



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Μοντελοποίηση της εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης στα
κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας με τη χρήση
Μαρκοβιανών μοντέλων**

Διπλωματική Εργασία

Πέτρος Παγώνης

A.M. 231/17081

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Π. Κούτρας

Χίος, 2023

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Βασίλειο Κούτρα για την αμέριστη υποστήριξη και την εξαιρετική καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας μου. Οι πολύτιμες συμβουλές του, η αμεσότητα στην επικοινωνία μας και η εμπιστοσύνη του στις ικανότητές μου συνέβαλαν καταλυτικά στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Οφείλω επίσης, να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς την οικογένεια και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους από την αρχή μέχρι και το τέλος της φοίτησής μου στο Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Η ανιδιοτελής συνεισφορά όλων σας διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην πραγματοποίηση αυτού του σημαντικού επιτεύγματος. Σας ευχαριστώ θερμά.

Περίληψη

Σε κάθε σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούνται κάποιες πολιτικές συντήρησης (maintenance policies). Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, θα υιοθετηθεί η πολιτική της ευκαιριακής συντήρησης στα κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας. Η Διπλωματική Εργασία έχει σαν στόχο τη μοντελοποίηση της λειτουργίας κάθε υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας, με βάση τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται, και τη διερεύνηση του κατά πόσο η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, όταν αυτό είναι εφικτό και συμφέρον, μπορεί να βελτιώσει τη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος του κάθε υποσυστήματος και κατ' επέκταση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας.

Το πρώτο βήμα για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας καθενός από τα παραπάνω υποσυστήματα με τη χρήση της κατάλληλης στοχαστικής διαδικασίας. Θεωρώντας πως κάθε υποσύστημα αποτελείται από κάποια συγκεκριμένα στοιχεία τα οποία μπορεί να λειτουργούν τέλεια, μπορεί να υπολειτουργούν, μπορεί να συντηρούνται ή ακόμα και να υπόκεινται σε βλάβη, και υποθέτοντας ότι ο χρόνος παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις, για κάθε στοιχείο του εκάστοτε υποσυστήματος, είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή, η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος μοντελοποιείται με τη χρήση μιας Μαρκοβιανής διαδικασίας συνεχούς χρόνου. Ακολούθως, υπολογίζεται η ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας για κάθε πιθανή κατάσταση κάθε υποσυστήματος. Με βάση την κατανομή αυτή, υπολογίζεται στη συνέχεια τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα. Βασικό μέρος της εργασίας, είναι το γεγονός ότι για κάθε υποσύστημα, θα κατασκευαστεί ένα μοντέλο που δεν θα υιοθετεί την ευκαιριακή συντήρηση, καθώς και ένα μοντέλο στο οποίο θα εφαρμόζεται η ευκαιριακή συντήρηση, και θα συγκρίνεται τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το λειτουργικό κόστος τους, με σκοπό να διαπιστωθεί το κατά πόσο η ευκαιριακή συντήρηση ωφελεί το κάθε υποσύστημα και γενικότερα την ανεμογεννήτρια.

Η Διπλωματική Εργασία θα παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή ή όχι ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε ένα από τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας.

Abstract

In every power production system, certain maintenance policies are followed. In this Thesis, the policy of opportunistic maintenance will be applied to the main subsystems of a wind turbine. The main aim of this Thesis is to model the operation of wind turbine's subsystems, based on the components of which it is composed, and to investigate whether applying opportunistic maintenance to each subsystem, when it is feasible and advantageous, can improve the availability and operational costs of each subsystem and, by extension, of the entire wind turbine.

The initial step to achieve this goal is to model the operation of each of the above subsystems using the appropriate stochastic process. Considering that each subsystem consists of some specific components which may be perfectly functioning, may be underperforming, may undergo maintenance or even being failed, and assuming that the sojourn time in each of the above states, for each component of each subsystem, is a random variable following the exponential distribution, the operation of each subsystem is modeled by using a continuous-time Markov process. Subsequently, the asymptotic probability distribution for each state of each subsystem is calculated. Based on this distribution, both the availability and the expected operational costs for each subsystem are then calculated. A key part of this Thesis is that for each subsystem, a model that does not adopt opportunistic maintenance will be constructed, as well as a model in which opportunistic maintenance is applied, and both their availability and operational cost will be compared in order to determine whether opportunistic maintenance benefits each subsystem and the wind turbine in general.

The Thesis will provide the theoretical background for making decisions on whether or not to apply opportunistic maintenance to each of the major subsystems of a wind turbine.

Επιτελική Σύνοψη

Σε κάθε σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούνται κάποιες πολιτικές συντήρησης (maintenance policies). Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών. Είναι γνωστό πως ένα σύστημα όπως η ανεμογεννήτρια, αποσκοπεί στο να πλησιάζει τη μεγαλύτερη δυνατή παραγωγικότητα (Zhou & Yin, 2019). Προκειμένου να εξυπηρετηθεί αυτός ο σκοπός, προτείνεται η χρήση των κατάλληλων πολιτικών συντήρησης για το σύστημα. Μια τέτοια πολιτική είναι και αυτή της ευκαιριακής συντήρησης (opportunistic maintenance – OM). Πιο συγκεκριμένα, όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που μια ανεμογεννήτρια είναι εκτός λειτουργίας λόγω κάποιας βλάβης, προτείνεται, όταν αυτό αποφέρει πραγματικό όφελος, να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα ενέργειες συντήρησης σε μέρη και στοιχεία της ανεμογεννήτριας που λειτουργούν σε υποβαθμισμένη κατάσταση (Li et al., 2021). Σκοπός μιας τέτοιας πολιτικής είναι μόλις ολοκληρωθεί τόσο η διαδικασία αποκατάστασης της βλάβης όσο και η ευκαιριακή συντήρηση, η ανεμογεννήτρια να βρεθεί σε καλύτερη κατάσταση από την κατάσταση που θα βρισκόταν αν γινόταν μόνο η αποκατάσταση της βλάβης.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, υιοθετείται η πολιτική της ευκαιριακής συντήρησης στα κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας. Προτείνεται αρχικά η μελέτη της δομής της ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια η ομαδοποίηση των βασικών μερών αυτής. Αρχικά ταυτοποιούνται τα κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας και μοντελοποιείται η λειτουργία τους. Τα υποσυστήματα αυτά είναι: το σύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain), το υδραυλικό σύστημα (hydraulic system), σύστημα πέδησης (brake system), το σύστημα οριζόντιας περιστροφής (yaw system), το σύστημα περιστροφής των πτερυγίων (pitch system), το σύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub), τα πτερύγια (blades), το ηλεκτρικό σύστημα (power system), και τέλος η δομή (structure) (Le & Andrews, 2016). Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας κάθε υποσυστήματος, με βάση τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται, και η διερεύνηση του κατά πόσο η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, όταν αυτό είναι εφικτό και συμφέρον, μπορεί να βελτιώσει τη διαθεσιμότητα και το

λειτουργικό κόστος του κάθε υποσυστήματος και κατ' επέκταση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας.

Το πρώτο βήμα για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας κάθε ενός από τα παραπάνω υποσυστήματα με τη χρήση της κατάλληλης στοχαστικής διαδικασίας. Θεωρώντας πως κάθε υποσύστημα αποτελείται από κάποια συγκεκριμένα στοιχεία τα οποία μπορεί να λειτουργούν τέλεια, μπορεί να υπολειτουργούν, μπορεί να συντηρούνται ή ακόμα και να υπόκεινται σε βλάβη, και υποθέτοντας ότι ο χρόνος παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις, για κάθε στοιχείο του εκάστοτε υποσυστήματος, είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή, η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος μοντελοποιείται με τη χρήση μιας Μαρκοβιανής διαδικασίας συνεχούς χρόνου. Ακολούθως, με βάση τη σχετική βιβλιογραφία και την επεξεργασία δεδομένων σχετικά με τη λειτουργία, τη συντήρηση και την αποκατάσταση βλαβών των στοιχείων κάθε υποσυστήματος (Koukoura et al., 2021), υπολογίζεται η ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας για κάθε πιθανή κατάσταση κάθε υποσυστήματος. Με βάση την κατανομή αυτή, υπολογίζεται στη συνέχεια τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα. Βασικό μέρος της εργασίας, είναι το γεγονός ότι για κάθε υποσύστημα, κατασκευάζεται ένα μοντέλο που δεν υιοθετεί την ευκαιριακή συντήρηση, καθώς και ένα μοντέλο στο οποίο εφαρμόζεται η ευκαιριακή συντήρηση, και συγκρίνεται τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το λειτουργικό κόστος τους, με σκοπό να διαπιστωθεί το κατά πόσο η ευκαιριακή συντήρηση ωφελεί το κάθε υποσύστημα και γενικότερα την ανεμογεννήτρια.

Για την υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας ακολουθείται η μεθοδολογία της δευτερογενούς έρευνας και η μεθοδολογία της βιβλιογραφικής έρευνας (Critical Review of the Literature). Ειδικότερα, πραγματοποιείται δευτερογενής έρευνα με συλλογή δεδομένων από διαθέσιμα επιστημονικά άρθρα και βιβλιογραφική έρευνα (Ozturk et al., 2018). Στη συνέχεια, για τη δημιουργία των Μαρκοβιανών μοντέλων προχωρούμε στην κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων της βιβλιογραφίας. Ακολούθως, χρησιμοποιούμε το περιβάλλον προγραμματισμού "MATLAB" για να υπολογίσουμε την ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας κάθε κατάστασης, όπως και

για να υπολογίσουμε τη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα της ανεμογεννήτριας.

Έτσι, οδηγούμαστε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων σχετικά με τον αν κάθε υποσύστημα καθώς και η ανεμογεννήτρια ωφελείται ή όχι από την ευκαιριακή συντήρηση και συμπεραίνουμε πως πράγματι υπάρχει όφελος από την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης. Συγκεκριμένα, κάθε υποσύστημα όπως και η ανεμογεννήτρια παρουσίασαν υψηλότερη διαθεσιμότητα και χαμηλότερο αναμενόμενο κόστος λειτουργίας στην περίπτωση που εφαρμόστηκε ευκαιριακή συντήρηση έναντι της περίπτωσης μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, λόγω του ότι η διάρκεια και το κόστος συντήρησης είναι εμφανώς μικρότερα από τη διάρκεια και το κόστος αντικατάστασης, καθυστερεί δηλαδή η εμφάνιση βλάβης όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση. Με βάση τα παραπάνω, η Διπλωματική Εργασία παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή ή όχι ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε ένα από τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες

Περίληψη 3

Abstract 4

Επιτελική Σύνοψη 5

Περιεχόμενα 8

1. Εισαγωγή 10

1.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση 13

2. Στοχαστικές Ανελίξεις 20

2.1 Μαρκοβιανές Διαδικασίες 20

2.1.1 Μαρκοβιανές Αλυσίδες Διακριτού Χρόνου (ΜΑΔΧ) 21

2.1.2 Μαρκοβιανές Αλυσίδες Συνεχούς Χρόνου (ΜΑΣΧ) 25

3. Μοντελοποίηση της λειτουργίας των κύριων υποσυστημάτων μιας ανεμογεννήτριας 31

3.1 Κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας 31

3.2 Μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων με εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης 31

3.2.1 Υποσύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain) 32

3.2.2 Υδραυλικό υποσύστημα (hydraulic system) 36

3.2.3 Υποσύστημα πέδησης (brake system) 39

3.2.4 Υποσύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system) 42

3.2.5 Υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub) 46

3.2.6 Υποσύστημα πτερυγίων (blades) 48

3.2.7 Υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων (pitch system) 50

3.2.8 Ηλεκτρικό υποσύστημα (power system) 53

3.2.9 Υποσύστημα δομής (structure) 57

3.3 Μέτρα αξιοπιστίας και κόστους των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας 61

3.3.1 Διαθεσιμότητα των υποσυστημάτων και ανεμογεννήτριας 61

3.3.2	Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας των υποσυστημάτων και ανεμογεννήτριας	62
3.4	Μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης	64
4.	Αριθμητική εφαρμογή	68
4.1	Διαθεσιμότητα και αναμενόμενο κόστος λειτουργίας για την περίπτωση εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης	68
4.1.1	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain)	68
4.1.2	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υδραυλικό υποσύστημα (hydraulic system)	70
4.1.3	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα πέδησης (brake system)	71
4.1.4	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system)	72
4.1.5	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων (pitch system)	74
4.1.6	Διαθεσιμότητα και κόστος για το ηλεκτρικό υποσύστημα (power system)	75
4.1.7	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα δομής (structure)	76
4.1.8	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub)	77
4.1.9	Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα πτερυγίων (blades)	79
4.1.10	Διαθεσιμότητα και κόστος για την ανεμογεννήτρια	80
4.2	Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με την περίπτωση χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης	80
4.3	Επίδραση πολιτικών συντήρησης στη διαθεσιμότητα και το κόστος	85
5.	Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές έρευνας	115
5.1	Συμπεράσματα	115
5.2	Μελλοντικές προοπτικές έρευνας	117
	Βιβλιογραφία	118

1. Εισαγωγή

Ως ανεμογεννήτρια ορίζεται μια συσκευή η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια ομάδα ανεμογεννητριών ονομάζεται αιολικό πάρκο. Σε ένα αιολικό πάρκο, οι ανεμογεννήτριες παρέχουν ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες αυτές μπορεί να βρίσκονται στην ξηρά (onshore) ή στη θάλασσα (offshore). Κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα σχημάτων και μεγεθών, αλλά ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός είναι αυτός με τρία πτερύγια τοποθετημένα σε οριζόντιο άξονα. Η ισχύς τους κυμαίνεται από 100 Kilowatt έως 12 Megawatt. Μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα τεράστιο εύρος θέσεων: σε λόφους, σε ανοιχτά τοπία, στερεωμένες στον πυθμένα της θάλασσας - και μπορούμε να έχουμε ακόμη και πλωτές ανεμογεννήτριες (WindEurope, 2023).

Οι ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα αναπτύσσονται σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές αιολικής αυξάνεται σταθερά. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία που δημοσίευσε η WWEA τον Μάρτιο του 2022, η παγκόσμια αγορά για τις ανεμογεννήτριες σημείωσε ένα ακόμη ρεκόρ το 2021 με ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 97,5 Gigawatt που εγκαταστάθηκαν σε όλο τον κόσμο, μετά από την εγκατάσταση συνολικής ισχύος 92,7 Gigawatt το 2020. Η συνολική ισχύς όλων των ανεμογεννητριών παγκοσμίως είχε πλέον ξεπεράσει τα 840 Gigawatt (742,5 Gigawatt το 2020), αρκετή για να καλύψει περισσότερο από το 7% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (WWEA, 2022).

Σε κάθε σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούνται κάποιες πολιτικές συντήρησης (maintenance policies). Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών. Είναι γνωστό πως ένα σύστημα όπως η ανεμογεννήτρια, αποσκοπεί στο να πλησιάζει τη μεγαλύτερη δυνατή παραγωγικότητα (Zhou & Yin, 2019). Προκειμένου να εξυπηρετηθεί αυτός ο σκοπός, προτείνεται η χρήση των κατάλληλων πολιτικών συντήρησης για το σύστημα. Μια τέτοια πολιτική είναι και αυτή της ευκαιριακής συντήρησης (opportunistic maintenance – OM). Πιο συγκεκριμένα, όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που μια ανεμογεννήτρια είναι εκτός λειτουργίας λόγω κάποιας βλάβης, προτείνεται, όταν αυτό αποφέρει πραγματικό όφελος, να

πραγματοποιούνται ταυτόχρονα ενέργειες συντήρησης σε μέρη και στοιχεία της ανεμογεννήτριας που λειτουργούν σε υποβαθμισμένη κατάσταση (Li et al., 2021). Σκοπός μιας τέτοιας πολιτικής είναι μόλις ολοκληρωθεί τόσο η διαδικασία αποκατάστασης της βλάβης όσο και η ευκαιριακή συντήρηση, η ανεμογεννήτρια να βρεθεί σε καλύτερη κατάσταση από την κατάσταση που θα βρισκόταν αν γινόταν μόνο η αποκατάσταση της βλάβης.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, θα υιοθετηθεί η πολιτική της ευκαιριακής συντήρησης στα κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας. Προτείνεται αρχικά η μελέτη της δομής της ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια η ομαδοποίηση των βασικών μερών αυτής. Αρχικά θα ταυτοποιηθούν τα κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας και θα μοντελοποιηθεί η λειτουργία τους. Τα υποσυστήματα αυτά είναι: το σύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain), το υδραυλικό σύστημα (hydraulic system), σύστημα πέδησης (brake system), το σύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system), το σύστημα περιστροφής των πτερυγίων (pitch system), το σύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub), τα πτερύγια (blades), το ηλεκτρικό σύστημα (power system), και τέλος η δομή (structure) (Le & Andrews, 2016).

Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας κάθε υποσυστήματος, με βάση τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται και η διερεύνηση του κατά πόσο η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, όταν αυτό είναι εφικτό και συμφέρον, μπορεί να βελτιώσει τη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος του κάθε υποσυστήματος και κατ' επέκταση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας. Το πρώτο βήμα για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι η μοντελοποίηση της λειτουργίας κάθε ενός από τα παραπάνω υποσυστήματα με τη χρήση της κατάλληλης στοχαστικής διαδικασίας. Θεωρώντας πως κάθε υποσύστημα αποτελείται από κάποια συγκεκριμένα στοιχεία τα οποία μπορεί να λειτουργούν τέλεια, μπορεί να υπολειτουργούν, μπορεί να συντηρούνται ή ακόμα και να υπόκεινται σε βλάβη, και υποθέτοντας ότι ο χρόνος παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις, για κάθε στοιχείο του εκάστοτε υποσυστήματος, είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή, η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος μοντελοποιείται με τη χρήση μιας Μαρκοβιανής διαδικασίας συνεχούς χρόνου.

Ακολουθώντας, με βάση τη σχετική βιβλιογραφία και την επεξεργασία δεδομένων σχετικά με τη λειτουργία, τη συντήρηση και την αποκατάσταση βλαβών των στοιχείων κάθε υποσυστήματος (Koukoura et al., 2021), υπολογίζεται η ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας για κάθε πιθανή κατάσταση κάθε υποσυστήματος. Με βάση την κατανομή αυτή, υπολογίζεται στη συνέχεια τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα. Βασικό μέρος της εργασίας, είναι το γεγονός ότι για κάθε υποσύστημα, θα κατασκευαστεί ένα μοντέλο που δεν θα υιοθετεί την ευκαιριακή συντήρηση, καθώς και ένα μοντέλο στο οποίο θα εφαρμόζεται η ευκαιριακή συντήρηση, και θα συγκρίνεται τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το λειτουργικό κόστος τους, με σκοπό να διαπιστωθεί το κατά πόσο η ευκαιριακή συντήρηση ωφελεί το κάθε υποσύστημα και γενικότερα την ανεμογεννήτρια.

Για την υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας θα ακολουθηθεί η μεθοδολογία της δευτερογενούς έρευνας και η μεθοδολογία της βιβλιογραφικής έρευνας (Critical Review of the Literature). Ειδικότερα, θα πραγματοποιηθεί δευτερογενής έρευνα με συλλογή δεδομένων από διαθέσιμα επιστημονικά άρθρα και βιβλιογραφική έρευνα (Ozturk et al., 2018). Στη συνέχεια, για τη δημιουργία των Μαρκοβιανών μοντέλων θα προχωρήσουμε στην κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων της βιβλιογραφίας. Ακολουθώντας, θα χρησιμοποιήσουμε το περιβάλλον προγραμματισμού “MATLAB” για να υπολογίσουμε την ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας κάθε κατάστασης, όπως και για να υπολογίσουμε τη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα της ανεμογεννήτριας. Έτσι, θα οδηγηθούμε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αναζητούμε σχετικά με τον αν κάθε υποσύστημα ωφελείται ή όχι από την ευκαιριακή συντήρηση.

Με βάση τα παραπάνω, η Διπλωματική Εργασία θα παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή ή όχι ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε ένα από τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας.

1.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Σε αυτό το μέρος της Διπλωματικής Εργασίας θα γίνει μια περιγραφή κάποιων ενδεικτικών άρθρων από τη σχετική βιβλιογραφία που μελετήθηκε και συντέλεσε στη δημιουργία της παρούσας Διπλωματικής.

Οι (Besnard et al., 2009) παρουσιάζουν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης με ευκαιριακή συντήρηση για υπεράκτια συστήματα αιολικής ενέργειας. Το μοντέλο εκμεταλλεύεται τις προβλέψεις του ανέμου και τις δραστηριότητες διορθωτικής συντήρησης προκειμένου να εκτελούνται εργασίες προληπτικής συντήρησης με χαμηλό κόστος.

Στη μελέτη των (Ding & Tian, 2012) αναπτύσσονται προσεγγίσεις ευκαιριακής συντήρησης για αιολικά πάρκα ώστε να αξιοποιούνται οι ευκαιρίες συντήρησης. Εξετάζονται ενέργειες ατελούς συντήρησης, οι οποίες αντιμετωπίζουν το πρακτικό ζήτημα ως ότι η προληπτική συντήρηση δεν επαναφέρει πάντοτε τα εξαρτήματα σε κατάσταση τόσο καλή όσο και σαν καινούργια. Οι προτεινόμενες πολιτικές ευκαιριακής συντήρησης ορίζονται από τις τιμές κατώτατου ορίου ηλικίας των εξαρτημάτων και εισάγονται διαφορετικά κατώτατα όρια ατελούς συντήρησης για τις ανεμογεννήτριες που παρουσιάζουν βλάβες και τις ανεμογεννήτριες που λειτουργούν. Εξετάζονται τρεις τύποι δράσεων προληπτικής συντήρησης, που περιλαμβάνουν την τέλεια, την ατελή και τη δράση δύο επιπέδων. Αναπτύσσονται μέθοδοι προσομοίωσης για την αξιολόγηση του κόστους των προτεινόμενων πολιτικών ευκαιριακής συντήρησης. Παρέχονται αριθμητικά παραδείγματα για την απεικόνιση των προτεινόμενων προσεγγίσεων. Η συγκριτική μελέτη με την ευρέως εφαρμοζόμενη πολιτική διορθωτικής συντήρησης αναδεικνύει το πλεονέκτημα των προτεινόμενων μεθόδων ευκαιριακής συντήρησης στη σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης.

