηματικής τους δραστηριότητας. Τέλος, είναι αντιληπτό ότι, σε τελευταία ανάλυση, ο στόχος της ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των δικτύων, ο βαθμός στον οποίο αυτός ο στόχος θα επιδιωχθεί, το ύψος των δαπανών και της χρηματοδότησης μέτρων ενίσχυσης των υποδομών και των δικτύων επηρεάζεται πέρα από τις τεχνολογικές δυνατότητες και από τους συνολικότερους πολιτικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες που επιδρούν στην ενεργειακή πολιτική κάθε χώρας και στις προτεραιότητες της πολιτικής προστασίας.



Σχήμα 3. Αριθμός καταγεγραμμένων φυσικών καταστροφών 1900-2019

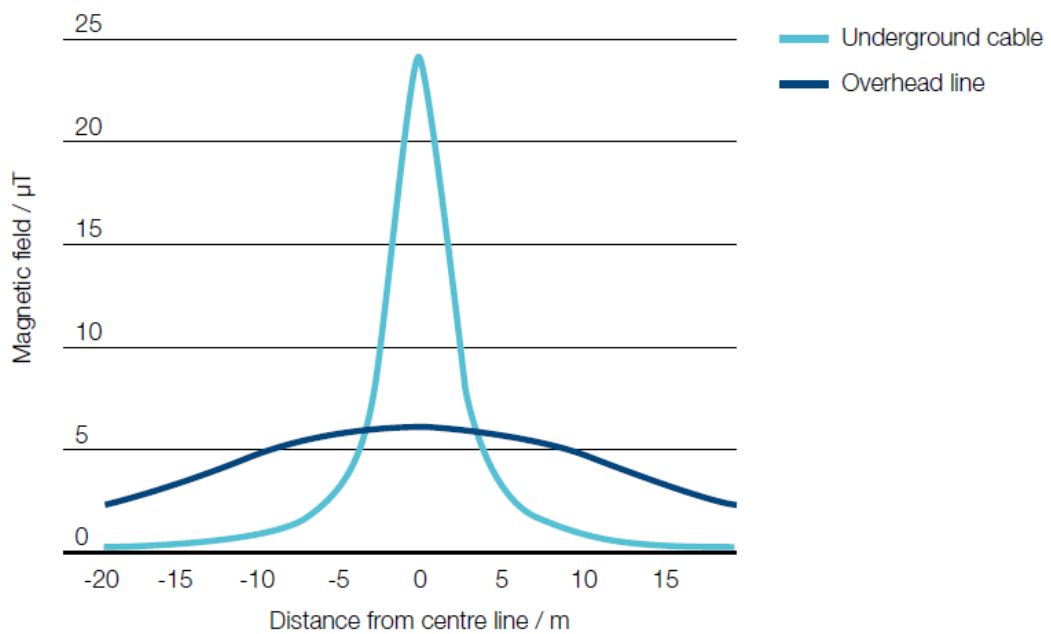
Υπογειοποίηση γραμμών ηλεκτρικού δικτύου

Όπως προαναφέρθηκε, ένας από τους τρόπους ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των δικτύων μεταφοράς ενέργειας είναι η υπογειοποίηση των γραμμών του δικτύου. Η υπογειοποίηση, ως μέτρο ενδυνάμωσης για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Η υπογειοποίηση των γραμμών μεταφοράς και διανομής στοχεύει στη μείωση της έκθεσης των πυλώνων και των γραμμών στα ακραία καιρικά φαινόμενα. Ως συνέπεια μειώνονται οι επιπτώσεις που μπορεί να έχουν οι δυνατοί άνεμοι, η χιονόπτωση, οι πτώσεις δέντρων κοκ, αφού πλέον οι γραμμές δεν βρίσκονται εκτεθειμένες αλλά είναι υπόγειες. Ακόμα, μειώνεται ο κίνδυνος πυρκαγιών, που ειδικά σε δασικές εκτάσεις αποτελεί βασική προτεραιότητα. Ένα επιπλέον βασικό πλεονέκτημα των υπόγειων γραμμών είναι η μείωση της οπτικής όχλησης από τους πυλώνες μεταφοράς ή διανομής και τα ίδια τα καλώδια. Στην Εικόνα 6 απεικονίζονται εργασίες τοποθέτησης υπόγειων γραμμών.

Συγκρίνοντας τις υπόγειες και τις εναέριας γραμμές διαπιστώνονται τα εξής: Οι εναέριας γραμμές μονώνονται από τον αέρα, ενώ στις υπόγειες οι αγωγοί τυλίγονται από στρώματα μονωτικών υλικών. Ο αέρας είναι ο πιο φθηνός και απλός μονωτής και η θερμότητα που παράγεται από την ηλεκτρική ροή διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Στους υπόγειους αγωγούς λοιπόν απαιτείται πολύ καλή μόνωση για να αντέχουν την υψηλή τάση. Για αυτό το λόγο συνήθως τα υπόγεια καλώδια έχουν μεγαλύτερη διάμετρο για να μειώνουν την ηλεκτρική αντίσταση και τη θερμότητα που παράγεται, ενώ τοποθετούνται σε αποστάσεις μεταξύ τους για να διευκολύνεται η διάχυση της θερμότητας. Υπάρχουν μελέτες που υποδεικνύουν ότι λόγω της μεγάλης ποσότητας χαλκού που περιέχουν τα υπόγεια καλώδια, που είναι αγωγίμο υλικό, παρουσιάζεται 30% μείωση στις απώλειες ισχύος [26]. Τέλος, εξετάζοντας το εύρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαπιστώνεται ότι στις υπόγειες γραμμές μεταφοράς αυτό είναι μικρότερο, αν και η έντασή του μπορεί να είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από την υπόγεια γραμμή, αναλόγως και το βάθος στο οποίο έχει τοποθετηθεί. Στο Σχήμα 4 αποτυπώνεται η σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου μεταξύ υπόγειων και εναέριων γραμμών σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο του καλωδίου [27].



Εικόνα 6. Υπόγειες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 4. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπόγειων και εναέριων γραμμών

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι ένα βασικό μειονέκτημα της υπογειοποίησης αποτελεί το μεγάλο κόστος εγκατάστασής των γραμμών. Για παράδειγμα μελέτη στην πολιτεία Φλόριντα των ΗΠΑ αναφέρει ότι το κόστος υπογειοποίησης ανά οικιακό καταναλωτή είναι 13.500 \$ και 39.500 \$ ανά εμπορικό καταναλωτή. Άλλες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι η υπογειοποίηση κοστίζει 500.000 \$ - 2 εκατομμύρια \$ ανά μίλι, με επιπρόσθετα έξοδα για την ψύξη και τις αντλίες [28]. Συγκρίνοντας τη διαφορά κόστους μεταξύ υπόγειων και εναέριων καλωδίων, το κόστος των υπόγειων καλωδίων για τάσεις μέχρι 90 kV υπολογίζεται περίπου διπλάσιο από το κόστος των εναέριων ενώ για τάσεις από 225 kV είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο [29]. Το κόστος βέβαια μπορεί να αυξάνεται αν παρουσιάζονται τεχνικά προβλήματα υπογειοποίησης λόγω μορφολογίας του εδάφους (βουνά, φαράγγια κ.λπ.).

Επίσης ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση βλάβης των υπόγειων γραμμών ο χρόνος εντοπισμού και το κόστος αποκατάστασης τους είναι αρκετά μεγαλύτερος. Ειδικά σε μια σεισμογενή χώρα όπως η Ελλάδα αυτός ο παράγοντας χρειάζεται να ληφθεί σοβαρά υπόψη. Ενδεικτικό αυτού του κινδύνου είναι το παράδειγμα σεισμού που έγινε το 2011 στην περιοχή «Christchurch» στη Νέα Ζηλανδία, ο οποίος προκάλεσε βλάβη σε υπόγεια γραμμή μεταφοράς μήκους 360 χιλιομέτρων η οποία οδήγησε σε εκτεταμένες διακοπές ρεύματος, ενώ οι βλάβες στις εναέριες γραμμές ήταν πολύ μικρότερες [30].

Ένα επιπρόσθετο εμπόδιο για την υπογειοποίηση γραμμών διανομής σε αστικές περιοχές είναι η ελλιπής χαρτογράφηση των υπόλοιπων δικτύων (επικοινωνίες, ύδρευση, υγραέριο) που δυσκολεύει τα έργα υπογειοποίησης του ηλεκτρικού δικτύου. Ενδιαφέρουσα πρακτική αποτελεί αυτή που εφαρμόζει ο δεύτερος μεγαλύτερος διαχειριστής του δικτύου στη Φιλανδία («Elenia») ο οποίος συνεργάζεται με εταιρίες τηλεπικοινωνιών ώστε με τα ίδια έργα να τοποθετούνται τόσο τα καλώδια ρεύματος όσο και οι οπτικές ίνες, προγραμματίζοντας μέχρι το 2028 το 75% του δικτύου του να είναι υπόγειο. Για όλους τους παραπάνω λόγους συνήθως από τους διαχειριστές των δικτύων επιλέγεται μια στρατηγική επιλεκτικής υπογειοποίησης, σε συνδυασμό με άλλα μέτρα ενίσχυσης των ΣΗΕ.

Έργα υπογειοποίησης

Η έκταση των έργων υπογειοποίησης των γραμμών του δικτύου παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία από χώρα σε χώρα. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα τα υπόγεια καλώδια απαρτίζουν μόλις το 11% του δικτύου, όταν στις χώρες της ΕΕ ο μέσος όρος είναι 50% (σε κάποιες χώρες προσεγγίζει 70% ή 80%) [31]. Ενδεικτικά ακόμα μπορεί να αναφερθεί ότι στις ΗΠΑ, το μεγαλύτερο υπόγειο δίκτυο μεταφοράς, που το διαχειρίζεται η εταιρία «Con Energy», έχει έκταση 749 μιλίων (δηλαδή 1205 χιλιομέτρων) [32], ενώ στη Μεγάλη Βρετανία, η «National Grid» διαθέτει δίκτυο υπόγειων γραμμών μεταφοράς μήκους 1400 χιλιομέτρων (870 μίλια) [27].

Στη χώρα μας, αυτή την περίοδο βρίσκονται σε εξέλιξη αρκετά έργα υπογειοποίησης γραμμών μεταφοράς και διανομής ενέργειας στα οποία γίνεται παρακάτω μια σύντομη αναφορά. Αναφορικά με τη μεταφορά, σύμφωνα με το Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης του ΑΔΜΗΕ για τη χρονική περίοδο 2019-2028, τα έργα ανάπτυξης περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων υπογειοποιήσεις γραμμών μεταφοράς και τις διασυνδέσεις των Κυκλάδων και της Κρήτης με το Ηπειρωτικό Σύστημα [33].

Αναφορικά με το δίκτυο διανομής, στο Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου 2021- 2025 του ΔΕΔΔΗΕ (Απρίλιος 2021) αναφέρεται η υπογειοποίηση γραμμών ως ξεχωριστή κατηγορία έργων επαναληπτικού χαρακτήρα που σχετίζεται με την αισθητική αναβάθμιση [34]. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι: *«Πρόκειται για έργα υπογειώσεων εναέριων γραμμών ΜΤ και ΧΤ, οι οποίες δεν επιβάλλονται από οικονομοτεχνικούς λόγους ή λόγους τήρησης αποστάσεων ασφαλείας κ.λ.π., αλλά εκτελούνται για την αισθητική βελτίωση του Δικτύου πόλεων, καθώς και παραδοσιακών και τουριστικών οικισμών.»* Τα έργα της εν λόγω κατηγορίας εμφανίζονται κάπως περιορισμένα, καθώς έργα ανάλογου χαρακτήρα προβλέπονται να εκτελεστούν και στα έργα που θα χρηματοδοτηθούν από το Ταμείο Ανάκαμψης με έμφαση σε δασικές περιοχές αλλά και σε περιπτώσεις υπογειοποίησης αστικών δικτύων σε μεγάλες πόλεις. Στο «Εθνικό Σχέδιο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας» που αποτελεί τον κυβερνητικό σχεδιασμό αξιοποίησης των πόρων του Ταμείου Ανάκαμψης υπάρχει σχετική αναφορά: *“Υπογειοποίηση και αναβάθμιση δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε αστικές περιοχές για τη θωράκισή τους έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων. Υπογειοποίηση και αναδιάταξη του δικτύου ηλεκτρικού ρεύματος σε οικισμούς με ιδιαίτερη πολιτιστική ή τουριστική αξία και σε κέντρα πόλεων με προτεραιότητα στις περιοχές όπου το δίκτυο είναι ευάλωτο σε καιρικά φαινόμενα (π.χ. βαριές χιονοπτώσεις). Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα του δικτύου, η ποιότητα ζωής και η τουριστική ανάπτυξη [35].* Σύμφωνα με τον προγραμματισμό του ΔΕΔΔΗΕ [30]:

- το 2021 θα σημειωθεί αύξηση στις υπογειοποιήσεις των καλωδίων κατά 40% ώστε το συνολικό τους μήκος να φτάσει τα 340 χιλιόμετρα.
- Για την περίοδο 2022 - 2025 προβλέπονται πάνω από 2.150 χιλιόμετρα υπογειοποιήσεις τα οποία θα χρηματοδοτηθούν στο μεγαλύτερο ποσοστό από τα 187 εκατ. ευρώ που έχουν δεσμευτεί στο Ταμείο Ανάκαμψης.