Στη μελέτη των (Shafiee et al., 2015) διερευνάται μια βέλτιστη ευκαιριακή πολιτική συντήρησης βάσει συνθηκών για ένα σύστημα υπεράκτιας ανεμογεννήτριας πολλαπλών πτερυγίων που υπόκειται σε ρωγμές διάβρωσης και εκτίθεται σε περιβαλλοντικά φαινόμενα. Το προτεινόμενο μοντέλο συντήρησης δοκιμάζεται σε μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων και η απόδοσή του κατά τη διάρκεια του

κύκλου ζωής του συστήματος αξιολογείται με τη χρήση μιας τεχνικής προσομοίωσης Monte-Carlo.

Οι (Le & Andrews, 2016) παρουσιάζουν ένα μοντέλο για την αξιοπιστία υπεράκτιων ανεμογεννητριών, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις διαδικασίες υποβάθμισης, επιθεώρησης και συντήρησης. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση τη μέθοδο των δικτύων Petri που αποτυπώνει αποτελεσματικά τη стоχαστική φύση των δυναμικών διαδικασιών μέσω της χρήσης κατάλληλων στατιστικών κατανομών. Σκοπός του μοντέλου είναι η πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας και η διερεύνηση της επίδρασης μιας συγκεκριμένης στρατηγικής συντήρησης. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι στατιστικά στοιχεία που δείχνουν την απόδοση των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας, τα οποία περιλαμβάνουν την πιθανότητα να βρίσκονται σε διαφορετικές καταστάσεις μετάβασης, τον αναμενόμενο αριθμό ενεργειών συντήρησης και το μέσο χρόνο μη λειτουργίας του συστήματος υπό οποιαδήποτε στρατηγική συντήρησης.

Με βάση περίπου 350 υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε όλη την Ευρώπη, η μελέτη των (Carroll et al., 2016) παρέχει ρυθμούς βλάβης για τη συνολική ανεμογεννήτρια και τα υποσυστήματά της. Παρέχει επίσης ρυθμούς βλάβης ανά έτος λειτουργίας, κατηγορία κόστους και τύπους βλάβης για τα εξαρτήματα ή τα υποσυστήματα που έχουν τον υψηλότερο συντελεστή στο συνολικό ρυθμό βλάβης. Οι χρόνοι επισκευής, το μέσο κόστος επισκευής και ο μέσος αριθμός των τεχνικών που απαιτούνται για την επισκευή αναλύονται λεπτομερώς σε αυτό το έγγραφο. Πραγματοποιείται σύγκριση του ρυθμού βλάβης μεταξύ χερσαίων και υπεράκτιων μονάδων για γεννήτριες και μετατροπείς. Τα αποτελέσματα του παρόντος εγγράφου συμβάλλουν στη μοντελοποίηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης υπεράκτιων αιολικών μονάδων και βοηθούν στη λήψη καλύτερων αποφάσεων για τους σχεδιαστές και τους διαχειριστές της λειτουργίας και της συντήρησης.

Στη μελέτη των (Abdollahzadeh et al., 2016), βάσει μιας προσέγγισης ευκαιριακής συντήρησης, προτείνεται ένα μοντέλο πολλαπλών στόχων για τη βελτιστοποίηση της συντήρησης ενός πάρκου που περιλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς τύπους ανεμογεννητριών. Οι παραδοχές της στοχαστικής

συμπεριφοράς της ταχύτητας του ανέμου καθώς και η ύπαρξη περιορισμένου αριθμού ομάδων συντήρησης λαμβάνονται επίσης υπόψη σε αυτή την προσέγγιση. Το προτεινόμενο μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη την ατελή συντήρηση, επιχειρεί (1) τη μεγιστοποίηση του εκτιμώμενου ρυθμού ενέργειας και (2) την ελαχιστοποίηση του συνολικού εκτιμώμενου κόστους που σχετίζεται με τις προσπάθειες συντήρησης. Η ευκαιριακή προσέγγιση παρέχεται επίσης από τις τιμές κατώτατου ορίου αξιοπιστίας των εξαρτημάτων. Η συγκριτική ανάλυση αποδεικνύει ότι η ικανότητα του προτεινόμενου μοντέλου είναι πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με τα μοντέλα που εξετάζονται στη βιβλιογραφία.

Οι (Zhang et al., 2017) προτείνουν μια προσέγγιση ευκαιριακής συντήρησης για ανεμογεννήτριες, λαμβάνοντας υπόψη ένα ατελές πρόγραμμα συντήρησης που βασίζεται στην αξιοπιστία. Χρησιμοποιείται ένα υβριδικό μοντέλο ρυθμού επικινδυνότητας για την περιγραφή της ατελούς συντήρησης και την εξήγηση των επιπτώσεων των διορθωτικών ενεργειών συντήρησης. Χρησιμοποιούνται συγκριτικά παραδείγματα για να παρουσιαστούν τα οικονομικά πλεονεκτήματα της ευκαιριακής συντήρησης. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης αποδεικνύουν τον αντίκτυπο που έχουν τα διάφορα κόστη συντήρησης (σταθερό κόστος διακοπής λειτουργίας και κόστος προληπτικής αντικατάστασης) στο οικονομικό όφελος της στρατηγικής ευκαιριακής συντήρησης. Η ανάλυση προσομοίωσης παρέχει επίσης το βέλτιστο όριο αξιοπιστίας της ευκαιριακής συντήρησης με τη χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης fruit fly, ώστε να παρέχει καθοδήγηση για την πραγματική λειτουργία και συντήρηση των αιολικών πάρκων.

Ο (Sangroudi, 2018) διατυπώνει τη βελτιστοποίηση του πλεονασμού και της ατελούς ευκαιριακής συντήρησης ενός συστήματος πολλαπλών καταστάσεων k-out-of-n. Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί το επίπεδο πλεονασμού του συστήματος k-out-of-n και η στρατηγική συντήρησης που θα ελαχιστοποιήσει το κόστος του κύκλου ζωής του αιολικού πάρκου, υπό τον περιορισμό της διαθεσιμότητας. Αναπτύσσεται μια νέα προσέγγιση ευκαιριακής συντήρησης με βάση τις συνθήκες. Εισάγονται διαφορετικά κατώτατα όρια κατάστασης υγείας των εξαρτημάτων για την ατελή συντήρηση των αποτυχημένων υποσυστημάτων και των υποσυστημάτων που λειτουργούν και την προληπτική αποστολή των ομάδων συντήρησης. Επιπλέον,

αναπτύσσεται μια μέθοδος προσομοίωσης για την αξιολόγηση των μέτρων απόδοσης του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τύπους υποσυστημάτων, καθυστερήσεις και διάρκειες ενεργοποίησης της συντήρησης, περιορισμένο αριθμό ομάδων συντήρησης και επιθεώρηση του συστήματος σε διακριτό χρόνο. Επίσης, προτείνεται ένας ευρετικός αλγόριθμος αναζήτησης multi-seed tabu για την επίλυση του διατυπωμένου προβλήματος. Παρέχεται μια εφαρμογή για τον βέλτιστο σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου για να απεικονιστεί η προτεινόμενη προσέγγιση.

Στη μελέτη των (Ozturk et al., 2018) εφαρμόζεται μια μελέτη περίπτωσης σε γερμανικά αιολικά πάρκα με τη χρήση της βάσης δεδομένων του προγράμματος μέτρησης και αξιολόγησης ανέμου (WMEP), η οποία περιέχει δεδομένα βλαβών των ανεμογεννητριών που συλλέχθηκαν μεταξύ 1989 και 2008. Αυτή η προτεινόμενη μεθοδολογία αυξάνει την ακρίβεια των προβλέψεων αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας και συγκρίνει διαφορετικούς τύπους σχεδιασμού ανεμογεννητριών και εξαλείφει την υποτίμηση των επιπτώσεων των διαφορετικών καιρικών συνθηκών.

Η προληπτική συντήρηση της ανεμογεννήτριας μπορεί να βελτιώσει αποτελεσματικά την αξιοπιστία της ανεμογεννήτριας. Οι (Li et al., 2018) θέτουν αρχικά την αξιοπιστία ενός μόνο εξαρτήματος της ανεμογεννήτριας ως συνθήκη περιορισμού, το ελάχιστο μοναδιαίο κόστος συντήρησης ενός εξαρτήματος ως αντικειμενική συνάρτηση για την επίτευξη του βέλτιστου κύκλου συντήρησης και των χρόνων συντήρησης. Με βάση αυτό, επισκευάζοντας το εξάρτημα που πληροί ορισμένες προϋποθέσεις, στη συνέχεια κατασκευάζεται το μοντέλο ευκαιριακής συντήρησης της ανεμογεννήτριας. Τέλος, ορίζεται το ελάχιστο συνολικό κόστος στο πλαίσιο της ευκαιριακής συντήρησης ως αντικειμενική συνάρτηση, η διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας ως συνθήκη περιορισμού, και στη συνέχεια επιλύεται αυτό το μοντέλο για να ληφθεί το βέλτιστο κατώτατο όριο ευκαιριακής συντήρησης και το ελάχιστο συνολικό κόστος συντήρησης με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Η ανάλυση του παραδείγματος δείχνει ότι το μοντέλο μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά το συνολικό κόστος συντήρησης. Αυτή η μελέτη αποτελεί σημείο αναφοράς για το τμήμα συντήρησης για την κατάρτιση του σχεδίου συντήρησης.

Η έρευνα των (Zhou & Yin, 2019) προτείνει μια δυναμική ευκαιριακή στρατηγική συντήρησης βάσει συνθηκών για υπεράκτια αιολικά πάρκα με τη χρήση προγνωστικής ανάλυσης. Στη στρατηγική αυτή, αναπτύσσεται μια νέα βάση συντήρησης λαμβάνοντας υπόψη τον μεταβαλλόμενο χρόνο συντήρησης για τη λήψη αποφάσεων συντήρησης για διάφορα εξαρτήματα ανεμογεννητριών. Η στρατηγική λαμβάνει επίσης υπόψη την οικονομική εξάρτηση μεταξύ των ανεμογεννητριών και των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα μοντέλο συντήρησης για την εξαγωγή των βέλτιστων σχεδίων συντήρησης για διάφορα εξαρτήματα ανεμογεννητριών υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες και συνθήκες φορτίου λειτουργίας. Χρησιμοποιείται ένα αριθμητικό παράδειγμα για να καταδειχθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου συντήρησης. Διαπιστώνεται ότι ο μεταβλητός χρόνος συντήρησης έχει σημαντική επίδραση στο ετήσιο κόστος συντήρησης, γεγονός που αποδεικνύει τη λογική να εφαρμοστεί η προτεινόμενη βάση συντήρησης.

Στη μελέτη των (Koukoura et al., 2021) εξετάζονται οι περιορισμοί πρόσβασης για υπεράκτιες δραστηριότητες μέσω ενός πιθανοτικού μοντέλου που προσομοιώνει την ύπαρξη διαφορετικών συστημάτων παρακολούθησης της κατάστασης σε υπεράκτιες ανεμογεννήτριες στο πεδίο του χρόνου. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης ποσοτικοποιούν τη θετική επίδραση που έχει στη διαθεσιμότητα ένας μεγαλύτερος χρόνος προειδοποίησης της δυνητικής-προς-λειτουργικής αστοχίας, υπογραμμίζοντας ότι η διαφοροποίηση της στρατηγικής συντήρησης μέσω της μετατροπής των μη προγραμματισμένων δραστηριοτήτων σε προγραμματισμένες παρεμβάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν κατά τη διάρκεια ενός κατάλληλου καιρικού παραθύρου πριν από την αστοχία ενός εξαρτήματος μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Οι (Li et al., 2021) προτείνει μια στρατηγική συντήρησης για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ενσωματώνει τρεις τύπους ευκαιριών συντήρησης. Εκτός από τις ευκαιρίες συντήρησης που δημιουργούνται από βλάβες, εισάγεται μια ευκαιρία με βάση την ηλικία για τη βέλτιστη προληπτική συντήρηση. Παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής.

Η μελέτη των (Koutras et al., 2017) δεν αφορά ανεμογεννήτριες, αλλά ένα γενικό μοντέλο που μπορεί να εφαρμοστεί και στις ανεμογεννήτριες. Ειδικότερα, παρουσιάζεται και αναλύεται εκτενώς ένα γενικευμένου μοντέλο για συστήματα πολλαπλών καταστάσεων που υποβαθμίζονται με προληπτική συντήρηση βάσει κατάστασης. Το σύστημα υφίσταται διάφορα επίπεδα φθοράς και σε κάθε στάδιο πραγματοποιείται επιθεώρηση σε σταθερά χρονικά διαστήματα προκειμένου να προσδιοριστεί τι είδους προληπτική συντήρηση, πρέπει να υποβληθεί το σύστημα. Όταν το σύστημα αστοχεί, παρά την προληπτική συντήρηση, εκτελείται μια διαδικασία επισκευής και το σύστημα επανέρχεται στην αρχική πλήρως λειτουργική του κατάσταση. Το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει επίσης την ατελή συντήρηση, είτε ελάχιστη είτε μείζονα, την αποτυχημένη συντήρηση και τις αιφνίδιες βλάβες που μπορεί να εμφανιστούν κυρίως λόγω εξωτερικών παραγόντων σε οποιαδήποτε κατάσταση φθοράς. Επιπλέον, οι χρόνοι παραμονής θεωρούνται γενικά κατανομημένοι. Υπολογίζονται τα κύρια μέτρα αξιοπιστίας και απόδοσης του προτεινόμενου μοντέλου, ενώ τα αντίστοιχα μεταβατικά μέτρα εκτιμώνται με προσομοίωση Monte Carlo. Ο απώτερος στόχος είναι να διακριθούν πολιτικές επιθεώρησης και κατά συνέπεια συντήρησης που βελτιστοποιούν την αξιοπιστία ή/και την απόδοση του συστήματος με πολλαπλές καταστάσεις φθοράς. Επιπλέον, διατυπώνονται και επιλύονται προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων προκειμένου να διακριθούν πολιτικές προληπτικής συντήρησης που βελτιστοποιούν ταυτόχρονα τόσο τα μέτρα αξιοπιστίας όσο και τα μέτρα απόδοσης.

Συνδυάζοντας την παραπάνω βιβλιογραφία, η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως στόχο τη μοντελοποίηση της λειτουργίας κάθε υποσυστήματος, με βάση τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται και η διερεύνηση του κατά πόσο η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, όταν αυτό είναι εφικτό και συμφέρον, μπορεί να βελτιώσει τη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος του κάθε υποσυστήματος και κατ' επέκταση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας. Βασικό μέρος της εργασίας, είναι το γεγονός ότι για κάθε υποσύστημα, θα κατασκευαστεί ένα μοντέλο που δεν θα υιοθετεί την ευκαιριακή συντήρηση, καθώς και ένα μοντέλο στο οποίο θα εφαρμόζεται η ευκαιριακή συντήρηση, και θα συγκρίνεται τόσο η διαθεσιμότητα όσο και το λειτουργικό κόστος τους, με σκοπό να διαπιστωθεί το κατά

πόσο η ευκαιριακή συντήρηση ωφελεί το κάθε υποσύστημα και γενικότερα την ανεμογεννήτρια. Η Διπλωματική Εργασία θα παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή ή όχι ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε ένα από τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας.

2. Στοχαστικές Ανελίξεις

Η θεωρία των Στοχαστικών Ανελίξεων ασχολείται με τη μελέτη της δομής οικογενειών τυχαίων μεταβλητών X_t , όπου $t \in T$. Το σύνολο T καλείται δεικτοσύνη και συνήθως αναπαριστά χρόνο. Διακρίνουμε δύο κατηγορίες στοχαστικών ανελίξεων:

- 1) Αν $T = \{0, 1, 2, \dots\}$, τότε η στοχαστική ανέλιξη X_t , $t \geq 0$ θα καλείται διακριτού χρόνου και
- 2) Αν $T = [0, \infty)$, τότε η στοχαστική ανέλιξη $\{X(t), t \geq 0\}$ θα καλείται συνεχούς χρόνου.

Στην πραγματικότητα μια στοχαστική ανέλιξη είναι συνάρτηση της παραμέτρου $t \in T$ και του δειγματικού σημείου $\omega \in \Omega$, όπου Ω ο δειγματικός χώρος για κάθε X_t (όλες οι δυνατές τιμές κάθε X_t). Είναι δηλαδή $X(t) = X(\omega, t)$, $\omega \in \Omega$, $t \in T$. Για κάθε t σταθερό η $X(\cdot, t)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή, ενώ για κάθε ω σταθερό η $X(\omega, \cdot)$ είναι μια συνάρτηση του t , που καλείται πραγματοποίηση ή δειγματοσυνάρτηση της στοχαστικής ανέλιξης $\{X(t), t \geq 0\}$.

Για το δειγματικό χώρο Ω διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις:

- 1) $\Omega = \{0, 1, \dots\}$ και η στοχαστική ανέλιξη καλείται διακριτού χώρου καταστάσεων
- 2) $\Omega = \{-\infty, \infty\}$ και η στοχαστική ανέλιξη καλείται συνεχούς χώρου καταστάσεων (Χρυσάφινου, 2016).

2.1 Μαρκοβιανές Διαδικασίες

Οι Μαρκοβιανές διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των συστημάτων σε σχέση με το χρόνο, παρατηρώντας είτε συνεχώς στο χρόνο είτε κοιτάζοντας σε διακριτές χρονικές στιγμές και το χώρο. Οι Μαρκοβιανές διαδικασίες είναι στοχαστικές ανελίξεις στις οποίες η συμπεριφορά των συστημάτων χαρακτηρίζεται από έλλειψη μνήμης δηλαδή οι μελλοντικές καταστάσεις του συστήματος είναι ανεξάρτητες από όλες τις καταστάσεις του παρελθόντος εκτός από την ακριβώς προηγούμενη. Επομένως, η μελλοντική τυχαία συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται μόνο από την παρούσα

θέση και όχι από τις θέσεις του παρελθόντος ή τον τρόπο με τον οποίο έφθασε στην παρούσα θέση. Επιπρόσθετα, η ανάλυση μπορεί να είναι στάσιμη δηλαδή η κατανομή πιθανότητας των καταστάσεων να παραμένει χρονικά αναλλοίωτη και ίση με π (ορίζουμε τη στάσιμη κατανομή παρακάτω). Από τις δύο αυτές προϋποθέσεις (στασιμότητα και έλλειψη μνήμης) είναι φανερό ότι η στοχαστική διαδικασία Markov μπορεί να εφαρμοστεί στα συστήματα των οποίων η λειτουργία περιγράφεται από συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας με σταθερό ρυθμό βλάβης δηλαδή από τις κατανομές Poisson και εκθετική. Οι ανελίξεις οι οποίες δεν μπορούν να αναλυθούν από τη μεθοδολογία Markov καλούνται μη Markovιανές ανελίξεις και μπορούν να προσομοιωθούν με μια επέκτασή της η οποία καλείται μέθοδος των φάσεων (σταδίων) (Διαλυνάς, 2016), αλλά και από άλλες στοχαστικές ανελίξεις.

Στη γενική περίπτωση της Markovιανής μεθοδολογίας οι παράμετροι του χρόνου και του χώρου μπορούν να είναι διακριτές ή συνεχείς. Στην ειδική περίπτωση του υπολογισμού της αξιοπιστίας λειτουργίας συστημάτων ο χώρος συνήθως παρίσταται σαν μια διακριτή συνάρτηση διότι αναπαριστά τις διακριτές και αναγνωρίσιμες καταστάσεις στις οποίες τα στοιχεία μπορούν να παραμένουν, ενώ ο χρόνος μπορεί να είναι διακριτός ή συνεχής (Διαλυνάς, 2016).

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μας ενδιαφέρει ο συνεχής χρόνος, διακριτός χώρος καταστάσεων και η ασυμπτωτική συμπεριφορά, τα οποία θα συντελέσουν στον υπολογισμό των μέτρων αξιοπιστίας κάθε υποσυστήματος της ανεμογεννήτριας. Έχουμε υποθέσει ότι η ο χρόνος παραμονής σε κάθε πιθανή κατάσταση, για κάθε υποσύστημα, ακολουθεί την εκθετική κατανομή.

2.1.1 Μαρκovιανές Αλυσίδες Διακριτού Χρόνου (ΜΑΔΧ)

Μαρκovιανή διαδικασία είναι κάθε στοχαστική διαδικασία $\{X(t): t \in \mathbf{T}\}$ με την ιδιότητα ότι, δεδομένης της τιμής της τυχαίας μεταβλητής $X(t)$ (παρόν), οι τυχαίες μεταβλητές $\{X(u): u > t\}$ (μέλλον) είναι στοχαστικά ανεξάρτητες από τις τυχαίες μεταβλητές $\{X(s): s < t\}$ (παρελθόν) και αυτό για κάθε χρονική στιγμή $t \in \mathbf{T}$. Έτσι οι Μαρκovιανές διαδικασίες αποτελούν κατάλληλα *στοχαστικά μοντέλα* για την περιγραφή και μελέτη στοχαστικών συστημάτων, η μελλοντική εξέλιξη των οποίων εξαρτάται αποκλειστικά από την παρούσα κατάσταση τους κάθε φορά και όχι από τη συγκεκριμένη παρελθούσα ιστορία τους. Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται ως

Μαρκοβιανή ιδιότητα από το όνομα του Ρώσου μαθηματικού A.A. Markov (1856-1922), ο οποίος πρώτος εισήγαγε την αντίστοιχη έννοια, γενικεύοντας έτσι την έννοια της ανεξαρτησίας σε μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών. Οι Μαρκοβιανές διαδικασίες με διακριτό (πεπερασμένο) χώρο καταστάσεων αναφέρονται ειδικότερα ως *Μαρκοβιανές αλυσίδες*. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτύξουμε τη γενική θεωρία των Μαρκοβιανών αλυσίδων διακριτού χρόνου όπου $T = \mathbb{N}_0$, οπότε και θα χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $\{X_n: n \in \mathbb{N}_0\}$ ή για συντομία τον συμβολισμό $\{X_n\}$.

Ορισμός 1: Μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $\{X_n: n \in \mathbb{N}_0\}$, με διακριτό χώρο καταστάσεων S , λέγεται *Μαρκοβιανή αλυσίδα* αν και μόνο αν αυτή έχει τη Μαρκοβιανή ιδιότητα:

$$P(X_{n+1} = j | X_0, X_1, \dots, X_n) = P(X_{n+1} = j | X_n) \quad (n \in \mathbb{N}, j \in S) \quad (1.1)$$

Ισοδύναμα, η $\{X_n\}$ είναι Μαρκοβιανή αλυσίδα αν και μόνο αν δεδομένης της τιμής της τυχαίας μεταβλητής X_n , η τ.μ. X_{n+1} είναι στοχαστικά ανεξάρτητη από τις τ.μ. X_0, X_1, \dots, X_{n-1} και αυτό για κάθε $n \in \mathbb{N}$ (Φακίνος, 2007).

Η δεσμευμένη πιθανότητα $P(X_{n+1} = j | X_n = i)$ λέγεται *πιθανότητα μετάβασης (πρώτης τάξης)* από την κατάσταση i στην κατάσταση j στο $(n + 1)$ – οστό βήμα και συμβολίζεται με $p_{ij}(n, n + 1)$. Ο συμβολισμός δηλώνει το γεγονός ότι γενικά οι πιθανότητες μετάβασης είναι συναρτήσεις όχι μόνο των καταστάσεων i, j αλλά και της χρονικής στιγμής (βήματος) κατά την οποία γίνεται η μετάβαση. Όταν οι πιθανότητες αυτές είναι *στάσιμες*, δηλαδή ανεξάρτητες του βήματος, τότε έχουμε τον συμβολισμό, για κάθε $n \in \mathbb{N}$,

$$p_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_1 = j | X_0 = i) \quad (i, j \in S) \quad (1.2)$$

και η $\{X_n\}$ λέγεται *χρονικά ομογενής* (Φακίνος, 2007).

Οι χρονικά ομογενής Μαρκοβιανές αλυσίδες διακριτού χρόνου αναφέρονται απλά ως Μαρκοβιανές αλυσίδες. Επίσης, ως χώρο καταστάσεων S θεωρούμε συνήθως το \mathbb{N}_0 , ή ένα πεπερασμένο υποσύνολό του οπότε και η Μαρκοβιανή αλυσίδα αναφέρεται ως *πεπερασμένη*.

Οι πιθανότητες μετάβασης γράφονται συνοπτικά με τη μορφή της πίνακα

$$\mathbb{P} = p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \cdots \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \cdots \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \quad (1.3)$$

ο οποίος λέγεται *πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης (πρώτης τάξης)*. Επειδή η i γραμμή του \mathbb{P} είναι η δεσμευμένη συνάρτηση πιθανότητας ($p_{ij}, j \in S$) της τ.μ. X_{n+1} δοθέντος ότι $X_n = i$ (συμβολικά $(X_{n+1} | X_n = i)$), ο \mathbb{P} είναι ένας τετραγωνικός πίνακας μη αρνητικών στοιχείων όπου το άθροισμα των στοιχείων κάθε γραμμής του είναι ίσο με τη μονάδα. Τέτοιοι πίνακες αναφέρονται ως *στοχαστικοί πίνακες* (Φακίνος, 2007).

Μια Μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X_n\}$ είναι *πλήρως ορισμένη* όταν δίνεται ο πίνακας \mathbb{P} και η *αρχική κατανομή*, δηλαδή η συνάρτηση πιθανότητας

$$p_i^{(0)} = P(X_0 = i) \quad (i \in S), \quad (1.4)$$

της αρχικής τυχαίας μεταβλητής X_0 . Πράγματι τότε, από τον ορισμό της δεσμευμένης πιθανότητας σε συνδυασμό με τη Μαρκοβιανή ιδιότητα, για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και $i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i_n \in S$ έχουμε ότι

$$\begin{aligned} P(X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}, X_n = i_n) \\ &= P(X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}) \\ &\cdot P(X_n = i_n | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}) \\ &= P(X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}) \cdot p_{i_{n-1}i_n} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Έτσι, όταν ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης και η αρχική κατανομή είναι γνωστά, τότε προσδιορίζεται η πιθανότητα οποιασδήποτε πεπερασμένης πραγματοποίησης $(i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i_n)$ και επομένως η χρονική εξέλιξη της Μαρκοβιανής αλυσίδας είναι από πιθανό θεωρητικής άποψης γνωστή (Φακίνος, 2007).

Έστω $\{X_n: n \in \mathbb{N}_0\}$ μια Μαρκοβιανή αλυσίδα με χώρο καταστάσεις S και πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης \mathbb{P} . Γενικά, η μεταβατική κατανομή $\{\mathbf{p}^{(n)}: n \in \mathbb{N}_0\}$ της $\{X_n: n \in \mathbb{N}_0\}$ είναι συνάρτηση τόσο της αρχικής κατανομής $\mathbf{p}^{(0)}$ όσο και της ακολουθίας $\mathbb{P}^{(n)}$, ($n \in \mathbb{N}$), λόγω της σχέσης

$$\mathbf{p}^{(n)} = \mathbf{p}^{(0)} \cdot \mathbb{P}^{(n)} = \mathbf{p}^{(0)} \cdot \mathbb{P}^n, \quad (n \in \mathbb{N}_0) \quad (1.6)$$

και επομένως ο τύπος της $\mathbf{p}^{(n)}$ εξαρτάται από το (συγκεκριμένο κάθε φορά) $n \in \mathbb{N}$. Όμως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις συμβαίνει η $\{\mathbf{p}^{(n)}\}$ να είναι σταθερή, ανεξάρτητη του n , και τότε λέμε ότι η $\{X_n\}$ δεν επιδεικνύει μεταβατική αλλά *στάσιμη* *στοχαστική συμπεριφορά*. Αυτό συμβαίνει όταν ως αρχική κατανομή επιλέξουμε μια, όπως ονομάζεται, *στάσιμη κατανομή* $\boldsymbol{\pi}$, δηλαδή όταν $\mathbf{p}^{(0)} = \boldsymbol{\pi}$, όπου η συνάρτηση πιθανότητας $\boldsymbol{\pi} = (\pi_i, i \in S)$ έχει την ιδιότητα

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbb{P}. \quad (1.7)$$

Τότε

$$\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbb{P}^2 = (\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbb{P}) \cdot \mathbb{P} = \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbb{P} = \boldsymbol{\pi},$$

και επαγωγικά

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbb{P}^n, \quad (n \in \mathbb{N}). \quad (1.8)$$

Έτσι, αν $\mathbf{p}^{(0)} = \boldsymbol{\pi}$, τότε λόγω της (1.6) σε συνδυασμό με την (1.8),

$$\mathbf{p}^{(n)} = \boldsymbol{\pi}, \quad (n \in \mathbb{N}_0), \quad (1.9)$$

δηλαδή η $\{X_n\}$ έχει *στάσιμη* (ανεξάρτητη του χρόνου) *μεταβατική κατανομή*. Πιο γενικά, για κάθε $(k, n \in \mathbb{N})$ και $i_0, i_1, \dots, i_n \in S$, είναι τότε

$$\begin{aligned} P(X_k = i_0, X_{k+1} = i_1, \dots, X_{k+n} = i_{n-1}) &= p_{i_0}^{(k)} \cdot p_{i_0 i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_{n-1} i_n} \\ &= \pi_{i_0} \cdot p_{i_0 i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_{n-1} i_n} \\ &= P(X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_n = i_n), \end{aligned} \quad (1.10)$$

δηλαδή οι $\{X_n: n \in \mathbb{N}_0\}$ και $\{X_{k+n}: n \in \mathbb{N}_0\}$ είναι *στοχαστικά ισοδύναμες*. Επομένως, επιλέγοντας ως αρχική κατανομή την $\boldsymbol{\pi}$, η $\{X_n\}$ γίνεται μια *στάσιμη στοχαστική διαδικασία* ή, όπως λέμε, η $\{X_n\}$ βρίσκεται σε *κατάσταση στατιστικής ισορροπίας* (Φακίνος, 2007).

Η σχέση (1.7) γράφεται αναλυτικά ως

$$\pi_j = \sum_i \pi_i p_{ij}, \quad (j \in S), \quad (1.11)$$

και επειδή η π είναι συνάρτηση πιθανότητας, ισχύει και η σχέση

$$\sum_j \pi_j = 1. \quad (1.12)$$

Ορισμός 2: Κάθε μη αρνητική λύση του συστήματος των εξισώσεων (1.11), (1.12) αναφέρεται ως μια *στάσιμη κατανομή* της αντίστοιχης Μαρκοβιανής αλυσίδας. Για δεδομένο j , η (1.11) αναφέρεται ως *εξίσωση ισορροπίας* για την κατάσταση j . Η (1.12) λέγεται *εξίσωση κανονικοποίησης* (Φακίνος, 2007).

Φυσικά κάθε μη αρνητική λύση της (1.11) που το άθροισμα της είναι πεπερασμένος αριθμός μπορεί να *κανονικοποιηθεί*, δηλαδή να διαιρεθεί με το αντίστοιχο άθροισμα, ώστε να δώσει μια στάσιμη κατανομή. Στην περίπτωση μη πεπερασμένης Μαρκοβιανής αλυσίδας τέτοιες λύσεις μπορεί να μην υπάρχουν οπότε και δεν υπάρχει στάσιμη κατανομή. Τέλος, μια Μαρκοβιανή αλυσίδα μπορεί να έχει περισσότερες από μία στάσιμες κατανομές και τότε έχει άπειρες αφού είναι φανερό ότι κάθε κυρτός συνδυασμός αυτών παράγει επίσης μια στάσιμη κατανομή (Φακίνος, 2007).

2.1.2 Μαρκοβιανές Αλυσίδες Συνεχούς Χρόνου (ΜΑΣΧ)

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτύξουμε τη γενική θεωρία των *Μαρκοβιανών αλυσίδων συνεχούς χρόνου*, δηλαδή των Μαρκοβιανών διαδικασιών με διακριτό χώρο καταστάσεων και συνεχή παραμετρικό χώρο. Υποθέτοντας ότι ο τελευταίος είναι το σύνολο \mathbb{R}_0^+ , θα χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $\{X(t): t \geq 0\}$ ή για συντομία τον συμβολισμό $\{X(t)\}$ για την αντίστοιχη στοχαστική διαδικασία. Εδώ μετάβαση από μια κατάσταση σε άλλη είναι δυνατή σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και επομένως ο χρόνος παραμονής σε δεδομένη κατάσταση μπορεί να είναι *οσοδήποτε μικρός*. Λόγω αυτού του γεγονότος υπάρχουν Μαρκοβιανές αλυσίδες συνεχούς χρόνου οι οποίες επιδεικνύουν αρκετά ιδιαίτερα στοχαστική συμπεριφορά, όπως μηδενικό χρόνο παραμονής σε κάποιες καταστάσεις είτε άπειρο πλήθος μεταβάσεων μέσα σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Καθώς όμως τέτοιες

περιπτώσεις έχουν θεωρητικό μάλλον παρά πρακτικό ενδιαφέρον, αυτές δε θα μας απασχολήσουν (Φακίνος, 2007).

Ορισμός 3: Μια στοχαστική διαδικασία $\{X(t): t \geq 0\}$, με διακριτό χώρο καταστάσεων S , λέγεται *Μαρκοβιανή αλυσίδα* αν και μόνο αν αυτή έχει τη Μαρκοβιανή ιδιότητα:

$$\begin{aligned} P(X(s+t) = j \mid X(u), 0 \leq u \leq s) \\ = P(X(s+t) = j \mid X(s)), \quad (s, t \geq 0, j \in S). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Ισοδύναμα, η $\{X(t)\}$ είναι Μαρκοβιανή αλυσίδα αν και μόνο αν δεδομένης της τ.μ. $X(t)$, οι τ.μ. $\{X(u): u < t\}$ και οι τ.μ. $\{X(v): v > t\}$ είναι στοχαστικά ανεξάρτητες και αυτό για κάθε $t > 0$ (Φακίνος, 2007).

Η δεσμευμένη πιθανότητα $P(X(s+t) = j \mid X(s) = i)$ λέγεται *πιθανότητα μετάβασης* από την κατάσταση i τη χρονική στιγμή s , στην κατάσταση j τη χρονική στιγμή $s+t$ και συμβολίζεται με $p_{ij}(s, s+t)$. Όταν οι πιθανότητες αυτές είναι *στάσιμες*, δηλαδή εξαρτώνται από το διάστημα $[s, s+t]$ μόνο μέσω του μήκους του t και όχι από τα συγκεκριμένα άκρα του, τότε έχουμε τον συμβολισμό, για κάθε $s > 0$,

$$\begin{aligned} p_{ij}(t) = P(X(s+t) = j \mid X(s) = i) \\ = P(X(t) = j \mid X(0) = i), \quad (i, j \in S, t \geq 0), \end{aligned} \quad (1.14)$$

και η $\{X(t)\}$ λέγεται *χρονικά ομογενής* (Φακίνος, 2007).

Θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με χρονικά ομογενής Μαρκοβιανές αλυσίδες συνεχούς χρόνου, οι οποίες θα αναφέρονται απλά ως Μαρκοβιανές αλυσίδες. Επίσης ως χώρο καταστάσεων S θα θεωρούμε το \mathbb{N}_0 , ή ένα πεπερασμένο υποσύνολό του οπότε και η Μαρκοβιανή αλυσίδα θα αναφέρεται ως *πεπερασμένη* (Φακίνος, 2007).

Για δεδομένα $i, j \in S$, η $p_{ij}(t)$ θεωρούμενη ως συνάρτηση του χρόνου $t \geq 0$, λέγεται *συνάρτηση πιθανότητας μετάβασης*. Οι $p_{ij}(t)$, $(i, j \in S)$ γράφονται σε συμπαγή μορφή ως στοιχεία ενός πίνακα (οικογένειας πινάκων),

$$\mathbb{P}(t) = (p_{ij}(t)) = \begin{pmatrix} p_{00}(t) & p_{01}(t) & p_{02}(t) & \cdots \\ p_{10}(t) & p_{11}(t) & p_{12}(t) & \cdots \\ p_{20}(t) & p_{21}(t) & p_{22}(t) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \quad (1.15)$$

ο οποίος λέγεται πίνακας συναρτήσεων πιθανοτήτων μετάβασης (Φακίνος, 2007).

Μια Μαρκοβιανή αλυσίδα $\{X(t)\}$ είναι πλήρως ορισμένη όταν δίνεται ο πίνακας $\mathbb{P}(t)$, ($t \geq 0$) και η αρχική κατανομή, δηλαδή η συνάρτηση πιθανότητας

$$p_i(0) = P(X(0) = i), \quad (i \in S), \quad (1.16)$$

της αρχικής τυχαίας μεταβλητής $X(0)$. Πράγματι τότε, από τον ορισμό της δεσμευμένης πιθανότητας σε συνδυασμό Μαρκοβιανή ιδιότητα, για κάθε $n \in \mathbb{N}$, $i_0, i_1, i_2, \dots, i_{n-1}, i_n \in S$ και $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$, αποδεικνύεται, όπως ακριβώς και στην περίπτωση διακριτού χρόνου, ότι ισχύει η σχέση (Φακίνος, 2007):

$$\begin{aligned} P(X(0) = i_0, X(t_1) = i_1, X(t_2) = i_2, \dots, X(t_n) = i_n) \\ = p_{i_0}(0) \cdot p_{i_0 i_1}(t_1) \cdot p_{i_1 i_2}(t_2 - t_1) \cdot \dots \\ \cdot p_{i_{n-1} i_n}(t_n - t_{n-1}) . \end{aligned} \quad (1.17)$$

Υποθέτουμε ότι

$$p_{ij}(0) = \begin{cases} 1, & \text{αν } i = j \\ 0, & \text{διαφορ.} \end{cases}, \quad (i, j \in S), \quad (1.18)$$

και ότι οι συναρτήσεις $p_{ij}(t)$ είναι δεξιά συνεχείς στο 0, δηλαδή (Φακίνος, 2007) :

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} p_{ij}(h) = p_{ij}(0), \quad (i, j \in S). \quad (1.19)$$

Αποδεικνύεται τότε ότι οι συναρτήσεις $p_{ij}(t)$, ($t \geq 0$) είναι παραγωγίσιμες στο διάστημα $(0, \infty)$ και επιπλέον ότι υπάρχει η δεξιά παράγωγός τους στο 0, και έστω

$$a_{ij} = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{p_{ij}(h) - p_{ij}(0)}{h} = p'_{ij}(0), \quad (i, j \in S, \quad i \neq j), \quad (1.20)$$

$$a_i = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1 - p_{ii}(h)}{h} = -p'_{ii}(0), \quad (i \in S). \quad (1.21)$$

Οι ποσότητες αυτές ικανοποιούν τις σχέσεις (Φακίνος, 2007):

$$0 \leq a_{ij} < \infty, \quad 0 \leq a_i \leq \infty, \quad a_i \geq \sum_{j \neq i} a_{ij}. \quad (1.22)$$

Σε ότι ακολουθεί θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με Μαρκοβιανές αλυσίδες για τις οποίες επιπλέον ισχύει ότι

$$a_i = \sum_{j \neq i} a_{ij} < \infty, \quad (i \in S), \quad (1.23)$$

αποκλείοντας έτσι την περίπτωση των λεγόμενων *στιγμιαίων καταστάσεων* i ($a_i = \infty$). Τέτοιες Μαρκοβιανές αλυσίδες λέγονται *γνήσια κλιμακωτές* και για αυτές αποδεικνύεται ότι ισχύει η λεγόμενη *ισχυρή Μαρκοβιανή ιδιότητα*. Αυτή ορίζεται από τη σχέση (1.13) όταν ο συγκεκριμένος χρόνος s αντικατασταθεί από μια μη-αρνητική τυχαία μεταβλητή Σ η οποία είναι *χρόνος Markov* για την $\{X(t)\}$. Ας σημειωθεί ότι οι Μαρκοβιανές αλυσίδες διακριτού χρόνου έχουν πάντοτε την ισχυρή Μαρκοβιανή ιδιότητα. Με τον όρο Μαρκοβιανή αλυσίδα θα εννοούμε μια *χρονικά ομογενή, γνήσια κλιμακωτή Μαρκοβιανή αλυσίδα συνεχούς χρόνου* (Φακίνος, 2007).

Οι $p_{ij}(h)$ για h πολύ μικρό (απειροστό) θετικό αριθμό, λέγονται *απειροστές πιθανότητες μετάβασης* και η σημασία τους στη μελέτη των Μαρκοβιανών αλυσίδων συνεχούς χρόνου είναι ανάλογη με εκείνη των πιθανοτήτων μετάβασης p_{ij} στις Μαρκοβιανές αλυσίδες διακριτού χρόνου (Φακίνος, 2007).

Η σχέση (1.20) εκφράζει το γεγονός ότι η απειροστή πιθανότητα μετάβασης $p_{ij}(h)$ είναι ουσιαστικά ανάλογη της ποσότητας a_{ij} , η οποία λέγεται *ρυθμός μετάβασης* από την κατάσταση i στην κατάσταση j . Οι ρυθμοί μετάβασης γράφονται συνοπτικά με τη μορφή ενός πίνακα

$$\mathbf{A} = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} -a_0 & a_{01} & a_{02} & \dots \\ a_{10} & -a_1 & a_{12} & \dots \\ a_{20} & a_{21} & -a_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{pmatrix} \quad (1.24)$$

που αναφέρεται ως πίνακας ρυθμών μετάβασης. Επειδή

$$a_{ii} = -a_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}, \quad (i \in S), \quad (1.25)$$

το άθροισμα των στοιχείων κάθε γραμμής του A είναι ίσο με 0 (Φακίνος, 2007).

Κατά αντιστοιχία με το διάγραμμα πιθανοτήτων μετάβασης, στην περίπτωση συνεχούς χρόνου για καλύτερη εποπτεία ορίζουμε το λεγόμενο *διάγραμμα ρυθμών μετάβασης*. Αυτό είναι ένα δίκτυο, οι κορυφές του οποίου αντιστοιχούν στις καταστάσεις, ενώ οι δυνατές μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων σημειώνονται με βέλη δίπλα στα οποία αναγράφονται οι αντίστοιχοι ρυθμοί μετάβασης (Φακίνος, 2007).

Κάθε μη αρνητική λύση του συστήματος των εξισώσεων (1.26), (1.27):

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{p} = (p_j, j \in S) \quad (1.26)$$

$$\sum_i p_j = 1, \quad (1.27)$$

αναφέρεται ως μια *στάσιμη κατανομή* της αντίστοιχης Μαρκοβιανής αλυσίδας. Για δεδομένο j , η (1.26) αναφέρεται ως *εξίσωση ισορροπίας* για την κατάσταση j . Η (1.27) λέγεται *εξίσωση κανονικοποίησης* (Φακίνος, 2007).