- Το 30% του πλάνου αυτού θα γίνει στην Αττική και ένα 28% θα γίνει στα νησιά, λόγω της σημασίας τους για τον κλάδο του τουρισμού. Στο πλαίσιο αυτό προβλέπεται να δοθεί προτεραιότητα στα Βόρεια Προάστια της Αττικής, την Πάρνηθα, την Πεντέλη και άλλες περιοχές που βρέθηκαν στο επίκεντρο των συνεπειών της κακοκαιρίας «Μήδειας» (2021), καθώς επίσης και σε γραμμές που αφορούν δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς ή διέρχονται μέσα από δάση, αποτελώντας απειλή για πυρκαγιές τους καλοκαιρινούς μήνες.

Το πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την ενίσχυση ανθεκτικότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι τυφώνες, τα οποία αποτελούν συμβάντα μικρής πιθανότητας αλλά μεγάλων επιπτώσεων («High-Impact Low-Probability Events» - HILP), μέσω της επιλεκτικής υπογειοποίησης γραμμών μεταφοράς. Με την υπογειοποίηση των γραμμών μεταφοράς εκείνες προστατεύονται από τους ισχυρούς ανέμους και τις βλάβες που είναι πιθανό να προκληθούν, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του ΣΗΕ.

Στόχος του προβλήματος είναι η εύρεση των κατάλληλων γραμμών προς υπογειοποίηση προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος υπό το δυσμενέστερο σενάριο (worst case scenario - χειρότερο σενάριο βλάβης λόγω της φυσικής καταστροφής). Το συνολικό κόστος θεωρείται ίσο με το κόστος αποκοπής φορτίου και το κόστος επένδυσης για την υπογειοποίηση των γραμμών. Για να γίνει αυτό λαμβάνεται υπόψη και η συχνότητα εμφάνισης των τυφώνων στον χρονικό διάστημα που βρίσκεται υπό εξέταση. Επομένως συνολικό κόστος αποκοπής φορτίου υπολογίζεται με το άθροισμα του αντίστοιχου κόστους κάθε φορά που ένας τυφώνας πλήττει το δίκτυο και προκαλεί βλάβες στις γραμμές.

Για τις εναέριες γραμμές του δικτύου, όταν πλήττονται από το ακραίο καιρικό φαινόμενο, θεωρούνται δύο καταστάσεις: οι γραμμές να βρίσκονται εκτός λειτουργίας ή να βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι η γραμμή είτε δεν έχει επηρεαστεί από το καιρικό φαινόμενο, είτε έχει υποστεί ζημιές και έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

Το κόστος που οφείλεται στις διακοπές του φορτίου προσδιορίζεται από την ισχύ (σε MW) που το σύστημα δεν μπόρεσε να τροφοδοτήσει επί την τιμή κόστους (VOLL - Value of Lost Load) για την απόρριψη του φορτίου. Στην πραγματικότητα η τιμή αυτή είναι διαφορετική για κάθε φορτίο και βρίσκεται σε συνάρτηση με την κρισιμότητά του (πχ υποδομές ζωτικής σημασίας, νοσοκομεία, αεροδρόμια, βιομηχανία, οικιακοί καταναλωτές κοκ) όμως για την εφαρμογή που έγινε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θεωρήθηκε ίδια για όλα τα φορτία.

A. Δείκτες, σύνολα και συναρτήσεις

i, j	Δείκτες για τους ζυγούς
(i, j)	Δείκτες γραμμής μεταφοράς από τον i ζυγό στο j ζυγό
t	Δείκτης για χρονικό διάστημα
g	Δείκτης για γεννήτριες
T	Αριθμός χρονικών περιόδων στο διάστημα βελτιστοποίησης
D	Σύνολο αβεβαιότητας (uncertainty set) γραμμών που βρίσκονται εκτός λειτουργίας
O	Εφικτό σύνολο (feasible set) λειτουργίας συστήματος υπό ακραίο καιρικό φαινόμενο
U	Σύνολο γραμμών που έχουν υπογειοποιηθεί
T	Σύνολο χρονικών διαστημάτων για την εξεταζόμενη περίοδο
G	Σύνολο γεννητριών
G_i	Σύνολο γεννητριών στο ζυγό i
B	Σύνολο ζυγών
L	Σύνολο γραμμών μεταφοράς.
C^{IC}	Συνάρτηση κόστους επένδυσης
C^{OC}	Συνάρτηση κόστους λειτουργίας
$\overline{\quad} / \underline{\quad}$	Σύμβολα για άνω και κάτω όρια.

B. Παράμετροι

$VoLL_i$	Τιμή αποκοπής φορτίου του $i^{\text{ου}}$ ζυγού [€/MWh]
$\pi_{ij,t}$	Πιθανότητα βλάβης της γραμμής μεταφοράς (i, j) στο χρονικό διάστημα t
$p_{i,t}^L$	Ζήτηση ενεργούς ισχύος από τον $i^{\text{ο}}$ ζυγό στο χρονικό διάστημα t [MW]
RU_g/RD_g	Ρυθμός αύξησης / μείωσης (Ramp up/down rate) της $g^{\text{ης}}$ γεννήτριας [MW/h]
RSU_g/RSD_g	Όριο εκκίνησης / τερματισμού ράμπας (Start-up/shut-down ramp limit) της $g^{\text{ης}}$ γεννήτριας [MW/h]
$M_{1,2}$	Αρκετά μεγάλοι θετικοί αριθμοί

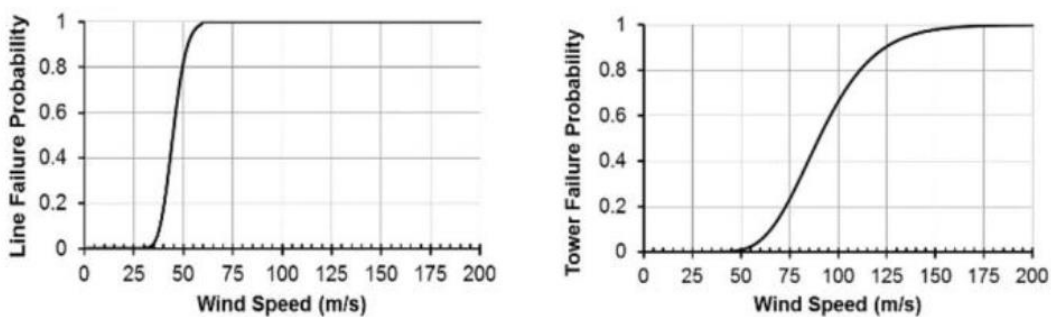
S_B	Τιμή βάσης ισχύος [MVA]
$X_{i,j}$	Επαγωγική αντίσταση της γραμμής μετάδοσης (i, j) [α.μ.]
c_{und}	Κόστος υπογειοποίησης γραμμών [€]
B	Προϋπολογισμός [€]
N	Αριθμός ακραίων καιρικών φαινομένων που εκτιμάται ότι θα εμφανιστούν στη διάρκεια του εξεταζόμενου χρόνου σχεδιασμού

Γ. Μεταβλητές

$p_{i,t}^{shed}$	Αποκοπή ενεργούς ισχύος του $i^{\text{ου}}$ ζυγού στο χρονικό διάστημα t [MW]
$p_{g,t}^G$	Παραγωγή ενεργούς ισχύος της $g^{\text{ης}}$ γεννήτριας στο χρονικό διάστημα t [MW]
$pf_{ji,t}$	Ροή ενεργούς ισχύος της (i, j) γραμμής μεταφοράς στο χρονικό διάστημα t [p.u.]
$\theta_{i,t}$	Γωνία τάσης του $i^{\text{ου}}$ ζυγού στο χρονικό διάστημα t [rad]
$k_{ij,t}$	Διαδική μεταβλητή που δείχνει τη βλάβη στη γραμμή μετάδοσης (i, j) τη χρονική στιγμή t (1 τη χρονική στιγμή της βλάβης, 0 διαφορετικά)
$z_{ij,t}$	Διαδική μεταβλητή που δείχνει αν η γραμμή μεταφοράς (i, j) έχει επηρεαστεί από το καιρικό φαινόμενο τη χρονική στιγμή t (1 on-line, 0 off-line)
u_{ij}	Διαδική μεταβλητή που δείχνει αν η γραμμή (i, j) έχει υπογειοποιηθεί (1 είναι υπογειοποιημένη, 0 δεν είναι)
$\lambda_{g,t}, \lambda_{i,t}, \lambda_{ij,t}$	Διαδικές μεταβλητές (Dual variables)
\mathbf{u}	Πίνακας μεταβλητών u_{ij}
\mathbf{z}	Πίνακας μεταβλητών απόφασης $z_{ij,t}$
\mathbf{o}	Πίνακας μεταβλητών απόφασης λειτουργίας συστήματος.

Υπολογισμός των πιθανοτήτων βλάβης στις γραμμές

Για να μοντελοποιηθεί η επίδραση του ακραίου καιρικού φαινομένου (δυνατός άνεμος) στο ΣΗΕ και να υπολογιστούν οι πιθανότητες βλάβης των στοιχείων του δικτύου χρησιμοποιούνται οι καμπύλες ευθραυστότητας. Αυτές οι καμπύλες δίνουν την πιθανότητα βλάβης των γραμμών και των πυλώνων συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου. Οι πιθανότητες βλάβης των στοιχείων αποτελούν παράμετρο του προβλήματος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες ευθραυστότητας με βάση παλιότερες εφαρμογές [36]. Θεωρείται ότι ο δυνατός άνεμος πλήττει τις εναέριες γραμμές μεταφοράς και τους πυλώνες, όχι τους υποσταθμούς και τις υπόγειες γραμμές.



Σχήμα 5. Καμπύλες ευθραυστότητας

Η μοντελοποίηση βασίζεται στις παρακάτω τρεις εξισώσεις:

$$\pi_{ij,tower} = 1 - (1 - \pi_{tower})^{N_T} \quad (1)$$

$$\pi_{ij} = \pi_{ij,tower} + \pi_{ij,line} - \pi_{ij,tower}\pi_{ij,line} \quad (2)$$

$$\pi \left(\bigcap_{m \in K} l_m \right) = \prod_{m \in K} \pi(l_m) \prod_{m \in L-K} (1 - \pi(l_n)) \quad (3)$$

Η σχέση (1) δίνει την πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας η γραμμή μεταφοράς (i, j) επειδή κατέρρευσε κάποιος πυλώνας στήριξης κατά μήκος της γραμμής (i, j) . π_{tower} είναι η πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας ο πυλώνας και δίνεται από την καμπύλη ευθραυστότητας πυλώνων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4 και N_T ο αριθμός των πυλώνων στην γραμμή (i, j) . Θεωρείται ένας πυλώνας ανά 300 m γραμμής. Με βάση εμπειρικά δεδομένα έχει καταγραφεί στην υφιστάμενη βιβλιογραφία ότι η βλάβη σε ένα πυλώνα είναι ανεξάρτητη από την βλάβη γειτονικών πυλώνων της ίδιας γραμμής [37] [38]. Η

σχέση (2) υπολογίζει την πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας μια γραμμή. Προκύπτει από το γεγονός ότι μια γραμμή τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης της ίδιας ή κάποιου πυλώνα στήριξης, όπου $\pi_{ij,tower}$ η πιθανότητα που υπολογίζει η σχέση (1) και $\pi_{ij,line}$ η πιθανότητα να βγει εκτός η γραμμή (δίνεται από τις καμπύλη ευθραστότητας των γραμμών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4).

Η σχέση (3) υπολογίζει την πιθανότητα να έχει το σύστημα K γραμμές που έχουν βγει εκτός λειτουργίας μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Προκύπτει θεωρώντας ότι η βλάβη σε μια γραμμή είναι ανεξάρτητη από τη βλάβη σε μια άλλη γραμμή. $\pi(l_m)$ είναι η πιθανότητα βλάβης στη γραμμή l_m που προκύπτει από τη σχέση (2), $1 - \pi(l_n)$ είναι η πιθανότητα της γραμμής l_n να μην πάθει βλάβη και K είναι το σύνολο των γραμμών που έχουν βγει εκτός λειτουργίας (και επομένως $L - K$ είναι οι γραμμές που δεν έχουν βγει εκτός λειτουργίας).

Πρόβλημα βελτιστοποίησης

Για την επίλυση του προβλήματος είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου περιγραφής του προβλήματος. Ένα τέτοιο μοντέλο βέλτιστου προγραμματισμού αποτελείται από ένα σύνολο **μεταβλητών απόφασης** (decision variables) και παραμέτρων (parameters). Μέσα από αυτές τις μεταβλητές και παραμέτρους διατυπώνονται και οι **τεχνικοί περιορισμοί** (constraints) του δικτύου.

Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος ορίζει ένα **εφικτό σύνολο** (feasible set) και αποτελείται από το σύνολο των λύσεων που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς. Η εύρεση βέλτιστης λύσης από αυτό το εφικτό σύνολο γίνεται με βάση την τιμή που λαμβάνει μια συνάρτηση, η οποία ονομάζεται **αντικειμενική συνάρτηση** (objective function) και εκφράζει το κόστος υπογειοποίησης και αποκοπής φορτίου σε συνθήκες μέγιστης βλάβης. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως ένα min-max-min πρόβλημα εύρωστου προγραμματισμού τριών επιπέδων (tri-level). Το πρώτο επίπεδο στοχεύει στην εύρεση των γραμμών που πρέπει να υπογειοποιηθούν ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος υπό το δυσμενέστερο σενάριο. Το δεύτερο επίπεδο εντοπίζει το δυσμενέστερο σενάριο θεωρώντας τις υποβαθμισμένες καταστάσεις του συστήματος με πιθανότητα άνω ενός ορίου, το οποίο τίθεται από τον διαχειριστή του συστήματος. Το τρίτο επίπεδο ελαχιστοποιεί το κόστος λειτουργίας του συστήματος βάσει των βλαβών που αποφασίζονται από το δεύτερο επίπεδο. Θεωρείται ότι οι υπόγειες γραμμές δεν επηρεάζονται από καιρικά φαινόμενα όπως οι τυφώνες και επομένως η πιθανότητα βλάβης τους κατά τη διάρκεια τέτοιων φαινομένων είναι ίση με την πιθανότητα βλάβης υπό κανονικές συνθήκες.

Εξισώσεις προβλήματος βελτιστοποίησης

$$\min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \left\{ C^{IC}(\mathbf{u}) + N \max_{\mathbf{z} \in \mathbf{D}} \min_{\mathbf{o} \in \mathbf{O}(\mathbf{z}, \mathbf{u})} C^{OC}(\mathbf{o}) \right\} \quad (4)$$

$$C^{IC}(\mathbf{u}) = \sum_{(i,j) \in L} c_{und} u_{ij} \quad (5)$$

$$C^{OC}(\mathbf{o}) = \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} V_{oLL_i} p_{i,t}^{shed} \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in L} c_{und} u_{ij} \leq B \quad (7)$$

$$\mathbf{D} = \{ \mathbf{z} \mid \prod_{(i,j) \in L} (\pi_{ij,t}^{k_{ij,t}} (1 - \pi_{ij,t})^{z_{ij,t}}) \geq \pi_{thres}, \forall t \in T \} \quad (8)$$

$$k_{ij,t} = z_{ij,t-1} - z_{ij,t} \quad \forall (i,j) \in L, t \in T \quad (9)$$

$$z_{ij,t} \leq z_{ij,t-1} \quad \forall (i,j) \in L, t \in T \quad (10)$$

$$z_{ij,t} \geq u_{ij} \quad \forall (i,j) \in L, t \in T \quad (11)$$

$$p_{i,t}^L \leq \sum_{g \in G_i} p_{g,t}^G + p_{i,t}^{shed} - S_B \left(\sum_{\{j \mid (i,j) \in L\}} p_{j,t} - \sum_{\{j \mid (j,i) \in L\}} p_{j,t} \right) \leq p_{i,t}^L \quad (12)$$

$$\forall i \in B, t \in T$$

$$0 \leq p_{g,t}^G \leq \overline{p_g^G}, t \in T \quad (13)$$

$$p_{g,t-1}^G - p_{g,t}^G \geq -RU_g, \quad \forall g \in G, t \in T \quad (14)$$

$$p_{g,t}^G - p_{g,t-1}^G \geq -RD_g, \quad \forall g \in G, t \in T \quad (15)$$

$$\underline{pf}_{ij} z_{ij,t} \leq pf_{ij,t} \leq \overline{pf}_{ij} z_{ij,t}, \forall (i,j) \in \mathbf{L}, t \in \mathbf{T} \quad (16)$$

$$-(1 - z_{ij,t})M_1 \leq pf_{ij,t} - \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \leq (1 - z_{ij,t})M_1, \forall (i,j) \in \mathbf{L}, t \in \mathbf{T} \quad (17)$$

$$\underline{\theta} \leq \theta_{i,t} \leq \overline{\theta}, \forall i \in \mathbf{B}, t \in \mathbf{T} \quad (18)$$

$$0 \leq p_{i,t}^{shed} \leq p_{i,t}^L, \forall i \in \mathbf{B}, t \in \mathbf{T} \quad (19)$$

Η σχέση (4) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης, η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης και του κόστους λειτουργίας του συστήματος. N είναι ο εκτιμώμενος αριθμός ακραίων καιρικών φαινομένων κατά τη διάρκεια της υπό εξέταση περιόδου, η οποία θεωρείται ίση με το χρόνο ζωής της επένδυσης. Η σχέση (5) εκφράζει το κόστος επένδυσης, που αποτελεί το άθροισμα του κόστους υπογειοποίησης κάθε γραμμής που επιλέγεται να υπογειοποιηθεί. Η σχέση (6) εκφράζει το κόστος λειτουργίας που προκύπτει από το κόστος αποκοπής φορτίου. Το κόστος παραγωγής δεν λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση ακραίων καταστάσεων, όπως η έκθεση σε ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο. Η αποκατάσταση των γραμμών που έχουν πάθει βλάβη θα μπορούσε να προστεθεί στο κόστος λειτουργίας. Επειδή όμως το κόστος αποκατάστασης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος υπογειοποίησης δεν επηρεάζει την επιλογή του ποιες γραμμές θα υπογειοποιηθούν και επομένως παραλείπεται.

Στο **πρώτο επίπεδο** του προβλήματος, η σχέση (7) διασφαλίζει ότι το κόστος υπογειοποίησης δεν ξεπερνά τον προϋπολογισμό.

Στο **δεύτερο επίπεδο**, με τη σχέση (8) υπολογίζεται η πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας ένα σύνολο γραμμών. Αυτή η πιθανότητα απαιτείται να είναι μεγαλύτερη από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου π_{thres} που την καθορίζει ο διαχειριστής του δικτύου. Ο περιορισμός αυτός δεν επηρεάζει μόνο το ποιες γραμμές μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας, αλλά και τη χρονική στιγμή της βλάβης αυτών. Η τιμή μεταβλητή k_{ij} , βάσει της εξίσωσης (9), γίνεται ίση με 1 όταν η γραμμή (i,j) τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης. Ο περιορισμός (10) εγγυάται ότι στην περίπτωση κατά την οποία μια γραμμή τεθεί εκτός λειτουργίας, δεν μπορεί να τεθεί ξανά σε λειτουργία για τον υπόλοιπο χρονικό ορίζοντα υπό εξέταση. Η σχέση (11) εξασφαλίζει ότι αν μια γραμμή υπογειοποιηθεί δεν μπορεί να βγει εκτός λειτουργίας.

Στο **τρίτο επίπεδο**, η σχέση (12) εκφράζει το ισοζύγιο ενεργούς ισχύος σε κάθε ζυγό. Η σχέση (13) θέτει τα όρια στην παραγωγή των γεννητριών. Οι σχέσεις (14), (15) εκφράζουν τους περιορισμούς για τον ρυθμό ανόδου (ramp up) και τον ρυθμό καθόδου (ramp down) αντίστοιχα των γεννητριών. Ο περιορισμός (16) εγγυάται ότι η ροή ισχύος των γραμμών που έχουν υποστεί βλάβη είναι ίση με μηδέν, ενώ για τις γραμμές που είναι εντός λειτουργίας

κυμαίνεται μεταξύ συγκεκριμένων ορίων. Η σχέση (17) εκφράζει την εξίσωση DC ροή ισχύος. Η ανισότητα αυτή μετατρέπεται σε ισότητα όταν η γραμμή είναι εντός λειτουργίας και συσχετίζει τη ροή ισχύος με τις γωνίες τάσης. Στην περίπτωση που η γραμμή έχει υποστεί βλάβη, η τιμή της παραμέτρου M_1 επιλέγεται ώστε να επιτρέπει τον κατάλληλο υπολογισμό της γωνίας τάσης στους ζυγούς που βρίσκονται στα άκρα των γραμμών που έχουν βλάβη. Η διπλή ανισότητα (18) εγγυάται ότι η γωνία της τάσης θα διατηρείται εντός ορίων. Η σχέση (19) εξασφαλίζει ότι η αποκοπή ενεργούς ισχύος δε ξεπερνάει τη ζήτηση ενεργούς ισχύος σε κάθε ζυγό.

Επίλυση προβλήματος

Το μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω είναι ένα πρόβλημα τριών επιπέδων. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η επίλυσή του, διαχωρίζεται σε ένα **κύριο πρόβλημα** (master problem) και ένα **υποπρόβλημα** (subproblem). Το κύριο πρόβλημα αποφασίζει την βέλτιστη υπογειοποίηση γραμμών, ενώ το υποπρόβλημα εντοπίζει τις βλάβες γραμμών που οδηγούν στη μεγιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος. Για την επίλυση του υποπροβλήματος, το max-min πρόβλημα του δεύτερου και τρίτου επιπέδου αναδιατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού ενός επιπέδου. Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δυικό πρόβλημα του τρίτου επιπέδου, το οποίο διαμορφώνεται ως πρόβλημα μεγιστοποίησης. Επομένως, το υποπρόβλημα επιλύεται ως ένα max πρόβλημα ενός επιπέδου. Για να γίνει αυτό, αρχικά γραμμικοποιούνται οι μη γραμμικές εξισώσεις. Συγκεκριμένα, η εξίσωση (8) είναι μια εκθετική συνάρτηση. Λογαριθμίζοντας τα δύο μέλη της εξίσωσης προκύπτει η εξίσωση:

$$\sum_{(i,j) \in \mathbf{L}} k_{ij,t} \log(\pi_{ij,t}) + \sum_{(i,j) \in \mathbf{L}} k_{ij,t} \log(1 - \pi_{ij,t}) \geq \log(\pi_{thres}), \forall t \in T \quad (20)$$

Αναδιαμόρφωση προβλήματος

Το max- min πρόβλημα, δηλαδή το υποπρόβλημα υπολογισμού του μέγιστου κόστους αποκοπής φορτίου μετατρέπεται σε πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού ενός επιπέδου (Mixed-integer Linear Programming - MILP). Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δυικό πρόβλημα.

Έστω ότι η $\hat{\mathbf{u}}$ είναι η λύση του κύριου προβλήματος (υπογειοποιήσεις γραμμών). Το υποπρόβλημα έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη αποκοπή φορτίου (worst case scenario). Έτσι, το εσωτερικό max min πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\max_{z \in D} \min_{o \in O(z, \hat{\mathbf{u}})} c^T \mathbf{o} \quad (21)$$

$$\tau. \omega \mathbf{A}\mathbf{0} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{E}\mathbf{z} \geq \mathbf{F} \quad (22)$$

$$\mathbf{G}\mathbf{z} \geq \mathbf{K} \quad (23)$$

όπου $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{E}$ και \mathbf{F} πίνακες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τους περιορισμούς (12)-(19), \mathbf{G} και \mathbf{K} πίνακες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τους περιορισμούς (8)-(11). c είναι ο πίνακας που περιγράφει το κόστος αποκοπής φορτίου.