Αποδεικνύεται ότι αν $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}$, μια στάσιμη κατανομή, τότε και $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}$, ($t \geq 0$), δηλαδή η $\{X(t)\}$ έχει στάσιμη (ανεξάρτητη του χρόνου) μεταβατική κατανομή. Πιο γενικά, για κάθε $n \in \mathbb{N}$, $i_0, i_1, i_2, \dots, i_n \in S$, $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$, $\tau > 0$, είναι τότε

$$\begin{aligned} P(X(\tau) = i_0, X(\tau + t_1) = i_1, \dots, X(\tau + t_n) = i_n) \\ &= p_{i_0}(\tau) \cdot p_{i_0 i_1}(t_1) \cdot p_{i_1 i_2}(t_2 - t_1) \cdot \dots \cdot p_{i_{n-1} i_n}(t_n - t_{n-1}) \\ &= p_{i_0} \cdot p_{i_0 i_1}(t_1) \cdot p_{i_1 i_2}(t_2 - t_1) \cdot \dots \cdot p_{i_{n-1} i_n}(t_n - t_{n-1}) \\ &= P(X(0) = i_0, X(t_1) = i_1, \dots, X(t_n) = i_n), \end{aligned} \quad (1.28)$$

δηλαδή οι $\{X(t): t \geq 0\}$ και $\{X(\tau + t): t \geq 0\}$ είναι στοχαστικά ισοδύναμες για κάθε $\tau > 0$. Επομένως επιλέγοντας ως αρχική κατανομή μία στάσιμη κατανομή, η $\{X(t)\}$

γίνεται μια στάσιμη στοχαστική διαδικασία ή η $\{X(t)\}$ βρίσκεται σε κατάσταση στατιστικής ισορροπίας (Φακίνος, 2007).

3. Μοντελοποίηση της λειτουργίας των κύριων υποσυστημάτων μιας ανεμογεννήτριας

3.1 Κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να βρίσκονται στην ξηρά (onshore) ή στη θάλασσα (offshore). Κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα σχημάτων και μεγεθών, αλλά ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός είναι αυτός με τρία πτερύγια τοποθετημένα σε οριζόντιο άξονα (WindEurope, 2023). Η χερσαία αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στην ξηρά και κινούνται χάρη στη φυσική κίνηση του αέρα. Παρατηρούνται συχνά χερσαία αιολικά πάρκα σε χωράφια ή σε πιο αγροτικές περιοχές, καθώς συνήθως κατασκευάζονται σε λιγότερο κατοικημένες περιοχές, όπου τα κτίρια και τα εμπόδια δε διακόπτουν τον αέρα. Όσο για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο που πνέει κατά μήκος της θάλασσας. Θεωρούνται πιο αποδοτικά από τα χερσαία αιολικά πάρκα, χάρη στην υψηλότερη ταχύτητα των ανέμων, τη μεγαλύτερη συνοχή και την έλλειψη φυσικών παρεμβολών που μπορεί να παρουσιάσει η ξηρά ή τα ανθρωπογενή αντικείμενα (Nationalgrid, 2022).

Τα κύρια υποσυστήματα που απαρτίζουν μια ανεμογεννήτρια είναι: το σύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain), το υδραυλικό σύστημα (hydraulic system), σύστημα πέδησης (brake system), το σύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system), το σύστημα περιστροφής των πτερυγίων (pitch system), το σύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub), τα πτερύγια (blades), το ηλεκτρικό σύστημα (power system), και τέλος η δομή (structure) (B. Le and J. Andrews, 2016).

3.2 Μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων με εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης

Θεωρώντας ότι τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας είναι συνδεδεμένα σε σειρά και πως κάθε υποσύστημα αποτελείται από κάποια συγκεκριμένα στοιχεία (components) τα οποία μπορεί να λειτουργούν τέλεια, μπορεί να υπολειτουργούν, μπορεί να συντηρούνται ή ακόμα και να υπόκεινται σε βλάβη, και υποθέτοντας ότι ο

χρόνος παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις, για κάθε στοιχείο του εκάστοτε υποσυστήματος, είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή, η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος μοντελοποιείται με τη χρήση μιας Μαρκοβιανής διαδικασίας συνεχούς χρόνου. Ακολούθως, υπολογίζεται η ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας για κάθε πιθανή κατάσταση κάθε υποσυστήματος. Θα υιοθετηθεί η πολιτική της ευκαιριακής συντήρησης στα κύρια υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας, όπου αυτό είναι εφικτό. Ειδικότερα, όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που μια ανεμογεννήτρια βρίσκεται εκτός λειτουργίας, προτείνεται να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα ενέργειες συντήρησης σε στοιχεία των υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας που λειτουργούν σε υποβαθμισμένη κατάσταση αν και μόνο αν η διάρκεια συντήρησης του στοιχείου που θα επιλεγεί να συντηρηθεί είναι μικρότερη από τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης του στοιχείου που βρίσκεται ήδη εκτός λειτουργίας (Li et al., 2021). Σκοπός μιας τέτοιας πολιτικής είναι μόλις ολοκληρωθεί τόσο η διαδικασία αποκατάστασης της βλάβης όσο και η ευκαιριακή συντήρηση, η ανεμογεννήτρια να βρεθεί σε καλύτερη κατάσταση από την κατάσταση που θα βρισκόταν αν γινόταν μόνο η αποκατάσταση της βλάβης.

3.2.1 Υποσύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain)

Το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain) αποτελείται από τρία στοιχεία (components), τα κύρια ρουλεμάν (main bearings), το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox) και τους κύριους άξονες (main shafts). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία (components) μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας (normal working condition), σε υποβαθμισμένη κατάσταση (degraded condition), σε κατάσταση συντήρησης (maintenance condition) και σε κατάσταση μη-λειτουργίας (failure condition).

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 , λ_2 και λ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση των κύριων ρουλεμάν (DB), του κιβώτιου ταχυτήτων (DG) και των κύριων αξόνων (DS) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FB,FG,FS) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} , λ_{2s} και λ_{3s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας των κύριων ρουλεμάν (UB), του κιβώτιου ταχυτήτων (UG) και των κύριων αξόνων (US) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FB,FG,FS)

αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης (sudden failure). Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} , λ_{2d} και λ_{3d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας των κύριων ρουλεμάν (UB), του κιβώτιου ταχυτήτων (UG) και των κύριων αξόνων (US) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DB, DG, DS) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 , μ_2 και μ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας των κύριων ρουλεμάν (FB), του κιβώτιου ταχυτήτων (FG) και των κύριων αξόνων (FS) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UB, UG, US) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και μ_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας των κύριων ρουλεμάν (MB), του κιβώτιου ταχυτήτων (MG) και των κύριων αξόνων (MS) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UB, UG, US) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι ρυθμοί συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση των κύριων ρουλεμάν (DB), του κιβώτιου ταχυτήτων (DG) και των κύριων αξόνων (DS) σε μια κατάσταση συντήρησης (MB, MG, MS) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης των κύριων ρουλεμάν, του κιβώτιου ταχυτήτων και των κύριων αξόνων αντίστοιχα. Στον Πίνακα 1 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης.

Πίνακας 1: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Drivetrain	Μεταβάσεις OM	Αριθμός Κατάστασης	Drivetrain	Μεταβάσεις OM
1	UB,UG,US	2,4,5,7,8,10	17	DB,FG,DS	1
2	DB,UG,US	3,4,15,18,26,31	18	DB,DG,US	12,20,28,29,31,32
3	MB,UG,US	1	19	DB,DG,MS	18
4	FB,UG,US	1	20	DB,DG,FS	1
5	UB,DG,US	6,7,11,18,25,29	21	UB,DG,MS	5
6	UB,MG,US	1	22	DB,UG,MS	2
7	UB,FG,US	1	23	MB,UG,DS	8
8	UB,UG,DS	9,10,11,15,24,30	24	FB,UG,DS	1
9	UB,UG,MS	1	25	UB,DG,FS	1
10	UB,UG,FS	1	26	DB,UG,FS	1
11	UB,DG,DS	12,14,21,25,27,30	27	UB,MG,DS	8
12	DB,DG,DS	13,14,16,17,19,20	28	DB,MG,US	2
13	MB,DG,DS	11	29	FB,DG,US	1
14	FB,DG,DS	1	30	UB,FG,DS	1
15	DB,UG,DS	12,17,22,23,24,26	31	DB,FG,US	1
16	DB,MG,DS	15	32	MB,DG,US	5
Επεξήγηση Συμβολισμών					
UB, UG, US		Καταστάσεις λειτουργίας των Main Bearings, Gearbox και Main Shafts αντίστοιχα			
DB, DG, DS		Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Main Bearings, Gearbox και Main Shafts αντίστοιχα			
MB, MG, MS		Καταστάσεις συντήρησης των Main Bearings, Gearbox και Main Shafts αντίστοιχα			
FB, FG, FS		Καταστάσεις αντικατάστασης των Main Bearings, Gearbox και Main Shafts αντίστοιχα			

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 32x32 με βάση τον πίνακα μεταβάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$A_{drv} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 32} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & -\alpha_{32\ 32} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.1) με «1»

$$\mathbf{A}_{drv} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x32

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 32} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.3)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.3) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.4)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{drv} \cdot \mathbf{A}_{drv} = \mathbf{b} \quad (2.5)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα \mathbf{A}_{drv} η κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας \mathbf{A}_{drv} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 2 και παρατηρείται πως οι καταστάσεις 14, 17, 20, 24, 25, 26, 29, 30, 31, δεν μεταβαίνουν στην κατάσταση 1.

Πίνακας 2: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Drivetrain	Μεταβάσεις no OM	Αριθμός Κατάστασης	Drivetrain	Μεταβάσεις no OM
1	UB,UG,US	2,4,5,7,8,10	17	DB,FG,DS	15
2	DB,UG,US	3,4,15,18,26,31	18	DB,DG,US	12,20,28,29,31,32
3	MB,UG,US	1	19	DB,DG,MS	18
4	FB,UG,US	1	20	DB,DG,FS	18
5	UB,DG,US	6,7,11,18,25,29	21	UB,DG,MS	5
6	UB,MG,US	1	22	DB,UG,MS	2
7	UB,FG,US	1	23	MB,UG,DS	8
8	UB,UG,DS	9,10,11,15,24,30	24	FB,UG,DS	8
9	UB,UG,MS	1	25	UB,DG,FS	5
10	UB,UG,FS	1	26	DB,UG,FS	2
11	UB,DG,DS	12,14,21,25,27,30	27	UB,MG,DS	8
12	DB,DG,DS	13,14,16,17,19,20	28	DB,MG,US	2
13	MB,DG,DS	11	29	FB,DG,US	5
14	FB,DG,DS	11	30	UB,FG,DS	8
15	DB,UG,DS	12,17,22,23,24,26	31	DB,FG,US	2
16	DB,MG,DS	15	32	MB,DG,US	5

3.2.2 Υδραυλικό υποσύστημα (hydraulic system)

Το υδραυλικό υποσύστημα (hydraulic system) αποτελείται από δύο στοιχεία, τον κινητήρα (motor) και τις βαλβίδες (valves). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 και λ_2 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του κινητήρα (DM) και των βαλβίδων (DV) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FM,FV) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} και λ_{2s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα (UM) και των βαλβίδων (UV) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FM,FV) αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} και λ_{2d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα (UM) και των βαλβίδων (UV) σε μια

υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DM,DV) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 και μ_2 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας του κινητήρα (FM) και των βαλβίδων (FV) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UM,UV) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και μ_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας του κινητήρα (MM) και των βαλβίδων (MV) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UM,UV) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι ρυθμοί συντήρησης m_{1m} και m_{2m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του κινητήρα (UM) και των βαλβίδων (UV) σε μια κατάσταση συντήρησης (MM,MV) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} , m_{2m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης του κινητήρα και των βαλβίδων αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υδραυλικού υποσυστήματος.

Πίνακας 3: Πίνακας μεταβάσεων του υδραυλικού υποσυστήματος με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Hydraulic system	Μεταβάσεις OM
1	UM,UV	2,3,5,9
2	UM,DV	3,4,6,10
3	UM,FV	1,7
4	UM,MV	1,8
5	DM,UV	6,7,9,11
6	DM,DV	7,8,10,12
7	DM,FV	5
8	DM,MV	5
9	FM,UV	1,10
10	FM,DV	1
11	MM,UV	1,12
12	MM,DV	2
Επεξήγηση Συμβολισμών		
UM, UV	Καταστάσεις λειτουργίας των Motor και Valves αντίστοιχα	
DM, DV	Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Motor και Valves αντίστοιχα	
MM, MV	Καταστάσεις συντήρησης των Motor και Valves αντίστοιχα	
FM, FV	Καταστάσεις αντικατάστασης των Motor και Valves αντίστοιχα	

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 12x12 με βάση τον πίνακα μεταβάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$\mathbf{A}_{hyd} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 12} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{12\ 1} & \alpha_{12\ 2} & \alpha_{12\ 3} & \cdots & -\alpha_{12\ 12} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.6) με «1»

$$\mathbf{A}_{hyd} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{12\ 1} & \alpha_{12\ 2} & \alpha_{12\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x12

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 12} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.8)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.8) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.9)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{hyd} \cdot \mathbf{A}_{hyd} = \mathbf{b} \quad (2.10)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα \mathbf{A}_{hyd} η κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας \mathbf{A}_{hyd} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 4 και παρατηρείται πως η κατάσταση 10 μεταβαίνει στην κατάσταση 2.

Πίνακας 4: Πίνακας μεταβάσεων του υδραυλικού υποσυστήματος χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Hydraulic system	Μεταβάσεις no OM
1	UM,UV	2,3,5,9
2	UM,DV	3,4,6,10
3	UM,FV	1,7
4	UM,MV	1,8
5	DM,UV	6,7,9,11
6	DM,DV	7,8,10,12
7	DM,FV	5
8	DM,MV	5
9	FM,UV	1,10
10	FM,DV	2
11	MM,UV	1,12
12	MM,DV	2

3.2.3 Υποσύστημα πέδησης (brake system)

Το υποσύστημα πέδησης (brake system) αποτελείται από δύο στοιχεία, τις συμπιέσεις ή αλλιώς τα τακάκια (callipers/pads) και τα δισκόφρενα (brake discs). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 και λ_2 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση των συμπιέσεων (τακάκια) (UC) και των δισκόφρενων (UD) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FC,FD) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} και λ_{2s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας των συμπιέσεων (UC) και των δισκόφρενων (UD) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FC,FD) αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} και λ_{2d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας των συμπιέσεων (UC) και των δισκόφρενων (UD) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DC,DD) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 και μ_2 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας των συμπιέσεων (FC) και των δισκόφρενων (FD) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UC,UD) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και

m_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας των συμπιέσεων (MC) και των δισκόφρενων (MD) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UC,UD) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι ρυθμοί συντήρησης m_{1m} και m_{2m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση των συμπιέσεων (DC) και των δισκόφρενων (DD) σε μια κατάσταση συντήρησης (MC,MD) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} , m_{2m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης των συμπιέσεων και των δισκόφρενων αντίστοιχα. Στον Πίνακα 5 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υποσυστήματος πέδησης.

Πίνακας 5: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος πέδησης με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Brake system	Μεταβάσεις OM
1	UC,UD	2,3,5,9
2	UC,DD	3,4,6,10
3	UC,FD	1,7
4	UC,MD	1,8
5	DC,UD	6,7,9,11
6	DC,DD	7,8,10,12
7	DC,FD	1
8	DC,MD	5
9	FC,UD	1,10
10	FC,DD	1
11	MC,UD	1,12
12	MC,DD	2
Επεξήγηση Συμβολισμών		
UC, UD	Καταστάσεις λειτουργίας των Calipers και Brake discs αντίστοιχα	
DC, DD	Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Calipers και Brake discs αντίστοιχα	
MC, MD	Καταστάσεις συντήρησης των Calipers και Brake discs αντίστοιχα	
FC, FD	Καταστάσεις αντικατάστασης των Calipers και Brake discs αντίστοιχα	

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 12x12 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$\mathbf{A}_{brk} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 12} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{12\ 1} & \alpha_{12\ 2} & \alpha_{12\ 3} & \cdots & -\alpha_{12\ 12} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.11) με «1»

$$\mathbf{A}_{brk} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{12\ 1} & \alpha_{12\ 2} & \alpha_{12\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x12

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 12} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.13)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.13) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.14)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{brk} \cdot \mathbf{A}_{brk} = \mathbf{b} \quad (2.15)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα \mathbf{A}_{brk} η κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας \mathbf{A}_{brk} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 6 και παρατηρείται πως οι καταστάσεις 7 και 10 μεταβαίνουν στις καταστάσεις 5 και 2 αντίστοιχα.

Πίνακας 6: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος πέδησης χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Brake system	Μεταβάσεις no OM
1	UC,UD	2,3,5,9
2	UC,DD	3,4,6,10
3	UC,FD	1,7
4	UC,MD	1,8
5	DC,UD	6,7,9,11
6	DC,DD	7,8,10,12
7	DC,FD	5
8	DC,MD	5
9	FC,UD	1,10
10	FC,DD	2
11	MC,UD	1,12
12	MC,DD	2

3.2.4 Υποσύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system)

Το υποσύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system) αποτελείται από τρία στοιχεία, τον υδραυλικό προωθητήρα (hydraulic actuator), το ρουλεμάν (bearing) και το φρένο περιστροφής (yaw brake). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 , λ_2 και λ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του υδραυλικού προωθητήρα (DA), του ρουλεμάν (DB) και του φρένου περιστροφής (DY) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FA,FB,FY) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} , λ_{2s} και λ_{3s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (UA), του ρουλεμάν (UB) και του φρένου περιστροφής (UY) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FA,FB,FY) αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} , λ_{2d} και λ_{3d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (UA), του ρουλεμάν (UB) και του φρένου περιστροφής (UY) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DA,DB,DY) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 , μ_2 και μ_3 αντιστοιχούν σε

μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (FA), του ρουλεμάν (FB) και του φρένου περιστροφής (FY) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UA,UB,UY) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και μ_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (MA), του ρουλεμάν (MB) και του φρένου περιστροφής (MY) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UA,UB,UY) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι ρυθμοί συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του υδραυλικού προωθητήρα (DA), του ρουλεμάν (DB) και του φρένου περιστροφής (DY) σε μια κατάσταση συντήρησης (MA,MB,MY) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης του υδραυλικού προωθητήρα, του ρουλεμάν και του φρένου περιστροφής αντίστοιχα. Στον Πίνακα 7 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους.

Πίνακας 7: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Yaw system	Μεταβάσεις OM	Αριθμός Κατάστασης	Yaw system	Μεταβάσεις OM
1	UA,UB,UY	2,4,5,7,8,10	17	DA,FB,DY	1
2	DA,UB,UY	3,4,15,18,26,31	18	DA,DB,UY	12,20,28,29,31,32
3	MA,UB,UY	1	19	DA,DB,MY	18
4	FA,UB,UY	1	20	DA,DB,FY	1
5	UA,DB,UY	6,7,11,18,25,29	21	UA,DB,MY	5
6	UA,MB,UY	1	22	DA,UB,MY	2
7	UA,FB,UY	1	23	MA,UB,DY	8
8	UA,UB,DY	9,10,11,15,24,30	24	FA,UB,DY	1
9	UA,UB,MY	1	25	UA,DB,FY	1
10	UA,UB,FY	1	26	DA,UB,FY	1
11	UA,DB,DY	12,14,21,25,27,30	27	UA,MB,DY	8
12	DA,DB,DY	13,14,16,17,19,20	28	DA,MB,UY	2
13	MA,DB,DY	11	29	FA,DB,UY	1
14	FA,DB,DY	1	30	UA,FB,DY	1
15	DA,UB,DY	12,17,22,23,24,26	31	DA,FB,UY	1
16	DA,MB,DY	15	32	MA,DB,UY	5
Επεξήγηση Συμβολισμών					
UA, UB, UY		Καταστάσεις λειτουργίας των Actuator, Bearings και Yaw brake αντίστοιχα			
DA, DB, DY		Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Actuator, Bearings και Yaw brake αντίστοιχα			
MA, MB, MY		Καταστάσεις συντήρησης των Actuator, Bearings και Yaw brake αντίστοιχα			
FA, FB, FY		Καταστάσεις αντικατάστασης των Actuator, Bearings και Yaw brake αντίστοιχα			

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 32x32 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$A_{yaw} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 32} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & -\alpha_{32\ 32} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.16) με «1»

$$\mathbf{A}_{yaw} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x32

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 32} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.18)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.18) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.19)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{yaw} \cdot \mathbf{A}_{yaw} = \mathbf{b} \quad (2.20)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα \mathbf{A}_{yaw} η κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας \mathbf{A}_{yaw} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 8 και παρατηρείται πως οι καταστάσεις 14, 17, 20, 24, 25, 26, 29, 30, 31, δεν μεταβαίνουν στην κατάσταση 1.

Πίνακας 8: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Yaw system	Μεταβάσεις no OM	Αριθμός Κατάστασης	Yaw system	Μεταβάσεις no OM
1	UA,UB,UY	2,4,5,7,8,10	17	DA,FB,DY	15
2	DA,UB,UY	3,4,15,18,26,31	18	DA,DB,UY	12,20,28,29,31,32
3	MA,UB,UY	1	19	DA,DB,MY	18
4	FA,UB,UY	1	20	DA,DB,FY	18
5	UA,DB,UY	6,7,11,18,25,29	21	UA,DB,MY	5
6	UA,MB,UY	1	22	DA,UB,MY	2
7	UA,FB,UY	1	23	MA,UB,DY	8
8	UA,UB,DY	9,10,11,15,24,30	24	FA,UB,DY	8
9	UA,UB,MY	1	25	UA,DB,FY	5
10	UA,UB,FY	1	26	DA,UB,FY	2
11	UA,DB,DY	12,14,21,25,27,30	27	UA,MB,DY	8
12	DA,DB,DY	13,14,16,17,19,20	28	DA,MB,UY	2
13	MA,DB,DY	11	29	FA,DB,UY	5
14	FA,DB,DY	11	30	UA,FB,DY	8
15	DA,UB,DY	12,17,22,23,24,26	31	DA,FB,UY	2
16	DA,MB,DY	15	32	MA,DB,UY	5

3.2.5 Υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub)

Το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub) δεν αποτελείται από επιπλέον στοιχεία και επομένως δεν μπορεί να εφαρμοστεί το σενάριο της ευκαιριακής συντήρησης. Γίνεται η υπόθεση πως το ίδιο το υποσύστημα μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Ο ρυθμός μετάβασης λ_1 αντιστοιχεί στη μετάβαση από την υποβαθμισμένη κατάσταση του υποσυστήματος (DH) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας (FH). Ο ρυθμός μετάβασης λ_{1s} αντιστοιχεί στη μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας του (UH) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας (FH) λόγω ξαφνικής βλάβης. Ο ρυθμός μετάβασης λ_{1d} αντιστοιχεί στη μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας του (UH) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση (DH). Ο ρυθμός μ_1 αντιστοιχεί σε μετάβαση από μια

κατάσταση μη-λειτουργίας του (FH) σε μια κατάσταση λειτουργίας (UH) μέσω αντικατάστασης. Ο ρυθμός μ_{1m} αντιστοιχεί σε μετάβαση από την κατάσταση μη-λειτουργίας (MH) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτού (UH) μέσω συντήρησης. Ο ρυθμός συντήρησης m_{1m} αντιστοιχεί στη μετάβαση από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του (DH) σε μια κατάσταση συντήρησης (MH). Στην πραγματικότητα, ο ρυθμός m_{1m} είναι ο ρυθμός συντήρησης του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα. Στον Πίνακα 9 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα.

Πίνακας 9: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Hub	Μεταβάσεις no OM
1	UH	2,3
2	DH	3,4
3	MH	1
4	FH	1
Επεξήγηση Συμβολισμών		
	UH	Κατάσταση λειτουργίας του Hub
	DH	Υποβαθμισμένη κατάσταση του Hub
	MH	Κατάσταση συντήρησης του Hub
	FH	Κατάσταση αντικατάστασης του Hub

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 4x4 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$A_{hub} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & -\alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & -\alpha_{44} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.21) με «1»

$$A_{hub} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & 1 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & -\alpha_{33} & 1 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x4

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 4} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (2.23)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.23) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (2.24)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{hub} \cdot \mathbf{A}_{hub} = \mathbf{b} \quad (2.25)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα δεν εφαρμόζει ευκαιριακή συντήρηση.

3.2.6 Υποσύστημα πτερυγίων (blades)

Το υποσύστημα πτερυγίων (blades) δεν αποτελείται από επιπλέον στοιχεία και επομένως δεν μπορεί να εφαρμοστεί το σενάριο της ευκαιριακής συντήρησης. Γίνεται η υπόθεση πως το ίδιο το υποσύστημα μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Ο ρυθμός μετάβασης λ_1 αντιστοιχεί στη μετάβαση από την υποβαθμισμένη κατάσταση του υποσυστήματος (DB) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας (FB). Ο ρυθμός μετάβασης λ_{1s} αντιστοιχεί στη μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας του (UB) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας (FB) λόγω ξαφνικής βλάβης. Ο ρυθμός μετάβασης λ_{1d} αντιστοιχεί στη μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας του (UB) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση (DB). Ο ρυθμός μ_1 αντιστοιχεί σε μετάβαση από μια κατάσταση μη-λειτουργίας του (FB) σε μια κατάσταση λειτουργίας (UB) μέσω αντικατάστασης. Ο ρυθμός μ_{1m} αντιστοιχεί σε μετάβαση από την κατάσταση μη-λειτουργίας (MB) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτού (UB) μέσω συντήρησης. Ο

ρυθμός συντήρησης m_{1m} αντιστοιχεί στη μετάβαση από μια υποβαθμισμένη κατάσταση (DB) σε μια κατάσταση συντήρησης (MB). Στην πραγματικότητα, ο ρυθμός m_{1m} είναι ο ρυθμός συντήρησης των πτερυγίων. Στον Πίνακα 10 απεικονίζεται το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος πτερυγίων.

Πίνακας 10: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος πτερυγίων χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Blades	Μεταβάσεις no OM
1	UB	2,3
2	DB	3,4
3	MB	1
4	FB	1
Επεξήγηση Συμβολισμών		
	UB	Κατάσταση λειτουργίας των Blades
	DB	Υποβαθμισμένη κατάσταση των Blades
	MB	Κατάσταση συντήρησης των Blades
	FB	Κατάσταση αντικατάστασης των Blades

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 4x4 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$A_{bld} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & -\alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & -\alpha_{44} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.26) με «1»

$$A_{bld} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & 1 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & -\alpha_{33} & 1 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x4

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 4} = [0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (2.28)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.28) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (2.29)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{bld} \cdot \mathbf{A}_{bld} = \mathbf{b} \quad (2.30)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων του υποσυστήματος πτερυγίων δεν εφαρμόζει ευκαιριακή συντήρηση.

3.2.7 Υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων (pitch system)

Το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων (pitch system) αποτελείται από δύο στοιχεία, τον υδραυλικό προωθητήρα (hydraulic actuator) και το ρουλεμάν (bearing). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 και λ_2 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του υδραυλικού προωθητήρα (DA) και του ρουλεμάν (DB) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FA,FB) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} και λ_{2s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (UA) και του ρουλεμάν (UB) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FA,FB) αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} και λ_{2d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (UA) και του ρουλεμάν (UB) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DA,DB) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 και μ_2 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (FA) και του ρουλεμάν (FB) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (FA,FB) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και μ_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας του υδραυλικού προωθητήρα (MA) και του ρουλεμάν (MB) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UA,UB) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι

ρυθμοί συντήρησης m_{1m} και m_{2m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του υδραυλικού προωθητήρα (DA) και του ρουλεμάν (DB) σε μια κατάσταση συντήρησης (MA,MB) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} και m_{2m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης του υδραυλικού προωθητήρα και του ρουλεμάν αντίστοιχα. Στον Πίνακα 11 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων.

Πίνακας 11: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Pitch system	Μεταβάσεις OM
1	UA,UB	2,3,5,9
2	UA,DB	3,4,6,10
3	UA,FB	1,7
4	UA,MB	1,8
5	DA,UB	6,7,9,11
6	DA,DB	7,8,10,12
7	DA,FB	1
8	DA,MB	5
9	FA,UB	1,10
10	FA,DB	1
11	MA,UB	1,12
12	MA,DB	2
Επεξήγηση Συμβολισμών		
UA, UB	Καταστάσεις λειτουργίας των Actuator και Bearing αντίστοιχα	
DA, DB	Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Actuator και Bearing αντίστοιχα	
MA, MB	Καταστάσεις συντήρησης των Actuator και Bearing αντίστοιχα	
FA, FB	Καταστάσεις αντικατάστασης των Actuator και Bearing αντίστοιχα	

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 12x12 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$\mathbf{A}_{ptch} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 12} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{12\ 1} & \alpha_{12\ 2} & \alpha_{12\ 3} & \cdots & -\alpha_{12\ 12} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.31) με «1»

$$\mathbf{A}_{ptch} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{12\ 1} & \alpha_{12\ 2} & \alpha_{12\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x12

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 12} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.33)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.33) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.34)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{ptch} \cdot \mathbf{A}_{ptch} = \mathbf{b} \quad (2.35)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα \mathbf{A}_{ptch} η κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας \mathbf{A}_{ptch} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 12 και παρατηρείται πως οι καταστάσεις 7 και 10 μεταβαίνουν στις καταστάσεις 5 και 2 αντίστοιχα.

Πίνακας 12: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Pitch system	Μεταβάσεις ΟΜ
1	UA,UB	2,3,5,9
2	UA,DB	3,4,6,10
3	UA,FB	1,7
4	UA,MB	1,8
5	DA,UB	6,7,9,11
6	DA,DB	7,8,10,12
7	DA,FB	5
8	DA,MB	5
9	FA,UB	1,10
10	FA,DB	2
11	MA,UB	1,12
12	MA,DB	2

3.2.8 Ηλεκτρικό υποσύστημα (power system)

Το ηλεκτρικό υποσύστημα (power system) αποτελείται από τρία στοιχεία, την γεννήτρια (generator), τον μετατροπέα συχνότητας (frequency converter) και τον μετασχηματιστή (transformer). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 , λ_2 και λ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση της γεννήτριας (DG), του μετατροπέα συχνότητας (DF) και του μετασχηματιστή (DT) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FG,FF,FT) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} , λ_{2s} και λ_{3s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας (UG), του μετατροπέα συχνότητας (UF) και του μετασχηματιστή (UT) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FG,FF,FT) αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} , λ_{2d} και λ_{3d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας (UG), του μετατροπέα συχνότητας (UF) και του μετασχηματιστή (UT) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DG,DF,DT) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 , μ_2 και μ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας της γεννήτριας (FG), του μετατροπέα συχνότητας

(FF) και του μετασχηματιστή (FT) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UG,UF,UT) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και μ_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας της γεννήτριας (MG), του μετατροπέα συχνότητας (MF) και του μετασχηματιστή (MT) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UG,UF,UT) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι ρυθμοί συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση της γεννήτριας (DG), του μετατροπέα συχνότητας (DF) και του μετασχηματιστή (DT) σε μια κατάσταση συντήρησης (MG,MF,MT) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης της γεννήτριας, του μετατροπέα συχνότητας και του μετασχηματιστή αντίστοιχα. Στον Πίνακα 13 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του ηλεκτρικού υποσυστήματος.

Πίνακας 13: Πίνακας μεταβάσεων του ηλεκτρικού υποσυστήματος με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Power system	Μεταβάσεις OM	Αριθμός Κατάστασης	Power system	Μεταβάσεις OM
1	UG,UF,UT	2,4,5,7,8,10	17	DG,FF,DT	1
2	DG,UF,UT	3,4,15,18,26,31	18	DG,DF,UT	12,20,28,29,31,32
3	MG,UF,UT	1	19	DG,DF,MT	18
4	FG,UF,UT	1	20	DG,DF,FT	18
5	UG,DF,UT	6,7,11,18,25,29	21	UG,DF,MT	5
6	UG,MF,UT	1	22	DG,UF,MT	2
7	UG,FF,UT	1	23	MG,UF,DT	8
8	UG,UF,DT	9,10,11,15,24,30	24	FG,UF,DT	1
9	UG,UF,MT	1	25	UG,DF,FT	5
10	UG,UF,FT	1	26	DG,UF,FT	2
11	UG,DF,DT	12,14,21,25,27,30	27	UG,MF,DT	8
12	DG,DF,DT	13,14,16,17,19,20	28	DG,MF,UT	2
13	MG,DF,DT	11	29	FG,DF,UT	1
14	FG,DF,DT	1	30	UG,FF,DT	1
15	DG,UF,DT	12,17,22,23,24,26	31	DG,FF,UT	1
16	DG,MF,DT	15	32	MG,DF,UT	5
Επεξήγηση Συμβολισμών					
UG, UF, UT		Καταστάσεις λειτουργίας των Generator, Frequency converter και Transformer αντίστοιχα			
DG, DF, DT		Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Generator, Frequency converter και Transformer αντίστοιχα			
MG, MF, MT		Καταστάσεις συντήρησης των Generator, Frequency converter και Transformer αντίστοιχα			
FG, FF, FT		Καταστάσεις αντικατάστασης των Generator, Frequency converter και Transformer αντίστοιχα			

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 32x32 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$A_{pow} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 32} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & -\alpha_{32\ 32} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.36) με «1»

$$A_{pow} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1x32

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 32} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.38)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.38) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.39)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{pow} \cdot \mathbf{A}_{pow} = \mathbf{b} \quad (2.40)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα A_{pow} η κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας A_{pow} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 14 και παρατηρείται πως οι καταστάσεις 14, 17, 24, 29, 30, 31, δεν μεταβαίνουν στην κατάσταση 1.

Πίνακας 14: Πίνακας μεταβάσεων του ηλεκτρικού υποσυστήματος χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Power system	Μεταβάσεις no OM	Αριθμός Κατάστασης	Power system	Μεταβάσεις no OM
1	UG,UF,UT	2,4,5,7,8,10	17	DG,FF,DT	15
2	DG,UF,UT	3,4,15,18,26,31	18	DG,DF,UT	12,20,28,29,31,32
3	MG,UF,UT	1	19	DG,DF,MT	18
4	FG,UF,UT	1	20	DG,DF,FT	18
5	UG,DF,UT	6,7,11,18,25,29	21	UG,DF,MT	5
6	UG,MF,UT	1	22	DG,UF,MT	2
7	UG,FF,UT	1	23	MG,UF,DT	8
8	UG,UF,DT	9,10,11,15,24,30	24	FG,UF,DT	8
9	UG,UF,MT	1	25	UG,DF,FT	5
10	UG,UF,FT	1	26	DG,UF,FT	2
11	UG,DF,DT	12,14,21,25,27,30	27	UG,MF,DT	8
12	DG,DF,DT	13,14,16,17,19,20	28	DG,MF,UT	2
13	MG,DF,DT	11	29	FG,DF,UT	5
14	FG,DF,DT	11	30	UG,FF,DT	8
15	DG,UF,DT	12,17,22,23,24,26	31	DG,FF,UT	2
16	DG,MF,DT	15	32	MG,DF,UT	5

3.2.9 Υποσύστημα δομής (structure)

Το υποσύστημα δομής (structure) αποτελείται από τρία στοιχεία, τον πύργο (tower), το κέλυφος (nacelle) και τα θεμέλια (foundation). Γίνεται η υπόθεση πως καθένα από τα στοιχεία μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας, σε υποβαθμισμένη κατάσταση, σε κατάσταση συντήρησης και σε κατάσταση μη-λειτουργίας.

Οι ρυθμοί μετάβασης λ_1 , λ_2 και λ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του πύργου (DT), του κελύφους (DN) και των θεμελίων (DF) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FT, FN, FF) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1s} , λ_{2s} και λ_{3s} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση λειτουργίας του πύργου (UT), του κελύφους (UN) και των θεμελίων (UF) σε μια κατάσταση μη-λειτουργίας αυτών (FT, FN, FF) αντίστοιχα λόγω ξαφνικής βλάβης. Οι ρυθμοί μετάβασης λ_{1d} , λ_{2d} και λ_{3d} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση

λειτουργίας του πύργου (UT), του κελύφους (UN) και των θεμελίων (UF) σε μια υποβαθμισμένη κατάσταση αυτών (DT, DN, DF) αντίστοιχα. Οι ρυθμοί μ_1 , μ_2 και μ_3 αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια κατάσταση μη-λειτουργίας του πύργου (FT), του κελύφους (FN) και των θεμελίων (FF) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UT, UN, UF) αντίστοιχα μέσω αντικατάστασης. Οι ρυθμοί μ_{1m} , μ_{2m} και μ_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από την κατάσταση μη-λειτουργίας του πύργου (MT), του κελύφους (MN) και των θεμελίων (MF) σε μια κατάσταση λειτουργίας αυτών (UT, UN, UF) αντίστοιχα μέσω συντήρησης. Οι ρυθμοί συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από μια υποβαθμισμένη κατάσταση του πύργου (DT), του κελύφους (DN) και των θεμελίων (DF) σε μια κατάσταση συντήρησης (MT, MN, MF) αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι ρυθμοί m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} είναι οι ρυθμοί συντήρησης του πύργου, του κελύφους και των θεμελίων αντίστοιχα. Στον Πίνακα 15 απεικονίζονται οι μεταβάσεις των καταστάσεων του υποσυστήματος δομής.

Πίνακας 15: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος δομής με ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Structure	Μεταβάσεις OM	Αριθμός Κατάστασης	Structure	Μεταβάσεις OM
1	UT,UN,UF	2,4,5,7,8,10	17	DT, FN, DF	1
2	DT,UN,UF	3,4,15,18,26,31	18	DT, DN, UF	12,20,28,29,31,32
3	MT,UN,UF	1	19	DT, DN, MF	18
4	FT,UN,UF	1	20	DT, DN, FF	1
5	UT, DN, UF	6,7,11,18,25,29	21	UT, DN, MF	5
6	UT, MN, UF	1	22	DT, UN, MF	2
7	UT, FN, UF	1	23	MT, UN, DF	8
8	UT, UN, DF	9,10,11,15,24,30	24	FT, UN, DF	1
9	UT, UN, MF	1	25	UT, DN, FF	1
10	UT, UN, FF	1	26	DT, UN, FF	1
11	UT, DN, DF	12,14,21,25,27,30	27	UT, MN, DF	8
12	DT, DN, DF	13,14,16,17,19,20	28	DT, MN, UF	2
13	MT, DN, DF	11	29	FT, DN, UF	1
14	FT, DN, DF	1	30	UT, FN, DF	1
15	DT, UN, DF	12,17,22,23,24,26	31	DT, FN, UF	1
16	DT, MN, DF	15	32	MT, DN, UF	5
Επεξήγηση Συμβολισμών					
UT, UN, UF		Καταστάσεις λειτουργίας των Tower, Nacelle και Foundation αντίστοιχα			
DT, DN, DF		Υποβαθμισμένες καταστάσεις των Tower, Nacelle και Foundation αντίστοιχα			
MT, MN, MF		Καταστάσεις συντήρησης των Tower, Nacelle και Foundation αντίστοιχα			
FT, FN, FF		Καταστάσεις αντικατάστασης των Tower, Nacelle και Foundation αντίστοιχα			

Δημιουργούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης 32x32 με βάση το διάγραμμα καταστάσεων του υποσυστήματος και χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.24).

$$A_{str} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1\ 32} \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2\ 32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & -\alpha_{32\ 32} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

και στη συνέχεια αντικαθιστούμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.41) με «1»

$$\mathbf{A}_{str} = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & 1 \\ \alpha_{21} & -\alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{32\ 1} & \alpha_{32\ 2} & \alpha_{32\ 3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα ρυθμών μετάβασης αντιστοιχούν σε όλους συνδυασμούς καταστάσεων που μπορούν να βρεθούν τα στοιχεία του υποσυστήματος.

Δημιουργούμε ένα μηδενικό πίνακα 1×32

$$\mathbf{b} = \mathbf{0}_{1 \times 32} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (2.43)$$

και στη συνέχεια μετατρέπουμε την τελευταία στήλη του πίνακα (2.43) σε «1»

$$\mathbf{b} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \quad (2.44)$$

Για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων (steady state probabilities – ssp) του υποσυστήματος επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\boldsymbol{\pi}_{str} \cdot \mathbf{A}_{str} = \mathbf{b} \quad (2.45)$$

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων είναι κοινή για εφαρμογή ή μη ευκαιριακής συντήρησης, έχοντας διαφορετικό πίνακα \mathbf{A}_{str} ή κάθε μια αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο πίνακας \mathbf{A}_{str} στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, δημιουργείται σύμφωνα με τον Πίνακα 16 και παρατηρείται πως οι καταστάσεις 14, 17, 20, 24, 25, 26, 29, 30, 31, δεν μεταβαίνουν στην κατάσταση 1.

Πίνακας 16: Πίνακας μεταβάσεων του υποσυστήματος δομής χωρίς ευκαιριακή συντήρηση

Αριθμός Κατάστασης	Structure	Μεταβάσεις OM	Αριθμός Κατάστασης	Structure	Μεταβάσεις OM
1	UT,UN,UF	2,4,5,7,8,10	17	DT, FN, DF	15
2	DT,UN,UF	3,4,15,18,26,31	18	DT, DN, UF	12,20,28,29,31,32
3	MT,UN,UF	1	19	DT, DN, MF	18
4	FT,UN,UF	1	20	DT, DN, FF	18
5	UT, DN, UF	6,7,11,18,25,29	21	UT, DN, MF	5
6	UT, MN, UF	1	22	DT, UN, MF	2
7	UT, FN, UF	1	23	MT, UN, DF	8
8	UT, UN, DF	9,10,11,15,24,30	24	FT, UN, DF	8
9	UT, UN, MF	1	25	UT, DN, FF	5
10	UT, UN, FF	1	26	DT, UN, FF	2
11	UT, DN, DF	12,14,21,25,27,30	27	UT, MN, DF	8
12	DT, DN, DF	13,14,16,17,19,20	28	DT, MN, UF	2
13	MT, DN, DF	11	29	FT, DN, UF	5
14	FT, DN, DF	11	30	UT, FN, DF	8
15	DT, UN, DF	12,17,22,23,24,26	31	DT, FN, UF	2
16	DT, MN, DF	15	32	MT, DN, UF	5

3.3 Μέτρα αξιοπιστίας και κόστους των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας

Οι στάσιμες πιθανότητες των υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητες για το επόμενο βήμα της Διπλωματικής Εργασίας, το οποίο αφορά τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας και του αναμενόμενου λειτουργικού κόστους για κάθε υποσύστημα και την ανεμογεννήτρια.

3.3.1 Διαθεσιμότητα των υποσυστημάτων και ανεμογεννήτριας

Η διαθεσιμότητα των υποσυστημάτων χρησιμοποιώντας ευκαιριακή συντήρηση δίνεται από το άθροισμα των στάσιμων πιθανοτήτων για τις οποίες ισχύει ότι βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Ως U ορίζεται το σύνολο όλων των καταστάσεων λειτουργίας του υποσυστήματος (UP states).

$$Availability\ with\ OM = AV_{om} = \sum_{j \in U} \pi_j \quad (3.1)$$

Η διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας ευκαιριακή συντήρηση δίνεται από το γινόμενο των διαθεσιμοτήτων των υποσυστημάτων, διότι έχουμε υποθέσει ότι τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας είναι συνδεδεμένα σε σειρά και ότι ο χρόνος παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις, για κάθε στοιχείο του εκάστοτε υποσυστήματος, είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή.

$$\begin{aligned} Total\ Availability\ with\ OM &= AV_{total_om} = \prod_{i \in \{drv, hyd, brk, yaw, \\ &\quad hub, bld, ptch, pow, str\}} AV_j \\ &= AV_1 \cdot AV_2 \cdot AV_3 \cdot AV_4 \cdot AV_5 \cdot AV_6 \cdot AV_7 \cdot AV_8 \cdot AV_9 \\ &= AV_{drv_om} \cdot AV_{hyd_om} \cdot AV_{brk_om} \cdot AV_{yaw_om} \\ &\quad \cdot AV_{hub_no_om} \cdot AV_{bld_no_om} \cdot AV_{ptch_om} \cdot AV_{pow_om} \\ &\quad \cdot AV_{str_om} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Η διαθεσιμότητα, εφαρμόζοντας ευκαιριακή συντήρηση, για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης συμβολίζεται ως AV_{drv_om} , για το υδραυλικό υποσύστημα ως AV_{hyd_om} , για το υποσύστημα πέδησης ως AV_{brk_om} , για το υποσύστημα περιστροφής του κελύφους ως AV_{yaw_om} , για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων ως AV_{ptch_om} , για το ηλεκτρικό υποσύστημα ως AV_{pow_om} και για το υποσύστημα δομής ως AV_{str_om} . Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα συμβολίζεται ως $AV_{hub_no_om}$, λόγω του ότι δεν αποτελείται από επιμέρους στοιχεία το υποσύστημα και έτσι δεν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση. Ομοίως, για το υποσύστημα πτερυγίων ο συμβολισμός είναι $AV_{bld_no_om}$.