Έστω ότι λ είναι το διάνυσμα των δυικών μεταβλητών των περιορισμών (9)-(16) και $F(z, \hat{u})$ είναι το εφικτό σύνολο λύσεων του δυικού προβλήματος τρίτου επιπέδου, το $\max - \min$ πρόβλημα αποτυπώνεται ως εξής:

$$\max_{z \in D} \max_{\lambda \in F(z, \hat{u})} (\mathbf{F} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} - \mathbf{E}\mathbf{z})^T \lambda \quad (24)$$

$$\tau. \omega. \mathbf{A}^T \lambda \leq c \quad (25)$$

$$\mathbf{G}\mathbf{z} \geq \mathbf{K} \quad (26)$$

Το δυικό πρόβλημα (dual problem) κατασκευάζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{\lambda \in F(z, \hat{u})} & \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} \lambda_{i,t}^{1+} p_{i,t}^L - \lambda_{i,t}^{1-} p_{i,t}^L + \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} \lambda_{g,t}^{2+} \underline{p}_g^G - \lambda_{g,t}^{2-} \overline{p}_g^G \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} (-\lambda_{g,t}^3 RU_g) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} (-\lambda_{g,t}^4 RD_g) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in L} (\lambda_{i,j,t}^{5+} \underline{p}f_{i,j} z_{ij,t} - \lambda_{i,j,t}^{5-} \overline{p}f_{ij} z_{ij,t}) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in L} (-\lambda_{i,j,t}^{6+} (1 - z_{ij,t}) M_1 - \lambda_{i,j,t}^{6-} (1 - z_{ij,t}) M_1) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} (\lambda_{i,t}^{7+} \underline{\theta} - \lambda_{i,t}^{7-} \overline{\theta}) - \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} \lambda_{i,t}^8 p_{i,t}^L \end{aligned}$$

$$\forall i \in \mathbf{B}, g \in \mathbf{G}, t \in \mathbf{T}, (i, j) \in L \quad (27)$$

Η σχέση (27) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του δυικού προβλήματος. Οι $\lambda^1, \lambda^2, \lambda^3, \lambda^4, \lambda^5, \lambda^6, \lambda^7, \lambda^8$ αποτελούν τις δυικές μεταβλητές για τους περιορισμούς (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16) αντίστοιχα. Ακολουθούν οι περιορισμοί του δυικού προβλήματος:

$$\lambda_{i,t}^{1+} - \lambda_{i,t}^{1-} + \lambda_{g,t}^{2+} - \lambda_{g,t}^{2-} - \lambda_{g,t}^3 - \lambda_{g,t}^4 \leq 0 \quad \forall i \in \mathbf{B}, g \in \mathbf{G}, t \in \mathbf{T} \quad (28)$$

$$\sum_{\{j|(i,j) \in L\}} -\frac{\lambda_{ij,t}^{6+}}{X_{ij}} + \sum_{\{j|(i,j) \in L\}} \frac{\lambda_{ij,t}^{6-}}{X_{ij}} + \sum_{\{j|(j,i) \in L\}} \frac{\lambda_{ji,t}^{6+}}{X_{ji}} - \sum_{\{j|(j,i) \in L\}} \frac{\lambda_{ji,t}^{6-}}{X_{ji}} + \lambda_{i,t}^{7+} + \lambda_{i,t}^{7-} = 0, \quad (29)$$

$$\forall i \in \mathbf{B}, t \in \mathbf{T}$$

$$-S_B \lambda_{i,t}^{1+} + S_B \lambda_{j,t}^{1+} + S_B \lambda_{i,t}^{1-} - S_B \lambda_{j,t}^{1-} + \lambda_{ij,t}^{5+} - \lambda_{ij,t}^{5-} + \lambda_{ij,t}^{6+} - \lambda_{ij,t}^{6-} = 0 \quad \forall (i, j) \in L, t \in \mathbf{T} \quad (30)$$

$$\lambda_{i,t}^{1+} - \lambda_{i,t}^{1-} - \lambda_{i,t}^8 \leq V o L L, \quad \forall i \in \mathbf{B}, t \in \mathbf{T} \quad (31)$$

$$\lambda^1, \lambda^2, \lambda^3, \lambda^4, \lambda^5, \lambda^6, \lambda^7, \lambda^8 \geq 0 \quad (32)$$

Στην αντικειμενική συνάρτηση (27) παρουσιάζονται οι διγραμμικοί (bi-linear) όροι $\lambda_{ij,t} z_{ij,t}$ που αντικαθίσταται από τους όρους $\delta_{ij,t}$. Έτσι εισάγονται επιπλέον τέσσερις περιορισμοί:

$$\delta_{ij,t} \leq M_2 z_{ij,t}, \quad \forall (i, j) \in L, t \in \mathbf{T} \quad (33)$$

$$\delta_{ij,t} \geq \lambda_{ij,t} - (1 - z_{ij,t}) M_2, \quad \forall (i, j) \in L, t \in \mathbf{T} \quad (34)$$

$$\delta_{ij,t} \leq \lambda_{ij,t}, \quad \forall (i, j) \in L, t \in \mathbf{T} \quad (35)$$

$$\delta_{ij,t} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in L, t \in \mathbf{T} \quad (36)$$

όπου M_2 ένας επαρκώς μεγάλος αριθμός.

Αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος

Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως πρόβλημα δύο σταδίων. Για την επίλυσή του χρησιμοποιείται η μέθοδος C&CG (Constraint and Column Generation). Η μέθοδος ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Με την εφαρμογή της μεθόδου, το κύριο πρόβλημα επιλύεται θεωρώντας ένα σύνολο $\hat{\mathbf{D}} = \{\mathbf{z}^l, l = 1, \dots, m\}$ με τα δυσμενέστερα σενάρια βλαβών στην l επανάληψη και διατυπώνεται ως εξής:

$$\min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}, \mathbf{o}^l \in \mathcal{O}(\mathbf{z}^l, \mathbf{u})} C^{IC}(\mathbf{u}) + N\varphi \quad (37)$$

$$\text{τ.ω. } \varphi \geq C^{OC}(\mathbf{o}^l), \forall l \in 1, \dots, m \quad (38)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{o}^l + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{z}^l \geq \mathbf{F} \quad (39)$$

όπου φ μια βαθμωτή (scalar) μεταβλητή που διασφαλίζει ότι η λύση του κύριου προβλήματος υπερσχύει του λειτουργικού κόστους όλων των δυσμενέστερων σεναρίων που εξετάζονται στην επανάληψη l . Τα σενάρια αυτά προκύπτουν από τη λύση του υποπροβλήματος κατά την επαναληπτική διαδικασία, όπου l είναι η επανάληψη που βρίσκεται ο αλγόριθμος. Με την λύση του κυρίου προβλήματος προκύπτουν οι γραμμές προς υπογειοποίηση και το κατώτερο όριο (Lower Bound, LB) του αρχικού προβλήματος. Βάση της λύσης αυτής $\hat{\mathbf{u}}$ του κυρίου προβλήματος επιλύεται το υποπρόβλημα. Η λύση του υποπροβλήματος (αναμενόμενο κόστος λειτουργίας λόγω αποκοπής φορτίου) μαζί με το κόστος επένδυσης (υπογειοποίησης) παρέχουν το ανώτερο όριο του αρχικού προβλήματος (Upper Bound, UB). Σε περίπτωση που η διαφορά του άνω και του κάτω ορίου είναι μεγαλύτερη από μια καθορισμένη τιμή – κατωφλίου η λύση $\hat{\mathbf{z}}$ του υποπροβλήματος προστίθεται στο σύνολο με τα χειρότερα σενάρια και το κύριο πρόβλημα επιλύεται εκ νέου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου η διαφορά του άνω με το κάτω όριο να είναι μικρότερη από την τιμή κατωφλίου. Με τη μέθοδο αυτή επομένως πραγματοποιούνται τουλάχιστον δύο επαναλήψεις. Ο αλγόριθμος της μεθόδου παρουσιάζεται στον Αλγόριθμο 1.

Για την πρώτη επανάληψη θεωρούμε ότι όλες οι γραμμές είναι σε λειτουργία. Αρχικά υπολογίζονται οι πιθανότητες βλάβης των γραμμών και των πυλώνων του δικτύου που εκτίθενται στο ακραίο καιρικό φαινόμενο. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με βάση την ταχύτητα του ανέμου κάθε ώρα για τον χρονικό ορίζοντα υπό μελέτη (στην εφαρμογή μας 24 ώρες) η οποία αντιστοιχίζεται σε μια πιθανότητα βλάβης με βάση τις καμπύλες ευθραυστότητας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πιθανότητα κατάρρευσης κάθε γραμμής λόγω κατάρρευσης της ίδιας ή κάποιου πυλώνα στήριξης και εισάγεται ως παράμετρος στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Σε κάθε επανάληψη, οι πιθανότητες βλάβης των γραμμών υπολογίζονται εκ νέου, βάσει των γραμμών που έχουν υπογειοποιηθεί. Τέλος, επιλύεται το πρόβλημα της υπογειοποίησης των γραμμών όπως παρουσιάζεται στον Αλγόριθμο 1.

Αλγόριθμος 1 - Μέθοδος C&CG

{Όλες οι γραμμές είναι λειτουργικές}

$LB \leftarrow -\infty, UB \leftarrow \infty, l \leftarrow 1, \varepsilon \leftarrow 0.001$

while $\left| \frac{UB-LB}{UB} \right| > \varepsilon$ **do**

{ Επίλυση κύριου προβλήματος (37)-(39) για την εύρεση του $\hat{\mathbf{u}}$ }

{ Επικαιροποίηση πιθανοτήτων βλαβών των γραμμών με βάση το $\hat{\mathbf{u}}^l$ }

$LB \leftarrow \max(LB, C^{IC}(\hat{\mathbf{u}}^l) + N\phi)$

{Επίλυση υποπροβλήματος}

$UB \leftarrow \min(UB, C^{IC}(\hat{\mathbf{u}}^l) + C^{OC}(\hat{\mathbf{u}}^l))$

$l \leftarrow l + 1$

end while

return $\hat{\mathbf{u}}$ and UB

YALMIP

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του πακέτου YALMIP (“Yet Another LMI Parser”), που αποτελεί εργαλειοθήκη μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Με τη χρήση αυτής της εργαλειοθήκης είναι δυνατό να απλοποιηθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης αφού η ανάπτυξη κώδικα για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος πραγματοποιείται κάνοντας χρήση τυπικών εντολών του προγράμματος MATLAB, να μοντελοποιηθούν προβλήματα ανεξάρτητα του μεγέθους των δεδομένων τους και να υποστηριχτούν διάφορα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού [39].

Ο επιλυτής (solver) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο GUROBI. Η επίλυση του προβλήματος εκτελείται σε υπολογιστή Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1230 v6 @ 3.50GHz και 8 GB RAM.

Εφαρμογή στο πρότυπο δίκτυο 24 ζυγών της IEEE

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέχθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου είναι το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 24 ζυγών της IEEE. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 24 ζυγούς, 14 γεννήτριες, 38 γραμμές. Η δομή του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 6. Ο Πίνακας 4 δείχνει για κάθε μία από τις 38 γραμμές του δικτύου μεταξύ ποιων ζυγών είναι καθώς και το κόστος υπογειοποίησης της γραμμής. Το κόστος υπογειοποίησης προκύπτει παίρνοντας υπόψη και το μήκος της κάθε γραμμής. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4 και στο Σχήμα 6 οι γραμμές 7, 14, 15, 16, 17 αντιστοιχούν σε μετασχηματιστές. Αυτές οι γραμμές έχουν μηδενικό κόστος υπογειοποίησης, αφού για την μέθοδο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας θεωρήθηκε ότι οι μετασχηματιστές δεν επηρεάζονται από το καιρικό φαινόμενο, επομένως η πιθανότητα να βγουν εκτός λειτουργίας είναι μηδενική. Για την εφαρμογή της μεθόδου γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι γραμμές (αρχικά) είναι εναέριες. Η περίοδος προσομοίωσης είναι μια μέρα (24 ώρες) και το βήμα προσομοίωσης η μια ώρα.

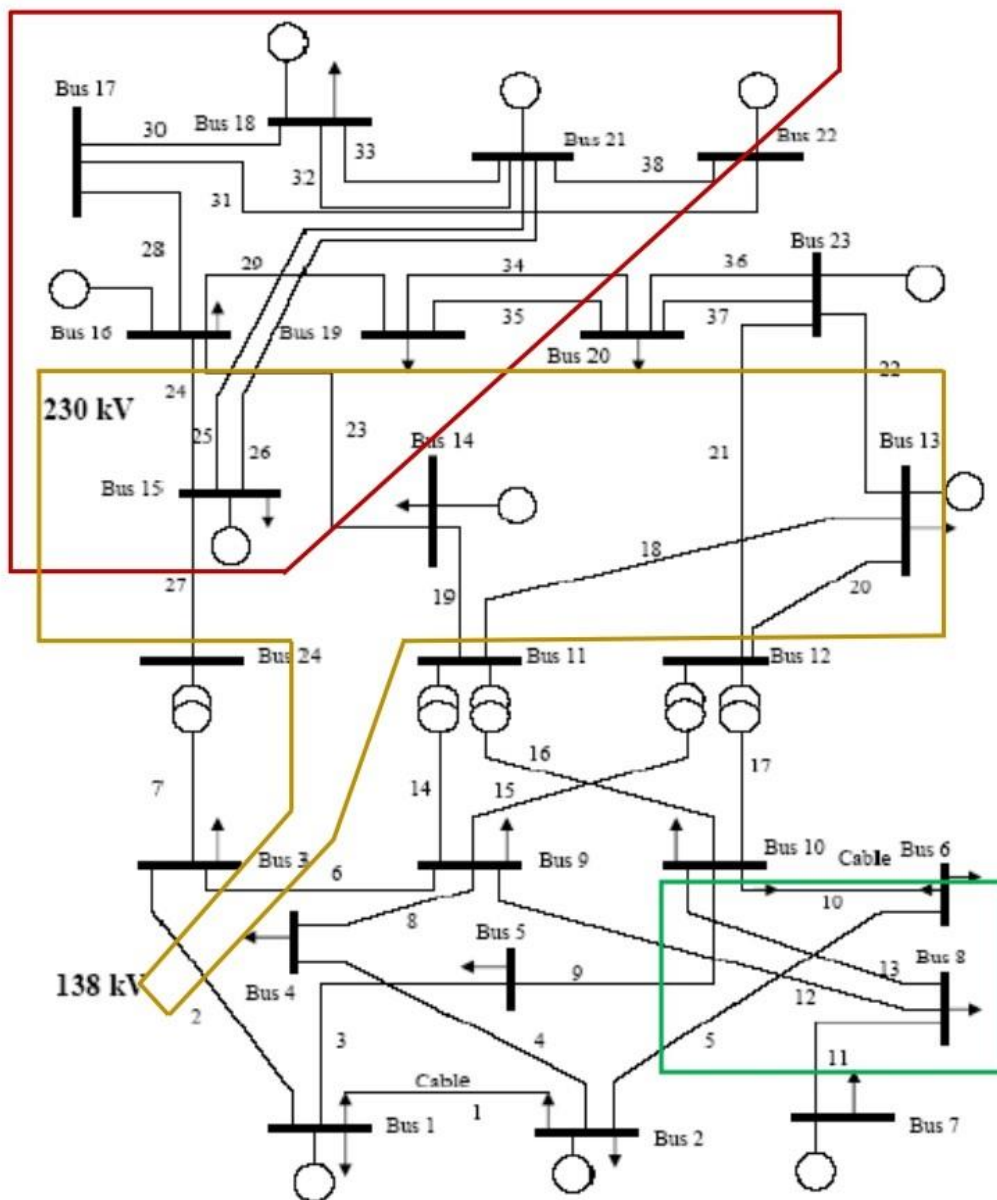
Θεωρούμε ότι βάσει ιστορικών δεδομένων τρεις διαφορετικές περιπτώσεις τυφώνων έχουν χτυπήσει το δίκτυο στο παρελθόν, επηρεάζοντας 3 διαφορετικές περιοχές του δικτύου. Οι καιρικές συνθήκες εντός της περιοχής που χτυπά ο τυφώνας θεωρούνται ομογενείς. Στις υπόλοιπες περιοχές του δικτύου θεωρείται ότι επικρατούν φυσιολογικές καιρικές συνθήκες, και η πιθανότητα βλάβης των γραμμών είναι 0,001%. Οι υπογειοποιημένες γραμμές θεωρείται ότι δεν πλήττονται από τους τυφώνες και επομένως έχουν πιθανότητα βλάβης ίση με την πιθανότητα βλάβης σε φυσιολογικές συνθήκες. Η αποκατάσταση των βλαβών δεν λαμβάνεται υπόψη αφού γίνεται η υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια του φαινομένου δε πραγματοποιούνται

εργασίες αποκατάστασης για λόγους ασφαλείας και επομένως δεν υπάρχει δυνατότητα επισκευής μέχρι το τέλος της περιόδου που εξετάζεται. Η αξία του φορτίου που αποκόβεται ισούται με 5000 €/MWh και θεωρείται ίση για όλα τα φορτία. Στο Σχήμα 7 βλέπουμε το διάγραμμα εξέλιξης της ζήτησης φορτίου στη διάρκεια του 24ωρου της προσομοίωσης.

Για τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου (Πίνακες 7-21) επιλέχτηκε η στρογγυλοποίηση να γίνει στα δύο δεκαδικά ψηφία. Στους Πίνακες 7-19 περιέχονται οι γραμμές που υπογειοποιούνται, το κόστος υπογειοποίησης (σε εκατομ. ευρώ), το κόστος αποκοπής φορτίου (σε εκατομ. ευρώ), η αποκοπή φορτίου (σε MWh), το συνολικό κόστος (σε εκατομ. ευρώ), οι γραμμές λειτουργίας που βγήκαν εκτός λειτουργίας και η χρονική στιγμή που σημειώθηκε η βλάβη, η τιμή της παραμέτρου π_{thres} και ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν για να τερματίσει το πρόβλημα.

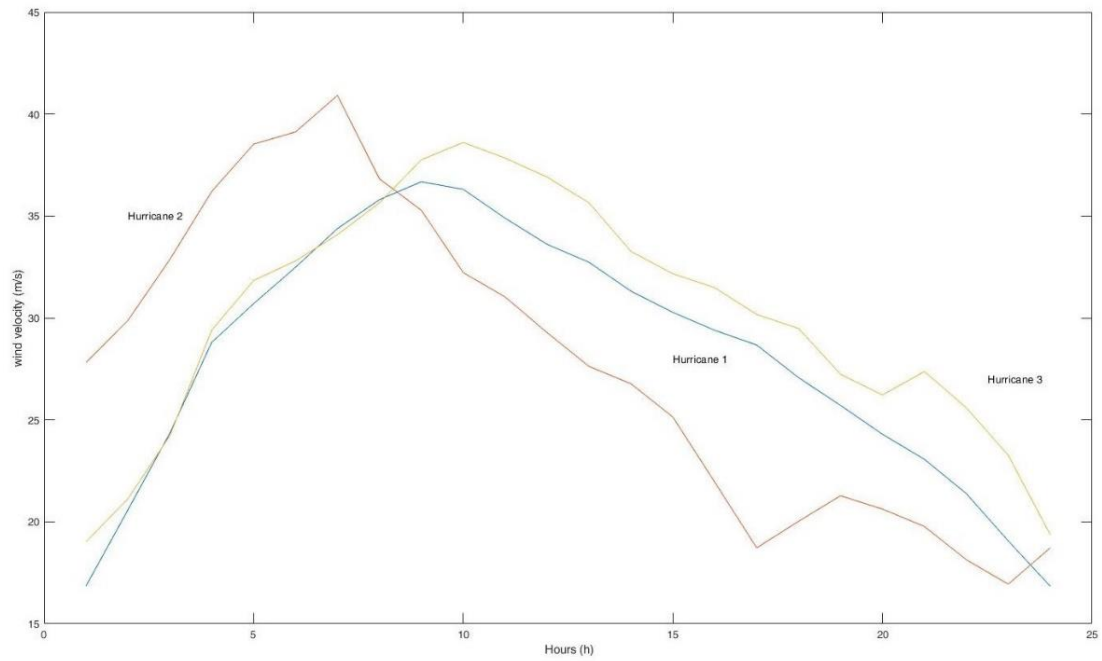
ΓΡΑΜΜΗ	ΖΥΓΟΣ Α	ΖΥΓΟΣ Β	ΜΗΚΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (km)	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗΣ (·10 ⁶ €)
1	1	2	4,83	2,41
2	1	3	88,51	44,26
3	1	5	35,41	17,70
4	2	4	53,11	26,55
5	2	6	80,47	40,23
6	3	9	49,89	24,94
7	3	24	0 (Μ/Σ)	0 (Μ/Σ)
8	4	9	43,45	21,73
9	5	10	37,01	18,51
10	6	10	25,75	12,87
11	7	8	25,75	12,87
12	8	9	69,2	34,60
13	8	10	69,2	34,60
14	9	11	0 (Μ/Σ)	0 (Μ/Σ)
15	9	12	0 (Μ/Σ)	0 (Μ/Σ)
16	10	11	0 (Μ/Σ)	0 (Μ/Σ)
17	10	12	0 (Μ/Σ)	0 (Μ/Σ)
18	11	13	53,11	65,85
19	11	14	46,67	57,87
20	12	13	53,11	65,85
21	12	23	107,83	133,70
22	13	23	96,56	119,73
23	14	16	43,45	53,88
24	15	16	19,31	23,95
25	15	21	54,72	67,85
26	15	21	54,72	67,85
27	15	24	57,94	71,84
28	16	17	28,97	35,92
29	16	19	25,75	31,93
30	17	18	16,09	19,96
31	17	22	117,48	145,68
32	18	21	28,97	35,92
33	18	21	28,97	35,92
34	19	20	44,26	54,88
35	19	20	44,26	54,88
36	20	23	24,14	29,93
37	20	23	24,14	29,93
38	21	22	75,64	93,79

Πίνακας 4. Πίνακας γραμμών για το Πρότυπο 24 ζυγών της ΙΕΕΕ

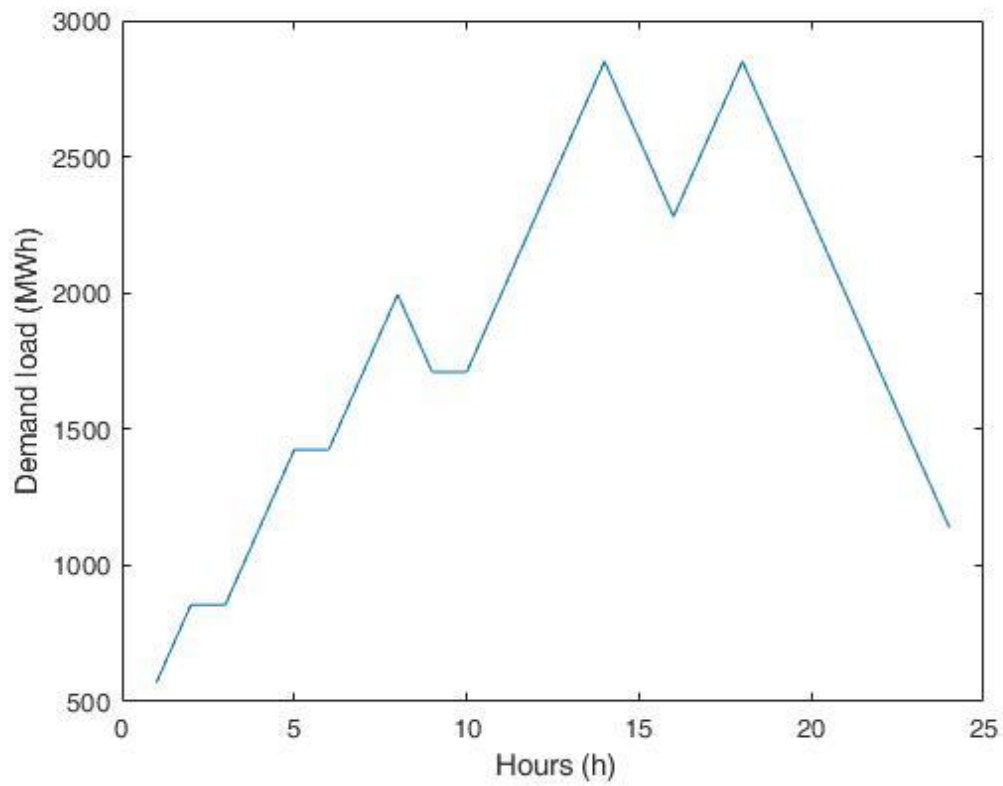


Σχήμα 6. Πρότυπο 24 ζυγών της IEEE.