3.3.2 Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας των υποσυστημάτων και ανεμογεννήτριας

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (Total Expected Operational Cost – TEOC) των υποσυστημάτων εφαρμόζοντας ευκαιριακή συντήρηση δίνεται από το

άθροισμα του συνολικού αναμενόμενου κόστους μη λειτουργίας (Total Expected Downtime Cost – TEDC) και του συνολικού αναμενόμενου κόστους δράσης (Total Expected Action Cost – TEAC) πολλαπλασιασμένο με τις ώρες ενός έτους. Ως d_j θεωρούμε δείκτρια συνάρτηση για $j \in D$ και ως $C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}}$ ορίζεται το κόστος μη λειτουργίας ενός στοιχείου που δε λειτουργεί, είτε λόγω συντήρησης ($C_{j \in D}^{Downtime_{for_M}}$) είτε λόγω αντικατάστασης ($C_{j \in D}^{Downtime_{for_R}}$), όπου D είναι το σύνολο όλων των καταστάσεων μη λειτουργίας του συστήματος (DOWN states). Ο πολλαπλασιασμός των d_j και $C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}}$, για $j \in D$, ορίζει τη συνάρτηση απολαβών w_j (reward function). Ορίζουμε ως κόστος συντήρησης ή κόστος αντικατάστασης, ενός στοιχείου που δε λειτουργεί, το $C_{j \in D}^{M_or_R}$, όπου $C_{j \in D}^M$ κόστος συντήρησης ενός στοιχείου που δε λειτουργεί και $C_{j \in D}^R$ κόστος αντικατάστασης ενός στοιχείου που δε λειτουργεί. Η συνάρτηση απολαβών r_j (reward function) για $j \in D$, δίνεται από το άθροισμα του κόστους των στοιχείων που δε λειτουργούν πολλαπλασιασμένο με d_j , στις καταστάσεις που εφαρμόζεται η ευκαιριακή συντήρηση.

$$TEOC_{om} = (TEDC_{om} + TEAC_{om}) \cdot 8760 \quad (3.3)$$

$$d_j = \begin{cases} 1, & j \in D \\ 0, & j \in U \end{cases}$$

$$w_j = d_j \cdot C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}} \quad (3.4)$$

$$r_j = \sum_{j \in D} d_j \cdot C_{j \in D}^{M_or_R}$$

Με τον τύπο (3.5) γίνεται ο υπολογισμός του συνολικού αναμενόμενου κόστους μη λειτουργίας εφαρμόζοντας ευκαιριακή συντήρηση:

$$TEDC_{om} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot d_j \cdot C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot w_j \quad (3.5)$$

Ο τύπος (3.6) υπολογίζει το συνολικό αναμενόμενο κόστος δράσης εφαρμόζοντας ευκαιριακή συντήρηση:

$$TEAC_{om} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot \sum_{j \in D} d_j \cdot C_{j \in D}^{M_or_R} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot r_j \quad (3.6)$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (Total Expected Operational Cost – TEOC) της ανεμογεννήτριας εφαρμόζοντας ευκαιριακή συντήρηση δίνεται από τον τύπο (3.7):

$$TEOC_{total_om} = \sum_{i \in \{drv, hyd, brk, yaw, hub, bld, ptch, pow, str\}} TEOC_{i_om} \quad (3.7)$$

Το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας, εφαρμόζοντας ευκαιριακή συντήρηση, για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης συμβολίζεται ως $TEOC_{drv_om}$, για το υδραυλικό υποσύστημα ως $TEOC_{hyd_om}$, για το υποσύστημα πέδησης ως $TEOC_{brk_om}$, για το υποσύστημα περιστροφής του κελύφους ως $TEOC_{yaw_om}$, για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων ως $TEOC_{ptch_om}$, για το ηλεκτρικό υποσύστημα ως $TEOC_{pow_om}$ και για το υποσύστημα δομής ως $TEOC_{str_om}$. Το αναμενόμενο κόστος για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα συμβολίζεται ως $TEOC_{hub_no_om}$, λόγω του ότι δεν αποτελείται από επιμέρους στοιχεία το υποσύστημα και έτσι δεν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση. Ομοίως, για το υποσύστημα πτερυγίων ο συμβολισμός είναι $TEOC_{bld_no_om}$.

3.4 Μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης δε διαφέρει με τη μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας με την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης ως προς τον υπολογισμό του κόστους. Για τον

υπολογισμό της διαθεσιμότητας επίσης ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία και στις δύο περιπτώσεις.

Η διαθεσιμότητα των υποσυστημάτων χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης δίνεται από το άθροισμα των στάσιμων πιθανοτήτων για τις οποίες ισχύει ότι βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Ως U ορίζεται το σύνολο όλων των καταστάσεων λειτουργίας του υποσυστήματος (UP states).

$$Availability\ without\ OM = AV_{no_om} = \sum_{j \in U} \pi_j \quad (4.1)$$

Η διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης δίνεται από το γινόμενο των διαθεσιμοτήτων των υποσυστημάτων, διότι έχουμε υποθέσει ότι τα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας είναι συνδεδεμένα σε σειρά και ότι ο χρόνος παραμονής σε κάθε μια από τις παραπάνω καταστάσεις, για κάθε στοιχείο του εκάστοτε υποσυστήματος, είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την εκθετική κατανομή.

$$\begin{aligned} Total\ Availability\ without\ OM &= AV_{total_no_om} \\ &= \prod_{i \in \{drv, hyd, brk, yaw, \\ &\quad hub, bld, ptch, pow, str\}} AV_i \\ &= AV_1 \cdot AV_2 \cdot AV_3 \cdot AV_4 \cdot AV_5 \cdot AV_6 \cdot AV_7 \cdot AV_8 \cdot AV_9 \\ &= AV_{drv_no_om} \cdot AV_{hyd_no_om} \cdot AV_{brk_no_om} \cdot AV_{yaw_no_om} \\ &\quad \cdot AV_{hub_no_om} \cdot AV_{bld_no_om} \cdot AV_{ptch_no_om} \cdot AV_{pow_no_om} \\ &\quad \cdot AV_{str_no_om} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Η διαθεσιμότητα, χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης, για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης συμβολίζεται ως $AV_{drv_no_om}$, για το υδραυλικό υποσύστημα ως $AV_{hyd_no_om}$, για το υποσύστημα πέδησης ως $AV_{brk_no_om}$, για το υποσύστημα περιστροφής του κελύφους ως $AV_{yaw_no_om}$, για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα ως $AV_{hub_no_om}$, για το υποσύστημα πτερυγίων ως $AV_{bld_no_om}$, για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων ως $AV_{ptch_no_om}$, για το ηλεκτρικό υποσύστημα ως $AV_{pow_no_om}$ και για το υποσύστημα δομής ως $AV_{str_no_om}$.

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (Total Expected Operational Cost – TEOC) των υποσυστημάτων χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης δίνεται από το άθροισμα του συνολικού αναμενόμενου κόστους μη λειτουργίας (Total Expected Downtime Cost – TEDC) και του συνολικού αναμενόμενου κόστους δράσης (Total Expected Action Cost – TEAC) πολλαπλασιασμένο με τις ώρες ενός έτους. Ως d_j θεωρούμε τη δείκτρια συνάρτηση για $j \in D$ και ως $C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}}$ ορίζεται το κόστος μη λειτουργίας ενός στοιχείου που δε λειτουργεί, είτε λόγω συντήρησης ($C_{j \in D}^{Downtime_{for_M}}$) είτε λόγω αντικατάστασης ($C_{j \in D}^{Downtime_{for_R}}$), όπου D είναι το σύνολο όλων των καταστάσεων μη λειτουργίας του συστήματος (DOWN states). Ο πολλαπλασιασμός των d_j και $C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}}$, για $j \in D$, ορίζει τη συνάρτηση απολαβών w_j (reward function). Ορίζουμε ως κόστος συντήρησης ή κόστος αντικατάστασης, ενός στοιχείου που δε λειτουργεί, το $C_{j \in D}^{M_or_R}$, όπου $C_{j \in D}^M$ κόστος συντήρησης ενός στοιχείου που δε λειτουργεί και $C_{j \in D}^R$ κόστος αντικατάστασης ενός στοιχείου που δε λειτουργεί. Η συνάρτηση απολαβών r_j (reward function) για $j \in D$, δίνεται από τον πολλαπλασιασμό των d_j και $C_{j \in D}^{M_or_R}$.

$$TEOC_{no_om} = (TEDC_{no_om} + TEAC_{no_om}) \cdot 8760 \quad (4.3)$$

$$d_j = \begin{cases} 1, & j \in D \\ 0, & j \in U \end{cases}$$

$$w_j = d_j \cdot C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}} \quad (4.4)$$

$$r_j = d_j \cdot C_{j \in D}^{M_or_R}$$

Με τον τύπο (3.11) γίνεται ο υπολογισμός του συνολικού αναμενόμενου κόστους μη λειτουργίας χωρίς ευκαιριακή συντήρηση:

$$TEDC_{no_om} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot d_j \cdot C_{j \in D}^{Downtime_{for_M_or_R}} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot w_j \quad (4.5)$$

Ο τύπος (3.12) υπολογίζει το συνολικό αναμενόμενο κόστος δράσης χωρίς ευκαιριακή συντήρηση:

$$TEAC_{no_om} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot d_j \cdot C_{j \in D}^{M,or,R} = \sum_{j \in D} \pi_j \cdot r_j \quad (4.6)$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (Total Expected Operational Cost – TEOC) της ανεμογεννήτριας χωρίς ευκαιριακή συντήρηση δίνεται από τον τύπο (4.7).

$$TEOC_{total_no_om} = \sum_{i \in \{drv, hyd, brk, yaw, hub, bld, ptch, pow, str\}} TEOC_{i_no_om} \quad (4.7)$$

Το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας, χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης, για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης συμβολίζεται ως $TEOC_{drv_no_om}$, για το υδραυλικό υποσύστημα ως $TEOC_{hyd_no_om}$, για το υποσύστημα πέδησης ως $TEOC_{brk_no_om}$, για το υποσύστημα περιστροφής του κελύφους ως $TEOC_{yaw_no_om}$, για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα ως $TEOC_{hub_no_om}$, για το υποσύστημα πτερυγίων ως $TEOC_{bld_no_om}$, για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων ως $TEOC_{ptch_no_om}$, για το ηλεκτρικό υποσύστημα ως $TEOC_{pow_no_om}$ και για το υποσύστημα δομής ως $TEOC_{str_no_om}$.

4. Αριθμητική εφαρμογή

Έχοντας το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε αυτό το μέρος της Διπλωματικής Εργασίας θα εφαρμόσουμε όλα όσα αναφέρθηκαν σε μια πειραματική μελέτη περίπτωσης. Τα αριθμητικά δεδομένα δεν είναι πραγματικά, αλλά έχουν προκύψει όλα από τη σχετική βιβλιογραφία. Θα χρησιμοποιήσουμε το περιβάλλον προγραμματισμού “MATLAB” για να υπολογίσουμε την ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας κάθε κατάστασης, όπως και για να υπολογίσουμε τη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα της ανεμογεννήτριας. Έτσι, θα οδηγηθούμε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αναζητούμε σχετικά με τον αν κάθε υποσύστημα ωφελείται ή όχι από την ευκαιριακή συντήρηση.

4.1 Διαθεσιμότητα και αναμενόμενο κόστος λειτουργίας για την περίπτωση εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης

Η διαθεσιμότητα και το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub) και το υποσύστημα πτερυγίων (blades) υπολογίζεται χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης καθώς τα υποσυστήματα δεν αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία.

4.1.1 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης (drivetrain)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης A_{drv_om} ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 17. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.5) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 17: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης

$\lambda_1 = 0.255 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.01 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.012 \text{ γ}^{-1}$	$m_{1m} = 0.5 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_{1m} = 584 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_1 = 292 \text{ γ}^{-1}$
$\lambda_2 = 0.285 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.09 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.049 \text{ γ}^{-1}$	$m_{2m} = 0.7 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_{2m} = 400 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_2 = 38.022 \text{ γ}^{-1}$
$\lambda_3 = 0.237 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{3s} = 0.04 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{3d} = 0.231 \text{ γ}^{-1}$	$m_{3m} = 0.5 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_{3m} = 500 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_3 = 185.185 \text{ γ}^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα μετάδοσης κίνησης είναι:

$$AV_{drv_om} = 0.9966363255951.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 18 και Πίνακα 19 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{downtime_per_hour}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 18: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

		$C_{maintenance}$	$C_{replacement}$	$C_{downtime_per_hour}$
Drivetrain	Main bearings	150.00 €	1,798.10 €	72.43 €/h
	Gearbox	2,500.00 €	48,666.52 €	63.02 €/h
	Main shafts	900.00 €	11,284.07 €	5.00 €/h

Πίνακας 19: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

		Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{downtime_for_m}$	$C_{downtime_for_r}$
Drivetrain	Main bearings	15	30	1,086.44 €	2,172.88 €
	Gearbox	22	231	1,386.50 €	14,558.28 €
	Main shafts	18	48	90.00 €	240.00 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{drv_om} = 1,488,524.66219641 \text{ €}.$$

4.1.2 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υδραυλικό υποσύστημα (hydraulic system)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υδραυλικού υποσυστήματος A_{hyd_om} ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 20. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.10) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 20: Ρυθμοί μετάβασης του υδραυλικού υποσυστήματος

$\lambda_1 = 0.1138 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.06 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.278 \text{ y}^{-1}$	$m_{1m} = 0.5 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{1m} = 909.091 \text{ y}^{-1}$	$\mu_1 = 1250 \text{ y}^{-1}$
$\lambda_2 = 0.4905 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.09 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.1471 \text{ y}^{-1}$	$m_{2m} = 1 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{2m} = 1460 \text{ y}^{-1}$	$\mu_2 = 2190 \text{ y}^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το υδραυλικό υποσύστημα είναι:

$$AV_{hyd_om} = 0.999651692188281.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 21 και Πίνακα 22 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{downtime_per_hour}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 21: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

		$C_{\text{maintenance}}$	$C_{\text{replacement}}$	$C_{\text{downtime_per_hour}}$
Hydraulic	Motor/gear pump	2,000.00 €	4,702.47 €	140.16 €/h
	Valves/pipes	500.00 €	1,047.84 €	47.03 €/h

Πίνακας 22: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

		Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{\text{downtime_for_m}}$	$C_{\text{downtime_for_r}}$
Hydraulic	Motor/gear pump	10	7	1,401.55 €	981.09 €
	Valves/pipes	6	4	282.20 €	188.13 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{hyd_om} = 9,204.60845475264 \text{ €}.$$

4.1.3 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα πέδησης (brake system)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος πέδησης A_{brk_om} ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 23. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.15) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 23: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος πέδησης

$\lambda_1 = 0.133 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.02 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.188 \text{ y}^{-1}$	$m_{1m} = 0.5 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{1m} = 1095 \text{ y}^{-1}$	$\mu_1 = 876 \text{ y}^{-1}$
$\lambda_2 = 0.267 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.09 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.251 \text{ y}^{-1}$	$m_{2m} = 0.7 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{2m} = 973.333 \text{ y}^{-1}$	$\mu_2 = 730 \text{ y}^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα πέδησης είναι:

$$AV_{brk_om} = 0.999546848289068.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 24 και Πίνακα 25 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{\text{downtime_per_hour}}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 24: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

		$C_{\text{maintenance}}$	$C_{\text{replacement}}$	$C_{\text{downtime_per_hour}}$
Brake	Callipers/pads	150.00 €	1,798.10 €	72.43 €/h
	Brake discs	2,500.00 €	48,666.52 €	63.02 €/h

Πίνακας 25: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

		Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{\text{downtime_for_m}}$	$C_{\text{downtime_for_r}}$
Brake	Callipers/pads	10	7	1,401.55 €	981.09 €
	Brake discs	6	4	282.20 €	188.13 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{brk_om} = 2,797.19431441814 \text{ €}.$$

4.1.4 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους (yaw system)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους A_{yaw_om} ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 26. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.20) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 26: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους

$\lambda_1 = 0.0626 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.02 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.0127 \text{ y}^{-1}$	$m_{1m} = 0.33 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{1m} = 973.333 \text{ y}^{-1}$	$\mu_1 = 730 \text{ y}^{-1}$
$\lambda_2 = 0.0874 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.04 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.0112 \text{ y}^{-1}$	$m_{2m} = 0.33 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{2m} = 876 \text{ y}^{-1}$	$\mu_2 = 673.8 \text{ y}^{-1}$
$\lambda_3 = 0.2301 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{3s} = 0.09 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{3d} = 0.2202 \text{ y}^{-1}$	$m_{3m} = 0.5 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{3m} = 730 \text{ y}^{-1}$	$\mu_3 = 398.18 \text{ y}^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα οριζόντιας περιστροφής του κελύφους είναι:

$$AV_{yaw_om} = 0.999445289204063.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 27 και Πίνακα 28 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{downtime_per_hour}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 27: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

	$C_{maintenance}$	$C_{replacement}$	$C_{downtime_per_hour}$	
Yaw	Hydraulic actuator	1,500.00 €	14,955.49 €	31.04 €/h
	Bearing/gear	150.00 €	1,798.10 €	72.43 €/h
	Yaw brake	80.00 €	611.39 €	30.00 €/h

Πίνακας 28: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

	Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{downtime_for_m}$	$C_{downtime_for_r}$	
Yaw	Hydraulic actuator	9	12	279.37 €	372.50 €
	Bearing/gear	10	13	724.29 €	941.58 €
	Yaw brake	12	22	360.00 €	660.00 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{yaw_om} = 9,540.45299912648\text{€}.$$

4.1.5 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων (pitch system)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων A_{ptch_om} ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 29. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.35) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 29: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων

$\lambda_1 = 0.0626 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.01 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.0127 \text{ γ}^{-1}$	$m_{1m} = 0.33 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_{1m} = 973.33 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_1 = 730 \text{ γ}^{-1}$
$\lambda_2 = 0.0874 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.03 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.0112 \text{ γ}^{-1}$	$m_{2m} = 0.33 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_{2m} = 876 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_2 = 673.85 \text{ γ}^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα περιστροφής πτερυγίων είναι:

$$AV_{ptch_om} = 0.999918083865952.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 30 και Πίνακα 31 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{downtime_per_hour}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 30: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

		$C_{maintenance}$	$C_{replacement}$	$C_{downtime_per_hour}$
Pitch	Hydraulic actuator	1,500.00 €	14,955.49 €	31.04 €/h
	Bearing/gear	150.00 €	1,798.10 €	72.43 €/h

Πίνακας 31: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

		Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{\text{downtime_for_m}}$	$C_{\text{downtime_for_r}}$
Pitch	Hydraulic actuator	9	12	279.37 €	372.50 €
	Bearing/gear	10	13	724.29 €	941.58 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{ptch_om} = 3,439.23532318513\text{€}.$$

4.1.6 Διαθεσιμότητα και κόστος για το ηλεκτρικό υποσύστημα (power system)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του ηλεκτρικού υποσυστήματος A_{pow_om} ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 32. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.40) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 32: Ρυθμοί μετάβασης του ηλεκτρικού υποσυστήματος

$\lambda_1 = 0.08 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.03 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.049 \text{ y}^{-1}$	$m_{1m} = 0.33 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{1m} = 370.37 \text{ y}^{-1}$	$\mu_1 = 108.695 \text{ y}^{-1}$
$\lambda_2 = 0.07 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.01 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.076 \text{ y}^{-1}$	$m_{2m} = 0.33 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{2m} = 625.714 \text{ y}^{-1}$	$\mu_2 = 153.684 \text{ y}^{-1}$
$\lambda_3 = 0.06 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{3s} = 0.009 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{3d} = 0.052 \text{ y}^{-1}$	$m_{3m} = 0.33 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{3m} = 336.923 \text{ y}^{-1}$	$\mu_3 = 8760 \text{ y}^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το ηλεκτρικό υποσύστημα είναι:

$$AV_{pow_om} = 0.999273500885501.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 33 και Πίνακα 34 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{\text{downtime_per_hour}}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 33: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

	$C_{\text{maintenance}}$	$C_{\text{replacement}}$	$C_{\text{downtime_per_hour}}$
Power Generator	3,500.00 €	40,723.22 €	900.07 €/h
Frequency converter	5,300.00 €	56,247.66 €	240.77 €/h
Transformer	2,300.00 €	70,000.00 €	95.00 €/h

Πίνακας 34: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

	Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{\text{downtime_for_m}}$	$C_{\text{downtime_for_r}}$
Power Generator	24	81	21,601.72 €	72,905.82 €
Frequency converter	14	57	3,370.80 €	13,723.98 €
Transformer	26	1	2,470.00 €	95.00 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{pow_om} = 432,121.830460446 \text{ €}.$$

4.1.7 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα δομής (structure)

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος δομής A_{str_om} ο οποίος έχει συμπληρωθεί με τα δεδομένα του Πίνακα 35. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.5) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (3.1) υπολογίσαμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 35: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος δομής

$\lambda_1 = 0.063 \text{ } \gamma^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.001 \text{ } \gamma^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.092 \text{ } \gamma^{-1}$	$m_{1m} = 0.33 \text{ } \gamma^{-1}$	$\mu_{1m} = 4380 \text{ } \gamma^{-1}$	$\mu_1 = 2.666 \text{ } \gamma^{-1}$
$\lambda_2 = 0.123 \text{ } \gamma^{-1}$	$\lambda_{2s} = 0.09 \text{ } \gamma^{-1}$	$\lambda_{2d} = 0.155 \text{ } \gamma^{-1}$	$m_{2m} = 0.5 \text{ } \gamma^{-1}$	$\mu_{2m} = 1095 \text{ } \gamma^{-1}$	$\mu_2 = 8 \text{ } \gamma^{-1}$
$\lambda_3 = 0.06 \text{ } \gamma^{-1}$	$\lambda_{3s} = 0.001 \text{ } \gamma^{-1}$	$\lambda_{3d} = 0.092 \text{ } \gamma^{-1}$	$m_{3m} = 0.33 \text{ } \gamma^{-1}$	$\mu_{3m} = 4380 \text{ } \gamma^{-1}$	$\mu_3 = 2 \text{ } \gamma^{-1}$

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα δομής είναι:

$$AV_{str_om} = 0.979942662074549.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (3.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (3.5) και (3.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 36 και Πίνακα 37 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{downtime_per_hour}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 36: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα των στοιχείων του υποσυστήματος

		$C_{maintenance}$	$C_{replacement}$	$C_{downtime_per_hour}$
Structure	Tower	1,100.00 €	75,239.46 €	140.00 €/h
	Nacelle	1,100.00 €	30,336.99 €	140.00 €/h
	Foundation	1,100.00 €	18,809.56 €	140.00 €/h

Πίνακας 37: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης των στοιχείων σε ώρες και κόστη μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστη μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

		Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{downtime_for_m}$	$C_{downtime_for_r}$
Structure	Tower	2	2191	280.00 €	306,740.00 €
	Nacelle	8	730	1,120.00 €	102,200.00 €
	Foundation	2	2921	280.00 €	408,940.00 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{str_om} = 42,722,450.0533386 \text{ €}.$$

4.1.8 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα (hub)

Όπως αναφέρουμε στην αρχή του κεφαλαίου η διαθεσιμότητα και το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και

κύριου άξονα υπολογίζεται χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης καθώς τα υποσυστήματα δεν αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία.