Η περιοχή 1 (πράσινο χρώμα) περιλαμβάνει τις γραμμές 5,9,10,11,12,13,13 η περιοχή 2 (κόκκινο χρώμα) χτυπάει τις γραμμές 23-35 και η περιοχή 3 (κίτρινο χρώμα) χτυπάει τις γραμμές 2,6,18- 27.



Σχήμα 7. Διάγραμμα εξέλιξης της ταχύτητας του ανέμου στη διάρκεια του 24ώρου για 3 διαφορετικές περιπτώσεις τυφώνων



Σχήμα 8. Ημερήσια ζήτηση φορτίου

TAXYTHTA ANEMOY (m/s)			
ΩΡΑ	ΤΥΦΩΝΑΣ 1	ΤΥΦΩΝΑΣ 2	ΤΥΦΩΝΑΣ 3
1	16,8452	27,807	19,0156
2	20,5826	29,877	21,1254
3	24,3468	32,867	24,2216
4	28,8050	36,202	29,4002
5	30,7004	38,525	31,8388
6	32,4890	39,123	32,7978
7	34,3844	40,917	34,0856
8	35,7993	36,823	35,6474
9	36,6803	35,282	37,7572
10	36,3066	32,223	38,6066
11	34,8917	31,027	37,8394
12	33,6103	29,279	36,9078
13	32,7293	27,623	35,6474
14	31,3144	26,772	33,2636
15	30,2733	25,139	32,1676
16	29,3923	21,942	31,4826
17	28,6715	18,722	30,1674
18	27,0697	20,027	29,4824
19	25,7082	21,279	27,2356
20	24,2934	20,623	26,2218
21	23,0653	19,772	27,3726
22	21,3835	18,139	25,5916
23	19,0609	16,942	23,2626
24	16,8452	18,722	19,3718

Πίνακας 5. Ταχύτητες ανέμου ανά ώρα για τρεις περιπτώσεις τυφώνων

ΕΥΑΛΩΤΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ		
ΠΕΡΙΟΧΗ 1	ΠΕΡΙΟΧΗ 2	ΠΕΡΙΟΧΗ 3
5	23	2
9	24	6
10	25	18
11	26	19
12	27	20
13	28	21
-	29	22
-	30	23
-	31	24
-	32	25
-	33	26
-	34	27
-	35	-

Πίνακας 6. Ευάλωτες γραμμές μεταφορές εξαιτίας των ισχυρών ανέμων που χτυπούν το δίκτυο

Περίπτωση 1 - Μεταβολή της τιμής της παραμέτρου π_{thres}

Τα αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου π_{thres} με βήμα 2% παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Οι τιμές προέκυψαν για τιμή προϋπολογισμού $125 \cdot 10^6$, $N=3$ (εκτιμάται δηλαδή ότι 3 τυφώνες θα πλήξουν το δίκτυο τη χρονική περίοδο που εξετάζεται). Η εφαρμογή δοκιμάζεται για την πρώτη περίπτωση τυφώνα και την πρώτη περιοχή που πλήττει. Το συνολικό κόστος υπολογίζεται αθροίζοντας το κόστος υπογειοποίησης και το κόστος αποκοπής φορτίου (το οποίο πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό N). Διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους και αλλάζοντας το $N=7$ προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.

Παρατηρείται ότι και για τις δύο περιπτώσεις για $\pi_{thres} \geq 5\%$ καμία γραμμή δεν υπογειοποιείται και το κόστος υπογειοποίησης είναι μηδενικό. Αυτό συμβαίνει καθώς για $\pi_{thres} \geq 5\%$ οι βλάβες δεν οδηγούν σε αποκοπή φορτίου και επομένως η υπογειοποίηση γραμμών δεν επιλέγεται. Για $\pi_{thres} = 1\%$ και $\pi_{thres} = 3\%$ επιλέγεται η υπογειοποίηση των γραμμών 10 και 11. Παρατηρείται επομένως ότι με τη μειωμένη τιμή της παραμέτρου π_{thres} επιλέγεται η υπογειοποίηση γραμμών και έτσι διαμορφώνεται το κόστος επένδυσης. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μειώνεται η παράμετρος π_{thres} που αποτελεί τιμή κατωφλίου, λαμβάνονται υπόψη περισσότεροι συνδυασμοί βλαβών στις γραμμές, με βάση την σχέση (8). Επίσης παρατηρείται ότι για $\pi_{thres} = 1\%$ και $\pi_{thres} = 3\%$ η υπογειοποίηση των γραμμών οδηγεί σε μηδενική αποκοπή φορτίου.

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ-ΛΗΨΕΩΝ
1	10,11	25,75	0	0	25,75	5 (t=8)	3
3	10,11	25,75	0	0	25,75	12 (t=10) 13 (t=11)	4
5	0	0	0	0	0	11 (t=9)	2
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 7. Μεταβολή παραμέτρου π_{thres} ($N=3$)

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ-ΛΗΨΕΩΝ
1	10,11	25,75	0	0	25,75	5 (t=9) 13 (t=13)	3
3	10,11	25,75	0	0	25,75	5 (t=10) 12 (t=11)	4

5	0	0	0	0	0	11 (t=9)	2
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 8. Μεταβολή παραμέτρου π_{thres} (N=7)

Χρειάζεται να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις υπολογισμών όπου αλλάζοντας την τιμή του π_{thres} το πρόβλημα βγάζει ως αποτέλεσμα λιγότερες ή διαφορετικές γραμμές προς υπογειοποίηση. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 9 και 10. Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 9 χρησιμοποιήθηκαν ως τιμές παραμέτρων οι εξής: προϋπολογισμός = $125 \cdot 10^6$, N=7. Το πρόβλημα επιλύθηκε υποθέτοντας ότι ο πρώτος τυφώνας χτυπάει την τρίτη περιοχή. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 9 προέκυψαν μειώνοντας τον προϋπολογισμό στην τιμή $100 \cdot 10^6$.

Διαπιστώνεται ότι στην πρώτη περίπτωση (Πίνακας 9), για τιμή παραμέτρου $\pi_{thres} = 1\%$, το πρόβλημα υπογειοποιεί τις γραμμές 19 και 23 ενώ για $\pi_{thres} = 3\%$ υπογειοποιεί μόνο την 23. Ακόμα παρατηρείται ότι για $\pi_{thres} = 1\%$, η υπογειοποίηση των γραμμών 19, 23 δεν οδηγεί σε μηδενισμό της αποκοπής φορτίου, αφού παίρνονται υπόψη στη μέθοδο περισσότεροι συνδυασμοί βλαβών στις γραμμές, ενώ για $\pi_{thres} = 3\%$ με την υπογειοποίηση της γραμμής 23 δεν παρουσιάζεται καθόλου αποκοπή φορτίου. Στη συνέχεια η μέθοδος για $\pi_{thres} \geq 5\%$ δεν υπογειοποιεί καμία γραμμή εφόσον οι πιθανές βλάβες δεν οδηγούν σε αποκοπή φορτίου. Παρατηρείται δηλαδή, όπως και με τα αποτελέσματα του Πίνακα 7 και 8 ότι με μείωση της συγκεκριμένης παραμέτρου αυξάνονται οι γραμμές που επιλέγονται να υπογειοποιηθούν. Όταν επιλέγεται μικρότερος προϋπολογισμός (Πίνακας 10) για $\pi_{thres} = 1\%$ επιλέγονται να υπογειοποιηθούν οι γραμμές 6 και 20 που έχουν μικρότερο κόστος υπογειοποίησης και για $\pi_{thres} = 3\%$ η γραμμή 23, προκειμένου να ικανοποιείται ο περιορισμός του προϋπολογισμού.

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ($\cdot 10^6$ €)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ-ΛΗΨΕΩΝ
1	19,23	111,75	96,16	19231,1	207,91	2 (t=9) 6 (t=8) 21 (t=12) 24 (t=13) 25 (t=10) 26 (t=11) 27 (t=7)	6
3	23	53,88	0	0	53,88	19 (t=9) 20 (t=10) 27 (t=8)	3
5	0	0	0	0	0	-	2
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 9. Παραδείγματα αλλαγής των γραμμών που επιλέγονται για υπογειοποίηση. Μεγαλύτερος προϋπολογισμός

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗΣ (·10 ⁶ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (·10 ⁶ €)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (·10 ⁶ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗ- ΨΕΩΝ
1	6,20	90,8	136,82	27364,4	227,62	2 (t=12) 8 (t=13) 19 (t=8) 21 (t=10) 22 (t=9) 23 (t=7) 27 (t=11)	6
3	23	53,88	0	0	53,88	19 (t=9) 20 (t=10) 27 (t=8)	3
5	0	0	0	0	0	-	2
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 10. Παραδείγματα αλλαγής των γραμμών που επιλέγονται για υπογειοποίηση. Μικρότερος προϋπολογισμός

Στους Πίνακες 11 και 12 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου για την δεύτερη περιοχή που πλήττει ο δεύτερος και τρίτος τυφώνας αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα προκύπτουν για προϋπολογισμό = $125 \cdot 10^6$ και $N=3$. Διαπιστώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις δεν επιλέγεται η υπογειοποίηση γραμμών για καμία τιμή της παραμέτρου π_{thres} . Τα αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευτούν αν γίνει σύγκριση της δεύτερης περιοχής σε σχέση με την πρώτη περιοχή που εξετάστηκε στους Πίνακες 7 και 8. Παρατηρώντας την περιοχή 2 διαπιστώνεται ότι περιέχει γραμμές μεγάλου μήκους, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλο κόστος υπογειοποίησης. Επίσης στους περισσότερους ζυγούς που έχουν φορτίο υπάρχει και γεννήτρια. Επομένως ακόμα και σε ενδεχόμενη βλάβη των γραμμών, τα φορτία ικανοποιούνται τοπικά από την γεννήτρια που βρίσκεται στον ίδιο ζυγό και η αποκοπή φορτίου ελαχιστοποιείται. Για αυτούς τους λόγους η μέθοδος δεν επιλέγει να γίνει επένδυση για την υπογειοποίηση των γραμμών.

Η ίδια αιτιολόγηση εξηγεί γιατί στα αποτελέσματα των Πινάκων 7-10 υπάρχουν περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου όπου αν και παρουσιάζεται βλάβη στις γραμμές το κόστος αποκοπής είναι μηδενικό. Αυτό συμβαίνει για τις γραμμές 11, 19, 20, 27. Παρατηρούμε ότι αυτές οι γραμμές συνδέονται με ζυγό που περιέχει γεννήτρια. Επομένως το φορτίο ικανοποιείται τοπικά, δεν επηρεάζεται η ζήτηση από τις βλάβες στις γραμμές και για αυτό δεν παρουσιάζεται αποκοπή φορτίου.

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗΣ (·10 ⁶ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (·10 ⁶ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ- ΛΗΨΕΩΝ
1	0	0	14,28	2855,1	14,28	23 (t=7) 24 (t=5) 25 (t=6) 26 (t=3) 27 (t=4) 28 (t=9) 29 (t=7)	3
3	0	0	14,28	2855,1	14,28	23 (t=7) 24 (t=7) 25 (t=5) 26 (t=4) 27 (t=8) 29 (t=6)	3
5	0	0	14,28	2855,1	14,28	23 (t=6) 24 (t=4) 25 (t=5) 26 (t=7) 27 (t=7) 29 (t=8)	3
7	0	0	3,3	660	3,3	24 (t=5) 26 (t=8) 27 (t=7) 28 (t=6)	3

Πίνακας 11. Αποτελέσματα μεθόδου για δεύτερο τυφώνα στη δεύτερη περιοχή

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗΣ (·10 ⁶ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (·10 ⁶ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ- ΛΗΨΕΩΝ
1	0	0	14,28	2834,4	14,28	23 (t=9) 24 (t=8) 25 (t=7) 26 (t=9) 27 (t=6) 29 (t=10)	3
3	0	0	14,17	2834,4	14,17	23 (t=11) 24 (t=10) 25 (t=9) 26 (t=8) 27 (t=10) 29 (t=12)	3

5	0	0	13,49	2697,9	13,49	23 (t=12) 24 (t=8) 25 (t=9) 26 (t=10) 27 (t=13) 29 (t=11)	3
7	0	0	9,12	1823,7	9,12	24 (t=9) 25 (t=11) 26 (t=12) 27 (t=10)	3

Πίνακας 12. Αποτελέσματα μεθόδου για τρίτο τυφώνα στη δεύτερη περιοχή

Ολοκληρώνοντας τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων της μεθόδου για την περίπτωση 1 μπορεί να σχολιαστεί ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ήταν έξι, ενώ παρατηρείται ότι ο αριθμός των επαναλήψεων μειώνεται καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου π_{thres} , αφού μειώνεται ο αριθμός των σεναρίων που εξετάζονται.

Περίπτωση 2 – Μεταβολή της τιμής της παραμέτρου N

Αλλάζοντας τον αριθμό του πλήθους των τυφώνων που χτυπούν το δίκτυο στο χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 13. Οι τιμές προκύπτουν για τιμές παραμέτρων: προϋπολογισμός $125 \cdot 10^6$, $\pi_{thres} = 1\%$, ενώ εξετάζεται ο πρώτος τυφώνας για την πρώτη περιοχή που χτυπάει. Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 14 μεταβάλλεται η τιμή της παραμέτρου π_{thres} σε 3%.

Το πρόβλημα στην περίπτωση που εκτιμάται ότι μόνο ένας τυφώνας θα χτυπήσει το δίκτυο δεν επιλέγει να υπογειοποιήσει καμία γραμμή, επειδή σε αυτή την περίπτωση το κόστος αποκοπής φορτίου είναι μικρότερο από το κόστος που απαιτεί η επένδυση προκειμένου να μειωθεί το κόστος λειτουργίας. Δηλαδή επειδή το φαινόμενο δεν είναι συχνό, προτιμάται να υπάρξει αποκοπή φορτίου όταν θα χτυπηθεί το δίκτυο από τον τυφώνα παρά ο διαχειριστής του δικτύου να επενδύσει στην υπογειοποίηση γραμμών. Όμως αν εκτιμάται ότι το δίκτυο θα χτυπηθεί από τυφώνες δύο φορές ή παραπάνω το πρόβλημα επιλέγει να υπογειοποιήσει τις γραμμές 10 και 11, μηδενίζοντας την αποκοπή φορτίου. Από τη στιγμή που υπογειοποιούνται αυτές οι γραμμές παρατηρείται ότι δεν υπάρχει αποκοπή φορτίου, επομένως δεν επιδρά στα αποτελέσματα η αύξηση του αριθμού των τυφώνων που εκτιμάται ότι θα χτυπήσουν το δίκτυο μέσα στον χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται.

Παρατίθενται για σύγκριση τα αποτελέσματα όταν η τιμή της παραμέτρου π_{thres} είναι 3% στον Πίνακα 14. Παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά με παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση όμως το πρόβλημα βελτιστοποίησης ξεκινά την υπογειοποίηση γραμμών για $N=3$, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση για $\pi_{thres} = 1\%$ ξεκινούσε υπογειοποίηση για $N=2$. Αυτό συμβαίνει γιατί με την αύξηση της παραμέτρου το πρόβλημα λαμβάνει υπόψη του συνδυασμούς βλαβών στις γραμμές που η πιθανότητά τους ξεπερνάει ένα μεγαλύτερο όριο πιθανότητας, άρα κρίνει

ότι είναι λιγότερο πιθανό να υπάρξει αποκοπή φορτίου που το μέγεθός του να οδηγήει στο να προτιμηθεί η επένδυση στην υπογειοποίηση γραμμών. Επομένως ακόμα και στην περίπτωση $N=2$, όπου εκτιμάται ότι το δίκτυο θα χτυπηθεί 2 φορές από τυφώνα, κρίνεται ότι είναι προτιμότερο να μην γίνει επένδυση από τον διαχειριστή του δικτύου.

	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	0	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11
ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	0	25,75	25,75	25,75	25,75	25,75	25,75
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ($\cdot 10^6$ €)	180,24	0	0	0	0	0	0
ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	3604,7	0	0	0	0	0	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	18,02	25,75	25,75	25,75	25,75	25,75	25,75
ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	5 (t=7) 10 (t=8) 11 (t=11) 12 (t=10) 13 (t=9)	5 (t=11) 9 (t=12) 13 (t=7)	5 (t=8)	5 (t=7) 13 (t=8)	5 (t=7) 9 (t=13)	5 (t=9) 12 (t=11) 13 (t=8)	5 (t=9) 13 (t=13)
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΩΝ	3	3	3	3	3	3	3

Πίνακας 13. Μεταβολή παραμέτρου N ($\pi_{thres} = 1\%$)

	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	0	0	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11
ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	0	0	25,75	25,75	25,75	25,75	25,75
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ($\cdot 10^6$ €)	9,83	19,67	0	0	0	0	0
ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	1966,5	3933	0	0	0	0	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	98,33	19,67	25,75	25,75	25,75	25,75	25,75
ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	11 (t=8) 12 (t=10) 13 (t=9)	9 (t=11) 11 (t=10) 12 (t=8) 13 (t=9)	12 (t=10) 13 (t=11)	-	-	-	5 (t=10) 12 (t=11)
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΩΝ	3	4	4	4	4	4	4

Πίνακας 14. Μεταβολή παραμέτρου N ($\pi_{thres} = 3\%$)

Περίπτωση 3 – Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου

Εξετάζουμε τα αποτελέσματα του προβλήματος με μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά $\pm 2\%$, $\pm 4\%$. Οι τιμές προέκυψαν από τιμή προϋπολογισμού $125 \cdot 10^6$, $N=3$, για τον 1^ο τυφώνα και 1^η περιοχή που χτυπάει. Για σύγκριση υπενθυμίζεται ότι ο Πίνακας 7 δίνει τις τιμές για τις ίδιες τιμές παραμέτρων, όταν ο άνεμος έχει την αρχική ταχύτητα που φαίνεται στον Πίνακα 5.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (Πίνακες 15 και 16) το πρόβλημα είτε επιλέγει να υπογειοποιήσει τις ίδιες γραμμές (στις περιπτώσεις που η τιμή της παραμέτρου π_{thres} είναι 1% ή 3%) είτε επιλέγει να υπογειοποιήσει περισσότερες γραμμές, όπως στην περίπτωση που η τιμή της παραμέτρου π_{thres} είναι 5%. Για ίδια τιμή παραμέτρου με την αρχική ταχύτητα ανέμου το πρόβλημα δεν υπογειοποιούσε καμία γραμμή. Με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου το καιρικό φαινόμενο γίνεται πιο έντονο, με αποτέλεσμα να προκύπτει μεγαλύτερη πιθανότητα βλαβών στις γραμμές και μεγαλύτερη επακόλουθη αποκοπή φορτίου. Οπότε προτιμάται η υπογειοποίηση γραμμών.

Για μικρότερες τιμές ανέμου (Πίνακες 17 και 18) παρατηρείται το εξής. Για μικρή αλλαγή ανέμου -2% δεν έχουμε μεταβολή στις γραμμές που επιλέγεται να υπογειοποιηθούν για αντίστοιχες τιμές παραμέτρου π_{thres} . Για μεγαλύτερη όμως αλλαγή -4% παρατηρείται ότι για $\pi_{thres}=3\%$ δεν υπογειοποιείται καμία γραμμή, σε αντίθεση με την επιλογή της υπογειοποίησης των γραμμών 10 και 11 από το πρόβλημα για τις αρχικές τιμές ανέμου. Η μέθοδος εκτιμά ότι με μικρότερες τιμές ανέμου είναι λιγότερο πιθανές βλάβες στις γραμμές οπότε προτιμά να μην προχωρήσει σε επένδυση για υπογειοποίηση γραμμών.

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ- ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ- ΛΗΨΕΩΝ
1	10,11	25,75	0	0	25,75	-	3
3	10,11	25,75	0	0	25,75	13 (t=8)	3
5	10,11	25,75	0	0	25,75	-	4
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 15. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά $+2\%$

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ-ΛΗΨΕΩΝ
1	10,11	25,75	0	0	25,75	9 (t=11) 12 (t=13) 13 (t=14)	3
3	10,11	25,75	0	0	25,75	-	3
5	10,11	25,75	0	0	25,75	-	3
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 16. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά +4%

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ-ΛΗΨΕΩΝ
1	10,11	25,75	0	0	25,75	-	3
3	10,11	25,75	0	0	25,75	-	4
5	0	0	0	0	0	-	2
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 17. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά -2%

π_{thres} (%)	ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟ-ΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (€)	ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑ-ΛΗΨΕΩΝ
1	10,11	25,75	0	0	25,75	-	3
3	0	0	0	0	0	-	2
5	0	0	0	0	0	-	2
7	0	0	0	0	0	-	2

Πίνακας 18. Μεταβολή ταχύτητας ανέμου κατά -4%

Περίπτωση 4 – Μεταβολή του φορτίου

Δοκιμάζεται να γίνει αύξηση του φορτίου του ΣΗΕ. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 19 προέκυψαν για τιμή προϋπολογισμού $125 \cdot 10^6$, $N=3$ και $\pi_{thres}=1\%$. Παρατηρείται ότι για αύξηση μέχρι και 20% δεν έχουμε κάποια αλλαγή στις γραμμές που επιλέγονται να υπογειοποιηθούν, ούτε και στην αποκοπή φορτίου.

	Κανονικό φορτίο	+5%	+10%	+20%
ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ	10,11	10,11	10,11	10,11
ΚΟΣΤΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ($\cdot 10^6$ €)	25,75	25,75	25,75	25,75
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ($\cdot 10^6$ €)	0	0	0	0
ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (MWh)	0	0	0	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ($\cdot 10^6$ €)	25,75	25,75	25,75	25,75
ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (t, χρονική στιγμή βλάβης)	5 (t=8)	5 (t=8)	5 (t=8)	5 (t=8)
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΩΝ	3	3	3	3

Πίνακας 19. Μεταβολή φορτίου

Χρόνος επίλυσης προβλήματος

Επιλύοντας το πρόβλημα που δίνει τα αποτελέσματα του Πίνακα 7, καταγράφονται οι χρόνοι εκτέλεσης στους Πίνακας 16 και 17. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η παράμετρος π_{thres} ο χρόνος εκτέλεσης μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί το πρόβλημα επιλύεται για λιγότερους συνδυασμούς βλαβών στις γραμμές οπότε επιταχύνεται η επίλυση. Ακόμα, καταγράφεται ότι όσο δυναμώνει η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 20. Χρόνος εκτέλεσης με μεταβολή παραμέτρου π_{thres}

π_{thres} (%)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ (s)
1	2,97
3	2,47
5	0,51
7	0,23

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ (s)			
π_{thres} (%)	Αρχική ταχύτητα ανέμου	Αύξηση ταχύτητας ανέμου +2%	Μείωση ταχύτητας ανέμου -2%
5	0,51	2,71	0,36

Πίνακας 21. Χρόνος εκτέλεσης με μεταβολή ταχύτητας ανέμου

Σύνοψη

Οι φυσικές καταστροφές παρουσιάζουν σημαντικό κίνδυνο για τα ΣΗΕ με βαρύνουσες κοινωνικές και οικονομικές προεκτάσεις. Επομένως προκύπτει ανάγκη ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των ΣΗΕ απέναντι στις φυσικές καταστροφές, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Με τον όρο ανθεκτικότητα ενός συστήματος γίνεται αναφορά στην ικανότητα του να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά γεγονότα μικρής πιθανότητας με μεγάλη επίπτωση στο σύστημα, να επανέρχεται γρήγορα μετά από το πέρας των γεγονότων αυτών, να μπορεί να προσαρμόσει τη δομή και τη λειτουργία του για να μειώσει τις επιπτώσεις αντίστοιχων φαινομένων στο μέλλον. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμα πιο επιτακτική λόγω της αύξησης της συχνότητας και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων τις τελευταίες δεκαετίες.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εξετάστηκε η περίπτωση των τυφώνων. Για να μοντελοποιηθεί η επίδραση τους στο ΣΗΕ και να υπολογιστούν οι πιθανότητες βλάβης των στοιχείων του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες ευθραυστότητας. Αυτές οι καμπύλες δίνουν την πιθανότητα βλάβης των γραμμών και των πυλώνων συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου. Στόχος του προβλήματος που παρουσιάστηκε είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους υπό το δυσμενέστερο σενάριο (worst case scenario - χειρότερο σενάριο βλάβης λόγω της φυσικής καταστροφής). Ιστορικά δεδομένα τυφώνων λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να αποφασιστεί ποιες γραμμές θα υπογειοποιηθούν, ώστε να μην επηρεάζονται από μελλοντικούς τυφώνες. Το συνολικό κόστος θεωρείται ίσο με το κόστος αποκοπής φορτίου και το κόστος επένδυσης για την υπογειοποίηση των γραμμών. Για να γίνει αυτό λαμβάνεται υπόψη και η συχνότητα εμφάνισης των τυφώνων κατά την χρονική περίοδο που βρίσκεται υπό εξέταση. Επομένως το συνολικό κόστος αποκοπής υπολογίζεται με το άθροισμα του κόστους αποκοπής φορτίου κάθε φορά που ένας τυφώνας πλήττει το δίκτυο και προκαλεί βλάβες στις γραμμές, οι οποίες οδηγούν σε μη εξυπηρέτηση της συνολικής ζήτησης. Οι πιθανότητες βλάβης των γραμμών λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος αποκοπής φορτίου υπό το δυσμενέστερο σενάριο.