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα $A_{hub_no_om}$ ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 38. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.25) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (4.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 38: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα

$\lambda_1 = 0.0626 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.01 \text{ y}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.0127 \text{ y}^{-1}$	$m_{1m} = 0.33 \text{ y}^{-1}$	$\mu_{1m} = 973.333 \text{ y}^{-1}$	$\mu_1 = 730 \text{ y}^{-1}$
-------------------------------------	--------------------------------------	--	--------------------------------	-------------------------------------	------------------------------

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα είναι:

$$AV_{hub_no_om} = 0.999973420459568.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (4.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (4.5) και (4.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 39 και Πίνακα 40 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{downtime_per_hour}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 39: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας του υποσυστήματος ανά ώρα

	$C_{maintenance}$	$C_{replacement}$	$C_{downtime_per_hour}$
Hub	1,500.00 €	35,995.625 €	40.45 €/h

Πίνακας 40: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης σε ώρες και κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστος μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

	Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{downtime_for_m}$	$C_{downtime_for_r}$
Hub	40	298	1,617.84 €	12,052.94 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{hub_no_om} = 7,006.13233390503 \text{ €}.$$

4.1.9 Διαθεσιμότητα και κόστος για το υποσύστημα πτερυγίων (blades)

Όπως και στην περίπτωση του υποσυστήματος σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα, η διαθεσιμότητα και το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας για το υποσύστημα πτερυγίων υπολογίζεται χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης καθώς τα υποσυστήματα δεν αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία.

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας χρησιμοποιούμε τον πίνακα ρυθμών μετάβασης του υποσυστήματος πτερυγίων $A_{bld_no_om}$ ο οποίος συμπληρώνεται με τα δεδομένα του Πίνακα 41. Ειδικότερα, υπολογίζουμε πρώτα την πράξη πινάκων του τύπου (2.30) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον τύπο (4.1) υπολογίζουμε τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος.

Πίνακας 41: Ρυθμοί μετάβασης του υποσυστήματος πτερυγίων

$\lambda_1 = 0.07 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{1s} = 0.01 \text{ γ}^{-1}$	$\lambda_{1d} = 0.2 \text{ γ}^{-1}$	$m_{1m} = 0.33 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_{1m} = 434.782 \text{ γ}^{-1}$	$\mu_1 = 30.487 \text{ γ}^{-1}$
-----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------

Η διαθεσιμότητα για το υποσύστημα πτερυγίων είναι:

$$AV_{bld_no_om} = 0.998764502011059.$$

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος δίνεται από τον τύπο (4.3) υπολογίζοντας πρώτα του τύπους (4.5) και (4.6). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς δίνονται από τους Πίνακα 42 και Πίνακα 43 (Ozturk et al., 2018; Carroll et al., 2016). Το κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω αντικατάστασης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος μη λειτουργίας ανά ώρα ($C_{\text{downtime_per_hour}}$) με τη διάρκεια συντήρησης ή αντικατάστασης σε ώρες αντίστοιχα.

Πίνακας 42: Κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και κόστος μη λειτουργίας του υποσυστήματος ανά ώρα

	$C_{\text{maintenance}}$	$C_{\text{replacement}}$	$C_{\text{downtime_per_hour}}$
Blades	1,500.00 €	44,755.03 €	105.34 €/h

Πίνακας 43: Διάρκεια συντήρησης και αντικατάστασης σε ώρες και κόστος μη λειτουργίας λόγω συντήρησης και κόστος μη λειτουργίας λόγω αντικατάστασης

	Maintenance duration (h)	Replacement duration (h)	$C_{\text{downtime_for_m}}$	$C_{\text{downtime_for_r}}$
Blades	21	288	2,212.17 €	30,338.31 €

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας (TEOC) του υποσυστήματος είναι:

$$TEOC_{bld_no_om} = 654,726.92156268 \text{ €}.$$

4.1.10 Διαθεσιμότητα και κόστος για την ανεμογεννήτρια

Για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας για την ανεμογεννήτρια χρησιμοποιούμε τον τύπο (3.2). Η διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας για την περίπτωση εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης είναι:

$$AV_{total_om} = 0.973304230147084.$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο (3.7) υπολογίζουμε το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος για την ανεμογεννήτρια:

$$TEOC_{total_om} = 45,329,811.0909836 \text{ €}.$$

4.2 Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με την περίπτωση χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης

Για τον υπολογισμό διαθεσιμότητας και κόστους χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης χρησιμοποιούμε τους παρακάτω πίνακες ρυθμών μετάβασης των υποσυστημάτων, καθώς και τους τύπους (2.5), (2.10), (2.15), (2.20), (2.25), (2.30),

(2.35), (2.40), (2.45), (4.1), (4.3), (4.5) και (4.6) όπως τους χρησιμοποιήσαμε και στην ενότητα 4.1 για κάθε υποσύστημα της ανεμογεννήτριας.

Η διαθεσιμότητα των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης παρατηρείται πως είναι μικρότερη από τη διαθεσιμότητα της εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 44. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την ευκαιριακή συντήρηση προλαμβάνονται μια ή και περισσότερες βλάβες των στοιχείων των υποσυστημάτων, ενώ στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης συντηρείται ή αντικαθίσταται ένα στοιχείο τη φορά. Ειδικότερα, όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα μεταβαίνει σε καλύτερη κατάσταση από ότι χωρίς ευκαιριακή συντήρηση. Έτσι, αποδεικνύεται πως μας ωφελεί η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, εκτός από το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα όπως και το υποσύστημα πτερυγίων (δεν αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία).

Πίνακας 44: Αποτελέσματα της διαθεσιμότητας υποσυστημάτων και ανεμογεννήτριας με ή χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης

	Με ευκαιριακή συντήρηση	Χωρίς ευκαιριακή συντήρηση
Drivetrain	0.996636325595100	0.996564388089613
Hydraulic	0.999651692188281	0.999648176205127
Brake	0.999546848289068	0.999521781099528
Yaw	0.999445289204063	0.999424718024573
Hub	–	0.999973420459568
Blades	–	0.998764502011059
Pitch	0.999918083865952	0.999916835042141
Power	0.999273500885501	0.999243357480436
Structure	0.979942662074549	0.978234076369990
Wind Turbine	0.973304230147084	0.971458791518552

Στον Πίνακα 45 παρουσιάζεται το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας τόσο των υποσυστημάτων όσο και της ανεμογεννήτριας, χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης, να είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με

ευκαιριακή συντήρηση. Όπως αναφέρεται και στην προηγούμενη παράγραφο, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την ευκαιριακή συντήρηση προλαμβάνονται μια ή και περισσότερες βλάβες των στοιχείων των υποσυστημάτων, ενώ στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης συντηρείται ή αντικαθίσταται ένα στοιχείο τη φορά. Επιπλέον, το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης ενός στοιχείου. Έτσι, αποδεικνύεται πως μας ωφελεί η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, εκτός από το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα όπως και το υποσύστημα πτερυγίων (δεν αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία).

Πίνακας 45: Αποτελέσματα του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας υποσυστημάτων και ανεμογεννήτριας με ή χωρίς εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης

	Με ευκαιριακή συντήρηση	Χωρίς ευκαιριακή συντήρηση
Drivetrain	1,488,524.66219641 €	1,493,294.43865209 €
Hydraulic	9,204.60845475264 €	9,208.38302106975 €
Brake	2,797.19431441814 €	2,817.04659914197 €
Yaw	9,540.45299912648 €	9,644.37097183943 €
Hub	–	7,006.13233390503 €
Blades	–	654,726.921562680 €
Pitch	3,439.23532318513 €	3,457.56866580433 €
Power	432,121.830460446 €	435,072.646469606 €
Structure	42,722,450.0533386 €	48,746,119.1453847 €
Wind Turbine	45,329,811.0909836 €	51,361,346.6536609 €

Στον Πίνακα 46 απεικονίζεται η ποσοστιαία μεταβολή διαθεσιμότητας και κόστους των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας με ευκαιριακή συντήρηση και χωρίς, συνοψίζοντας ουσιαστικά τους Πίνακα 44 και Πίνακα 45. Παρατηρείται ότι για κάθε υποσύστημα η ποσοστιαία μεταβολή της διαθεσιμότητας είναι θετική και μεγαλύτερη από μηδέν, ενώ τα αναμενόμενα κόστη λειτουργίας παρουσιάζουν ποσοστιαία μεταβολή μικρότερη από μηδέν. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, τόσο για την ποσοστιαία μεταβολή της διαθεσιμότητας όσο και για την ποσοστιαία μεταβολή του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας των υποσυστημάτων, οφείλεται στο γεγονός

ότι με την ευκαιριακή συντήρηση προλαμβάνονται μια ή και περισσότερες βλάβες των στοιχείων των υποσυστημάτων, ενώ στην περίπτωση μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης συντηρείται ή αντικαθίσταται ένα στοιχείο τη φορά. Όσο για την ποσοστιαία μεταβολή του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας των υποσυστημάτων, λόγω του ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης ενός στοιχείου, παρουσιάζει τιμές αρνητικές, μη μηδενικές. Η ποσοστιαία μεταβολή της διαθεσιμότητας και του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας συνολικά, ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με αυτή των υποσυστημάτων όντας θετική και μεγαλύτερη από μηδέν, και μικρότερη από μηδέν αντίστοιχα. Επομένως, αποδεικνύεται πως μας ωφελεί η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε υποσύστημα, εκτός από το υποσύστημα σύνδεσης πτερυγίων και κύριου άξονα όπως και το υποσύστημα πτερυγίων (δεν αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία).

Ο τύπος για την ποσοστιαία μεταβολή χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τη διαθεσιμότητα του υδραυλικού υποσυστήματος είναι ο εξής:

$$\frac{AV_{hyd_om} - AV_{hyd_no_om}}{AV_{hyd_no_om}} = \frac{0.999651692 - 0.999648176}{0.999648176} = 0.00035172\%$$

Πίνακας 46: Ποσοστιαία μεταβολή διαθεσιμότητας και κόστους των υποσυστημάτων και της ανεμογεννήτριας με ευκαιριακή συντήρηση και χωρίς

		Χωρίς ευκαιριακή συντήρηση	Με ευκαιριακή συντήρηση	Ποσοστιαία μεταβολή
Drivetrain	Availability	0.996564388	0.996636326	0.00721855%
	TEDC	38.22157034 €/h	38.40111789 €/h	0.46975450%
	TEAC	132.2458313 €/h	131.8954195 €/h	-0.26497001%
	TEOC	1,493,294.439 €	1,488,524.662 €	-0.31941299%
Hydraulic	Availability	0.999648176	0.999651692	0.00035172%
	TEDC	0.328646300 €/h	0.327723989 €/h	-0.28063926%
	TEAC	0.722538977 €/h	0.723030401 €/h	0.06801349%
	TEOC	9,208.383021 €	9,204.608455 €	-0.04099054%
Brake	Availability	0.999521781	0.999546848	0.00250792%
	TEDC	0.119115540 €/h	0.116118524 €/h	-2.51605798%
	TEAC	0.202465122 €/h	0.203195895 €/h	0.36093797%
	TEOC	2,817.046599 €	2,797.194314 €	-0.70471978%
Yaw	Availability	0.999424718	0.999445289	0.00205830%
	TEDC	0.337303039 €/h	0.327785894 €/h	-2.82154162%
	TEAC	0.763652551 €/h	0.761306915 €/h	-0.30716019%
	TEOC	9,644.370972 €	9,540.452999 €	-1.07749871%
Pitch	Availability	0.999916835	0.999918084	0.00012489%
	TEDC	0.054634023 €/h	0.054172546 €/h	-0.84466966%
	TEAC	0.340065596 €/h	0.338434226 €/h	-0.47972224%
	TEOC	3,457.568666 €	3,439.235323 €	-0.53023799%
Power	Availability	0.999243357	0.999273501	0.00301662%
	TEDC	28.07978296 €/h	27.73738040 €/h	-1.21939177%
	TEAC	21.58604426 €/h	21.59159568 €/h	0.02571764%
	TEOC	435,072.6465 €	432,121.8305 €	-0.67823524%
Structure	Availability	0.978234076	0.979942662	0.17466021%
	TEDC	4756.810257 €/h	4138.222388 €/h	-13.00425781%
	TEAC	807.8152164 €/h	738.7696276 €/h	-8.54720083%
	TEOC	48,746,119.15 €	42,722,450.05 €	-12.35722802%
	AVwt	0.971458792	0.973304230	0.18996571%
	TEOCwt	51,361,346.65 €	45,329,811.09 €	-11.74333610%

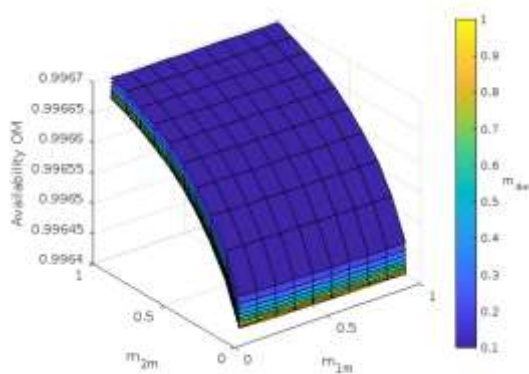
4.3 Επίδραση πολιτικών συντήρησης στη διαθεσιμότητα και το κόστος

Εκτός από τη σύγκριση των μέτρων αξιοπιστίας και απόδοσης τόσο για κάθε υποσύστημα όσο και για την ανεμογεννήτρια στην περίπτωση που εφαρμόζουμε ευκαιριακή συντήρηση με την περίπτωση που δεν έχουμε καμία ενέργεια ευκαιριακής συντήρησης, ενδιαφερόμαστε και για την επιρροή που έχουν οι βασικές παράμετροι των μοντέλων που παρουσιάστηκαν στη διαθεσιμότητα και το λειτουργικό κόστος. Ειδικότερα, ενδιαφερόμαστε για την επιρροή των ρυθμών συντήρησης στα παραπάνω μέτρα. Αυξάνοντας τους ρυθμούς συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} κατά 0.1 ξεκινώντας από την τιμή 0.1 έως την τιμή 1, υπολογίσαμε για κάθε υποσύστημα, για κάθε νέο ρυθμό συντήρησης, τη διαθεσιμότητα και το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας.

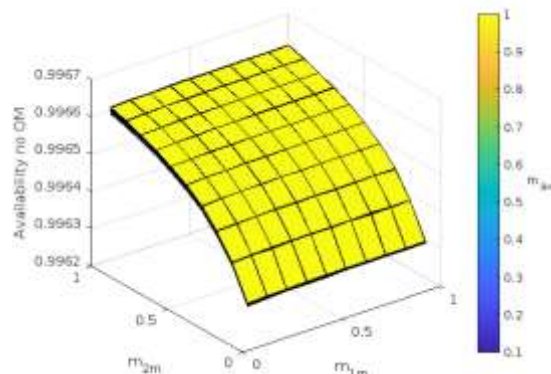
Το Γράφημα 1 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τα κύρια ρουλεμάν, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον κύριο άξονα αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} των κύριων ρουλεμάν είτε το m_{3m} του κύριου άξονα, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων η διαθεσιμότητα του υποσυστήματος αυξάνεται, διότι για το συγκεκριμένο στοιχείο, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής του, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης.

Το Γράφημα 2 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών

συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τα κύρια ρουλεμάν, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον κύριο άξονα αντίστοιχα. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{1m} των κύριων ρουλεμάν είτε το m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων είτε το m_{3m} του κύριου άξονα, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν άνοδο. Η άνοδος των τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι για τα συγκεκριμένα στοιχεία, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής τους, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης.



Γράφημα 1: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

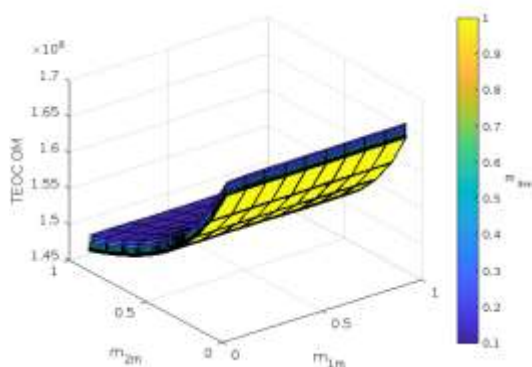


Γράφημα 2: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

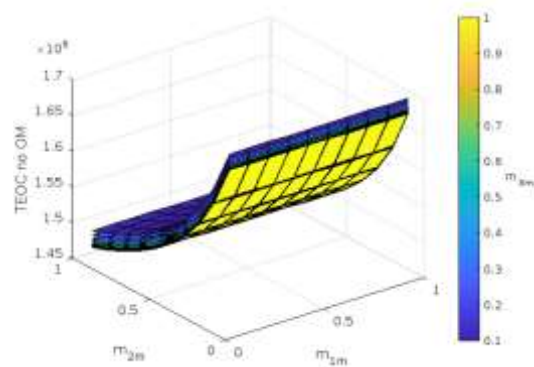
Το Γράφημα 3 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τα κύρια ρουλεμάν, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον κύριο άξονα αντίστοιχα. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{1m} των κύριων ρουλεμάν ξεκινώντας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας παρουσιάζει μικρή αύξηση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν

εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων είτε του m_{3m} του κύριου άξονα, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 4 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τα κύρια ρουλεμάν, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον κύριο άξονα αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} των κύριων ρουλεμάν είτε του m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων είτε του m_{3m} του κύριου άξονα, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας μειώνονται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.



Γράφημα 3: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

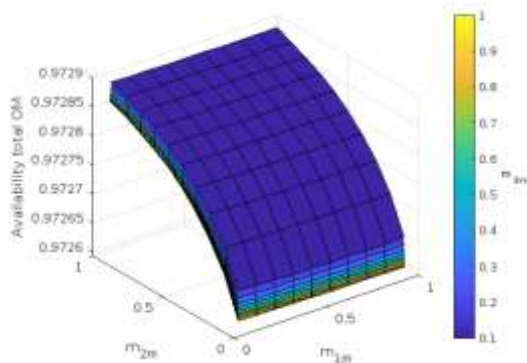


Γράφημα 4: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

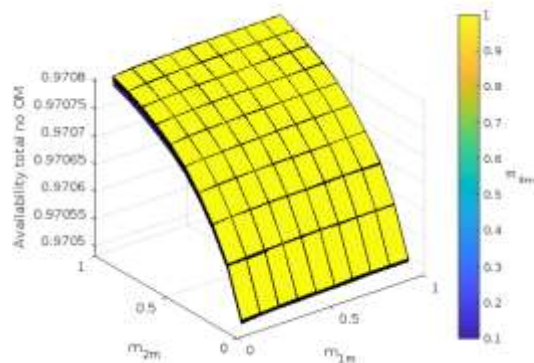
Το Γράφημα 5 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} των κύριων ρουλεμάν είτε το m_{3m} του κύριου άξονα, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν μείωση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται

μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων η συνολική διαθεσιμότητα αυξάνεται, διότι για το συγκεκριμένο στοιχείο, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής του, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης.

Το Γράφημα 6 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{1m} των κύριων ρουλεμάν είτε το m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων είτε το m_{3m} του κύριου άξονα, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν άνοδο. Η άνοδος των τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι για τα συγκεκριμένα στοιχεία, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής τους, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης.