Το πρόβλημα διαμορφώθηκε ως ένα min-max-min πρόβλημα εύρωστου προγραμματισμού τριών επιπέδων (tri-level). Το πρώτο επίπεδο στοχεύει στην εύρεση των γραμμών που πρέπει να υπογειοποιηθούν ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος υπό το δυσμενέστερο σενάριο. Το δεύτερο επίπεδο εντοπίζει το δυσμενέστερο σενάριο θεωρώντας τις υποβαθμισμένες καταστάσεις του συστήματος με πιθανότητα άνω ενός ορίου, το οποίο τίθεται από τον διαχειριστή του συστήματος (παράμετρος π_{thres}). Το τρίτο επίπεδο ελαχιστοποιεί το κόστος λειτουργίας του συστήματος βάσει των βλαβών που αποφασίζονται από το δεύτερο επίπεδο. Θεωρείται ότι οι υπόγειες γραμμές δεν επηρεάζονται από καιρικά φαινόμενα όπως οι τυφώνες και επομένως η πιθανότητα βλάβης τους κατά τη διάρκεια τέτοιων φαινομένων είναι ίση με την πιθανότητα βλάβης υπό κανονικές συνθήκες.

Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή της μεθόδου επιβεβαιώνεται ότι η υπογειοποίηση των γραμμών οδηγεί σε λιγότερες βλάβες, μικρότερη αποκοπή φορτίου και επομένως ενίσχυση της ανθεκτικότητας του ΣΗΕ, που ήταν ο στόχος της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην διπλωματική εργασία.

Με την μείωση της παραμέτρου π_{thres} υπογειοποιούνται περισσότερες γραμμές και έτσι αυξάνεται το κόστος επένδυσης. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μειώνεται η συγκεκριμένη παράμετρος το πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνει υπόψη περισσότερους συνδυασμούς βλαβών στις γραμμές του και επομένως λόγω αυτού αποφασίζεται να υπογειοποιηθούν περισσότερες γραμμές. Συνεπώς η επιλογή της παραμέτρου π_{thres} από τον διαχειριστή του συστήματος έχει μεγάλη σημασία.

Με βάση τα κλιματικά μοντέλα, αν εκτιμάται ότι περισσότεροι τυφώνες θα χτυπήσουν το δίκτυο στον χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται, το πρόβλημα επιλέγει να υπογειοποιήσει περισσότερες γραμμές σε σύγκριση με την περίπτωση που λιγότεροι τυφώνες εκτιμάται ότι θα χτυπήσουν. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος αυξάνεται από το κόστος αποκοπής φορτίου λόγω του αυξημένου αριθμού τυφώνων. Επομένως ο διαχειριστής αποφασίζει να δαπανήσει το κόστος επένδυσης για την υπογειοποίηση γραμμών αν κρίνει ότι αυτό είναι μικρότερο σε σχέση με το συνολικό κόστος αποκοπής φορτίου αν δεν προχωρήσει στην υπογειοποίηση για το χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται.

Με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου υπογειοποιούνται περισσότερες γραμμές, αφού αναμένονται περισσότερες βλάβες, και επομένως μεγαλύτερο κόστος αποκοπής φορτίου. Επομένως η μέθοδος προκρίνει προς τον διαχειριστή του δικτύου την υπογειοποίηση γραμμών μεταφοράς. Η αύξηση του φορτίου δεν είχε επίδραση στα αποτελέσματα της μεθόδου. Σε περιπτώσεις που οι τυφώνες πλήττουν περιοχές με γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους και υψηλού κόστους υπογειοποίησης παρατηρείται ότι η μέθοδος δεν προτείνει την υπογειοποίηση των γραμμών, αφού το κόστος της αποκοπής φορτίου σε περίπτωση τυφώνα είναι μικρότερο σε σχέση με το κόστος επένδυσης.

Όπως έχει γίνει αντιληπτό από τα συμπεράσματα, η επιλογή των γραμμών προς υπογειοποίηση εξαρτάται από την επιλογή του ορίου π_{thres} . Επομένως η ανάπτυξη μεθόδου για την βέλτιστη επιλογή του ορίου είναι μείζονος σημασίας. Επιπλέον, η μέθοδος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής λαμβάνει υπόψη μόνο ένα καιρικό φαινόμενο του παρελθόντος. Θα πρέπει το πρόβλημα να διαμορφωθεί έτσι ώστε να μπορεί να λαμβάνει υπόψη ένα μεγάλο αριθμών ιστορικών γεγονότων και να αποφασίζει ποιες γραμμές θα υπογειοποιηθούν δεδομένου του προϋπολογισμού.

Τέλος, η φάση αποκατάστασης του συστήματος θα πρέπει να ενσωματωθεί στην προτεινόμενη μέθοδο, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αποκοπή φορτίου έως την πλήρη αποκατάσταση των βλαβών. Αυτό πιθανόν θα οδηγούσε στην απόφαση υπογειοποίησης περισσότερων γραμμών, καθώς το κόστος αποκοπής φορτίου θα αυξανόταν.

Βιβλιογραφία

- [1] World Bank [Online]. Available:
<https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2021/06/07/report-universal-access-to-sustainable-energy-will-remain-elusive-without-addressing-inequalities>.
- [2] Οδηγία 2008/114/ΕΚ της ΕΕ για την προστασία κρίσιμων υποδομών [Online]. Available:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=celex%3A32008L0114>.
- [3] I. Burton, R. W. Kates, «The Environment As Hazard,» *Oxford University Press*, 1978.
- [4] UN Office for Disaster Risk Reduction and the UN - International Strategy for Disaster Risk Reduction (UNISDR).
- [5] Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.,» *Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA*, 2012.
- [6] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters - A Review," *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 32, no.2, pp. 1604-1613, March 2016.
- [7] F.H. Jufri, V. Widiputra, J. Jung, "State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1049-1065, April 2019.
- [8] N. Bhusal, M. Abdelmalak, Md Kamruzzaman, M. Benidris, "Power System Resilience: Current Practices, Challenges, and Future Directions," *IEEE Access*, 2020.
- [9] National Oceanic and Atmospheric Administration [Online]. Available:
<https://coast.noaa.gov/states/fast-facts/hurricane-costs.html> .
- [10] Rutgers: Center for Advanced Infrastructure and Transportation [Online]. Available:
<https://cait.rutgers.edu/studying-the-damage-from-hurricane-maria-can-make-future-infrastructure-more-resilient/> .
- [11] A. Kwasinski, F. Andrade, M. J. Castro - Sitiriche, E. O' Neill - Carillio, "Hurricane Maria Effects on Puerto Rico Electric Power Infrastructure," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 6(1), pp. 85-94, 2019.
- [12] Entergy News Room [Online]. Available: <https://www.entergynewsroom.com/article/entergy-system-hurricane-ida-update-9-5-21-11-m/>.
- [13] Reuters [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/environment/why-hurricane-ida-crippled-new-orleans-power-grid-2021-09-04/>.

- [14] Australian Energy Market Operator [Online]. Available: <https://aemo.com.au/-/media/files/major-publications/isp/2020/brattle-group-report.pdf?la=en>.
- [15] European Council, "Study on the quality of electricity market data of transmission system operators, electricity supply disruptions, and their impact on the European electricity markets", 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/dg_ener_electricity_market_data_-_final_report_-_22032018.pdf.
- [16] ΔΕΔΔΗΕ, Δελτία Τύπου [Online]. Available: <https://www.deddie.gr/el/kentro-enhmerwsis/deltia-typou>.
- [17] A. Gholami, F. Aminifar, M. Shahidehpour, «Front Lines Against the Darkness: Enhancing the Resilience of the Electricity Grid Through Microgrid Facilities,» *IEEE Electrification Magazine*, vol.4, no.1 , pp. 18-24, March 2016.
- [18] Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.,» *Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA*, 2012.
- [19] M. Panteli, P. Mancarella «The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience,» *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, pp. 58-66, April 2015.
- [20] M. Panteli, D. N Trakas, P. Mancarella, N. K. Hatziargyriou, «Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies.,» *Proceedings of the IEEE*, 105(7), pp. 1202-1213, 2017.
- [21] M. Panteli, D. N Trakas, P. Mancarella, N. K. Hatziargyriou, «Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, (Volume: 7, Issue: 6), pp. 2913 - 2922, 15 March 2016.
- [22] Δ. Τράκας, Διδακτορική Διατριβή: "Συμβολή στην εκτίμηση και ενίσχυση της ανθεκτικότητας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Μάρτιος 2018.
- [23] H. Noorazar, A. Srivastava, K. Sadanandan Sajan, P. Sanjeev, «Data-driven Operation of the Resilient Electric Grid: A Case of COVID-19,» *The Journal of Engineering* , October 2020.
- [24] Our World in Data, 2020 [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ourworldindata.org/natural-disasters>.
- [25] IPCC [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/reports/>.
- [26] [Online]. Available: <https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/ANR/ANR---Raflinur-i-jord/33-Underground-high-voltage-cables-Leonardo.pdf>
- [27] National Grid [Online]. Available: https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/39111-Undergrounding_high_voltage_electricity_transmission_lines_The_technical_issues_INT.pdf.

- [28] Executive Office of the President, «Economic Benefits of increasing electric grid resilience to weather outages,» White House, August 2013.
- [29] I. Consulting, "“Overview of the Potential for undergrounding the electricity network in Europe”, Prepared for the DG TREN/ European Commission".
- [30] Australian Earthquake Engineering Society [Online]. Available: <https://aees.org.au/wp-content/uploads/2018/06/372-Sheng-Lin-Lin-et-al.pdf>
- [31] Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος [Online]. Available: <https://ypen.gov.gr/xekinisan-ta-prota-erga-y-pogeio-poiisis-tou-ilektrikou-diktyou/>
- [32] Con Energy [Online]. Available: <https://www.coned.com/media/files/coned/documents/our-energy-future/our-energy-projects/climate-change-resiliency-plan/climate-change-vulnerability-study.pdf?la=en>.
- [33] ΑΔΜΗΕ, "Εκθεση Βιώσιμης Ανάπτυξης," [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/inline-files/report_admie_web.pdf#report_admie_10_november_fix.indd%3A.460240%3A52.
- [34] ΔΕΔΔΗΕ, "Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου 2021-2025," [Online]. Available: https://www.deddie.gr/media/7847/%CF%83%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%BF-%CE%B1%CE%BD%CE%AC%CF%80%CF%84%CF%85%CE%BE%CE%B7%CF%82-%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CF%84%CF%8D%CE%BF%CF%85-2021_2025-network-development-plan-2021-2025.pdf.
- [35] Εθνικό Σχέδιο Ανάπτυξης και Ανθεκτικότητας [Online]. Available: <https://government.gov.gr/wp-content/uploads/2021/03/PressRel-RRF-%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%B1%CF%83%CE%B7-31.03.21-EL.pdf>.
- [36] D. N. Trakas, N. K. Hatziaargyriou, "Resilience Constrained Day-Ahead Unit Commitment Under Extreme Weather Events," *IEEE Transactions on Power Systems*, (Volume: 35, Issue: 2, March 2020), pp. 1242-1253.
- [37] P. Vincent *et al.*, «Testing and numerical simulation of overhead transmission lines dynamics under component failure conditions», *40th General Session of CIGRÉ, B2-308*, 2004.
- [38] J. M. Eidinger and L. Jr. Kempner, «Reliability of Transmission Towers under Extreme Wind and Ice Loading,» σε *44th CIGRÉ*, 2012.
- [39] YALMIP [Online]. Available: <https://yalmip.github.io/>.