Γράφημα 5: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης

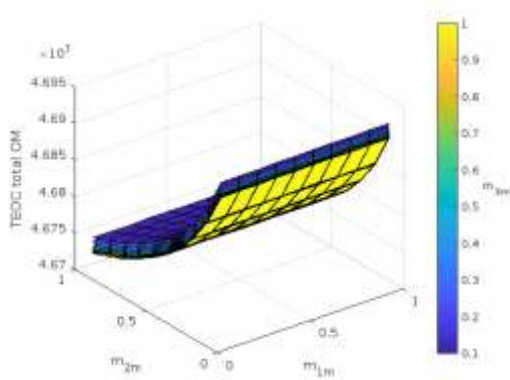


Γράφημα 6: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης

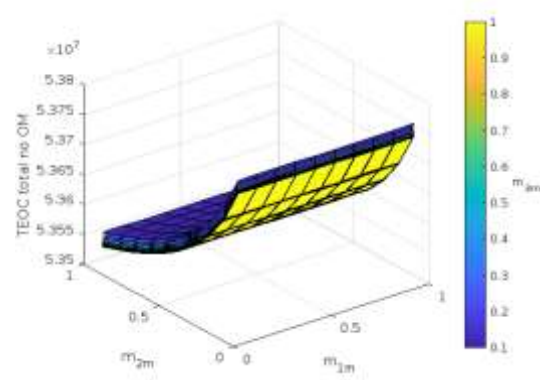
Το Γράφημα 7 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης. Αυξάνοντας τις

τιμές του m_{1m} των κύριων ρουλεμάν ξεκινώντας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας παρουσιάζει μικρή αύξηση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων είτε του m_{3m} του κύριου άξονα, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 8 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} των κύριων ρουλεμάν είτε του m_{2m} του κιβωτίου ταχυτήτων είτε του m_{3m} του κύριου άξονα, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας μειώνονται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.



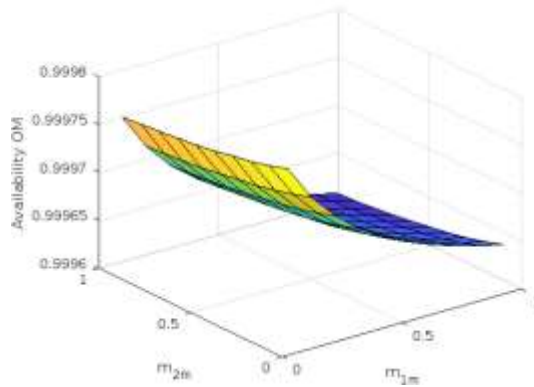
Γράφημα 7: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης



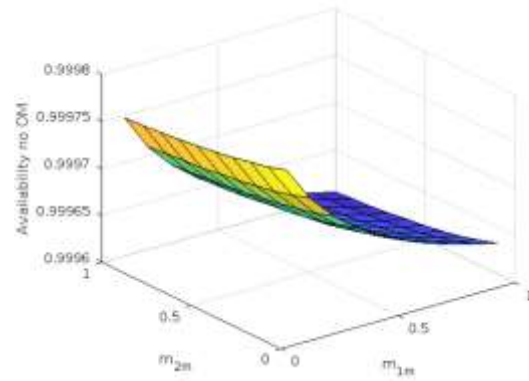
Γράφημα 8: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος μετάδοσης κίνησης

Το Γράφημα 9 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υδραυλικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον κινητήρα και τις βαλβίδες αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του κινητήρα είτε το m_{2m} των βαλβίδων, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 10 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υδραυλικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον κινητήρα και τις βαλβίδες αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 9.



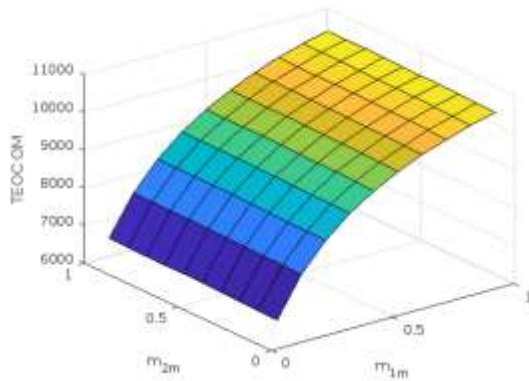
Γράφημα 9: Διαθεσιμότητα του υδραυλικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}



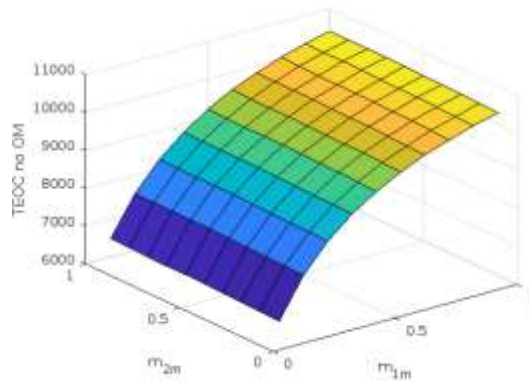
Γράφημα 10: Διαθεσιμότητα του υδραυλικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

Το Γράφημα 11 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υδραυλικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον κινητήρα και τις βαλβίδες αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του κινητήρα είτε του m_{2m} των βαλβίδων, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας παρουσιάζει μικρή αύξηση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 12 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υδραυλικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον κινητήρα και τις βαλβίδες αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 11.



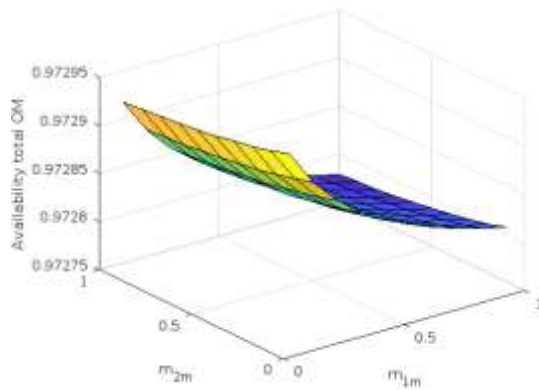
Γράφημα 11: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υδραυλικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}



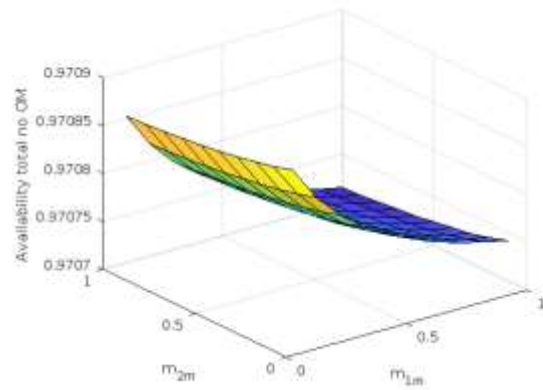
Γράφημα 12: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υδραυλικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

Το Γράφημα 13 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υδραυλικού υποσυστήματος. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του κινητήρα είτε το m_{2m} των βαλβίδων, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 14 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υδραυλικού υποσυστήματος. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 13.



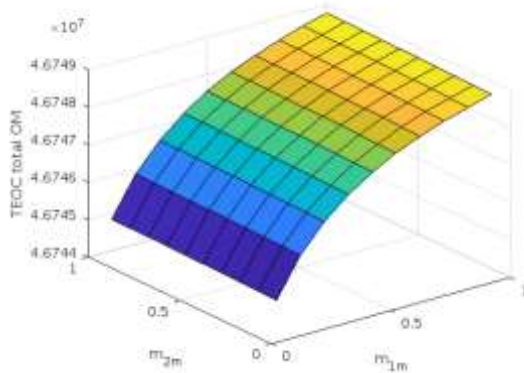
Γράφημα 13: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υδραυλικού υποσυστήματος



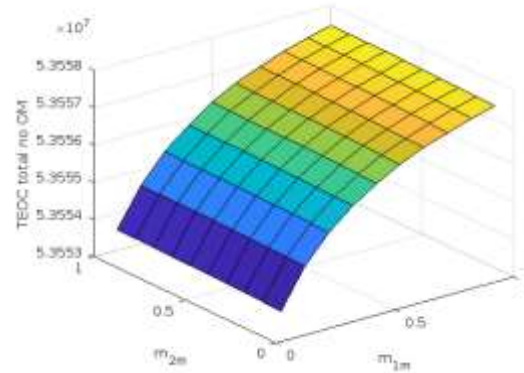
Γράφημα 14: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υδραυλικού υποσυστήματος

Το Γράφημα 15 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υδραυλικού υποσυστήματος. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του κινητήρα είτε του m_{2m} των βαλβίδων, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 16 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υδραυλικού υποσυστήματος. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 15.



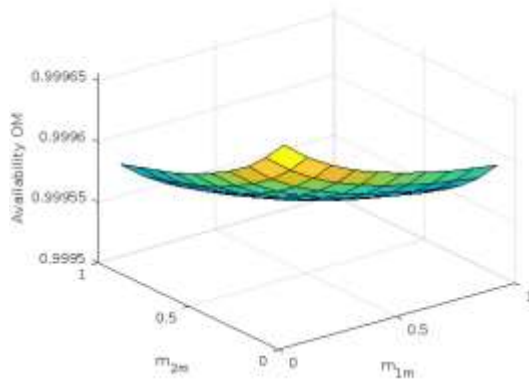
Γράφημα 15: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υδραυλικού υποσυστήματος



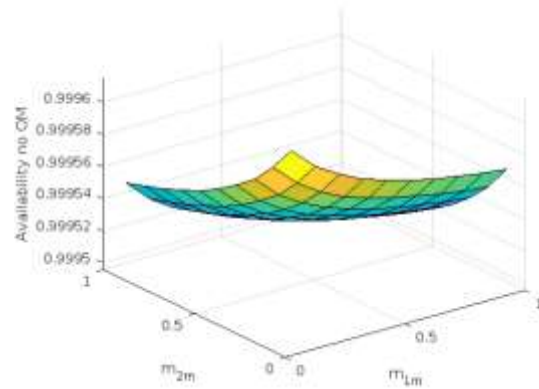
Γράφημα 16: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υδραυλικού υποσυστήματος

Το Γράφημα 17 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος πέδησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τις συμπιέσεις και τα δισκόφρενα αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} των συμπιέσεων είτε το m_{2m} των δισκόφρενων, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 18 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος πέδησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τις συμπιέσεις και τα δισκόφρενα αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 17.



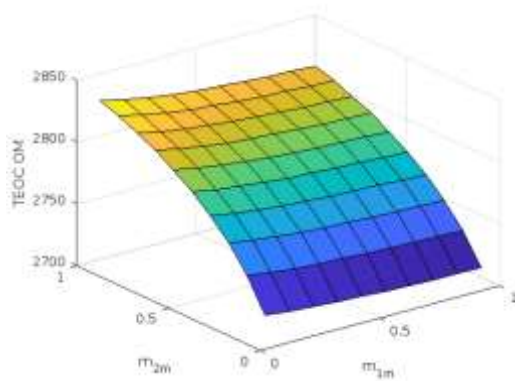
Γράφημα 17: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος πέδησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}



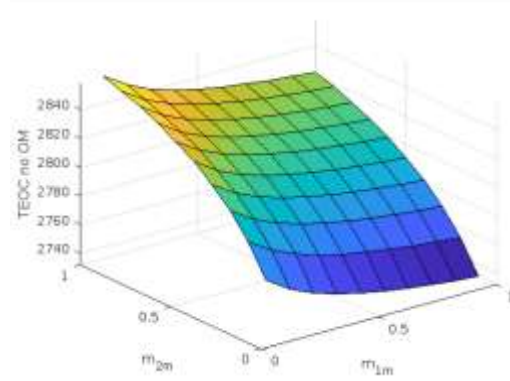
Γράφημα 18: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος πέδησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

Το Γράφημα 19 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος πέδησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τις συμπιέσεις και τα δισκόφρενα αντίστοιχα. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{1m} των συμπιέσεων, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{2m} των δισκόφρενων, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν άνοδο, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 20 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος πέδησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τις συμπιέσεις και τα δισκόφρενα αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 19.



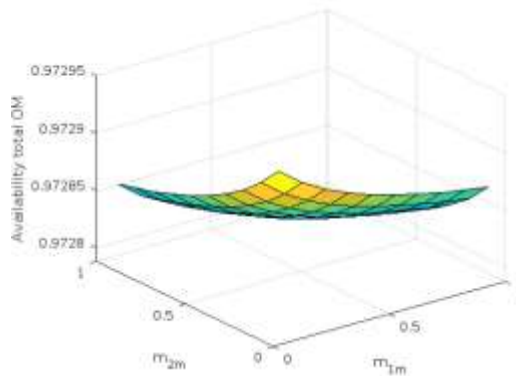
Γράφημα 19: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος πέδησης με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}



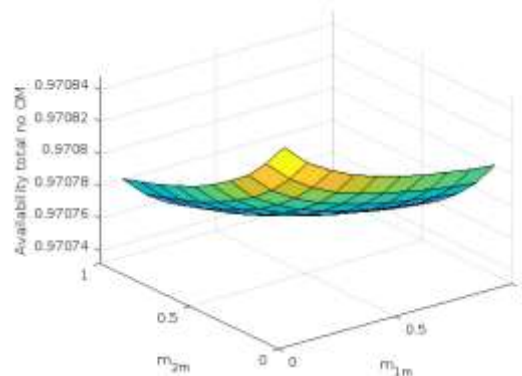
Γράφημα 20: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος πέδησης χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

Το Γράφημα 21 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} των συμπιέσεων είτε το m_{2m} των δισκόφρενων, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 22 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 21.



Γράφημα 21: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης

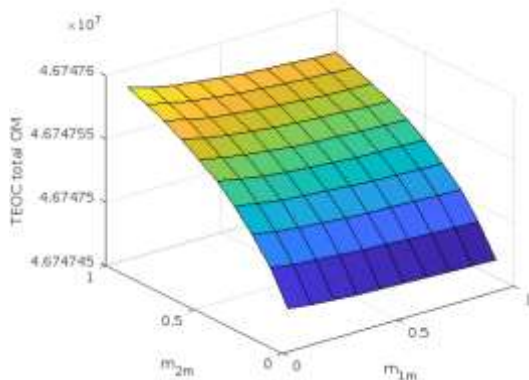


Γράφημα 22: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης

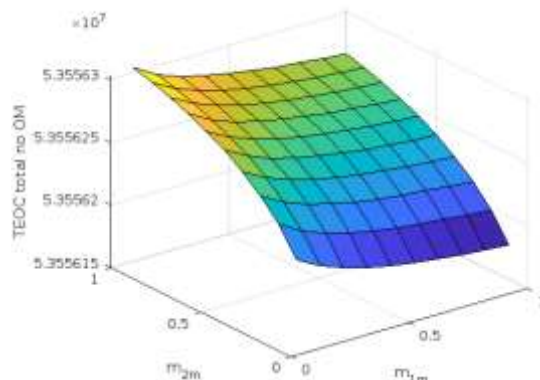
Το Γράφημα 23 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{1m} των συμπιέσεων, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{2m} των δισκόφρενων, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν άνοδο, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 24 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των

ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 23.



Γράφημα 23: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης

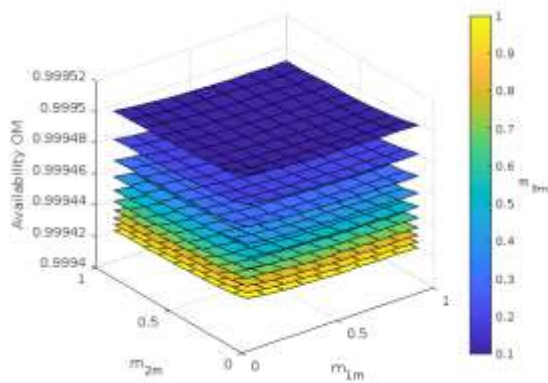


Γράφημα 24: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος πέδησης

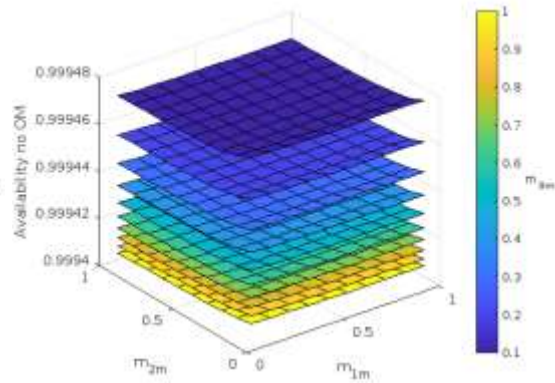
Το Γράφημα 25 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον υδραυλικό προωθητήρα, το ρουλεμάν και το φρένο περιστροφής αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε το m_{2m} του ρουλεμάν είτε το m_{3m} του φρένου περιστροφής, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 26 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των

ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον υδραυλικό προωθητήρα, το ρουλεμάν και το φρένο περιστροφής αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 25.



Γράφημα 25: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

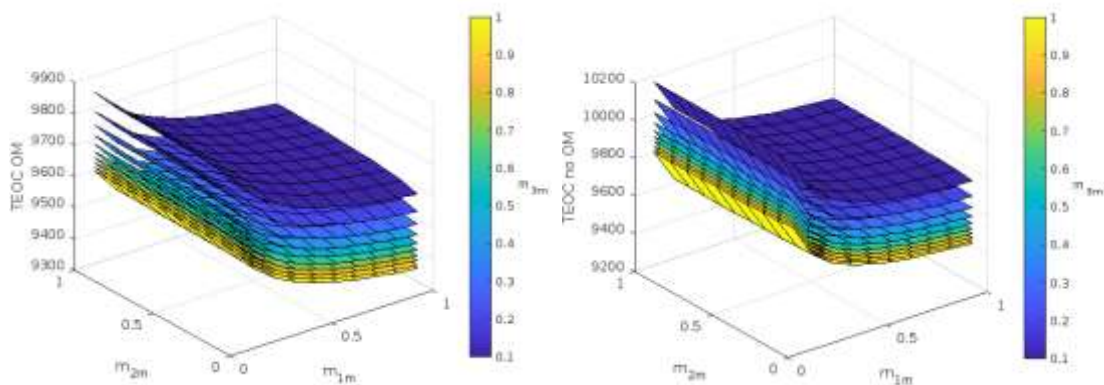


Γράφημα 26: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

Το Γράφημα 27 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον υδραυλικό προωθητήρα, το ρουλεμάν και το φρένο περιστροφής αντίστοιχα. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{2m} του ρουλεμάν, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν άνοδο, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε του m_{3m} του φρένου περιστροφής, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει

αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 28 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον υδραυλικό προωθητήρα, το ρουλεμάν και το φρένο περιστροφής αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε του m_{2m} του ρουλεμάν είτε του m_{3m} του φρένου περιστροφής, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.



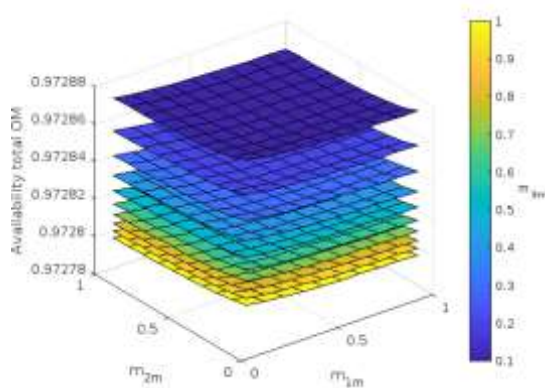
Γράφημα 27: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

Γράφημα 28: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

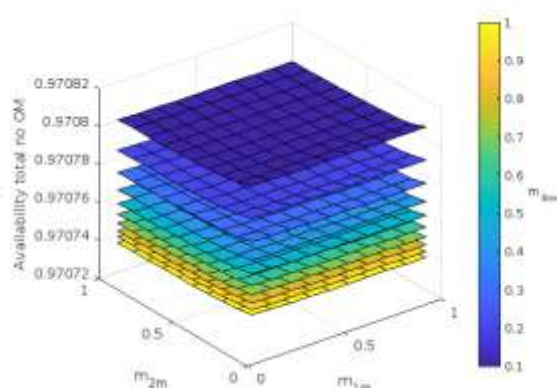
Το Γράφημα 29 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε το m_{2m} του ρουλεμάν είτε το m_{3m} του φρένου περιστροφής, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε

τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 30 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 29.



Γράφημα 29: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους

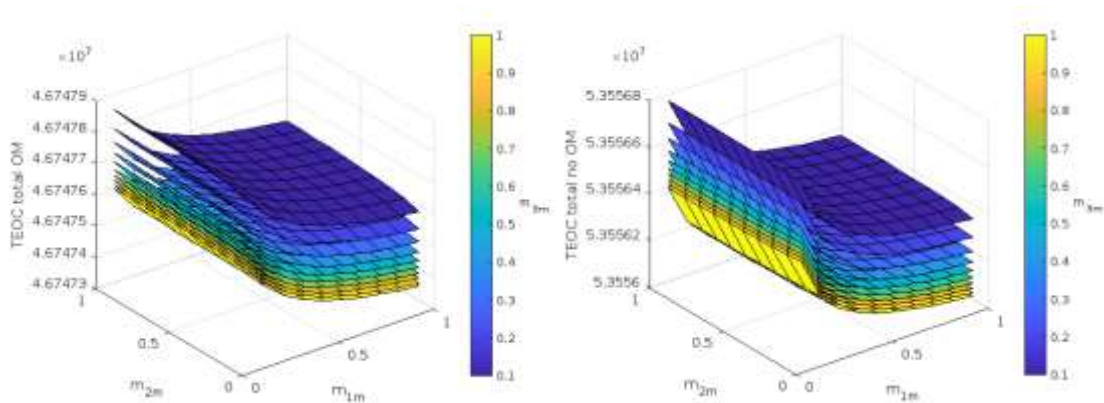


Γράφημα 30: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους

Το Γράφημα 31 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{2m} του ρουλεμάν, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν άνοδο, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι

παρουσιάζεται αύξηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε του m_{3m} του φρένου περιστροφής, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 32 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε του m_{2m} του ρουλεμάν είτε του m_{3m} του φρένου περιστροφής, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας μειώνονται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.



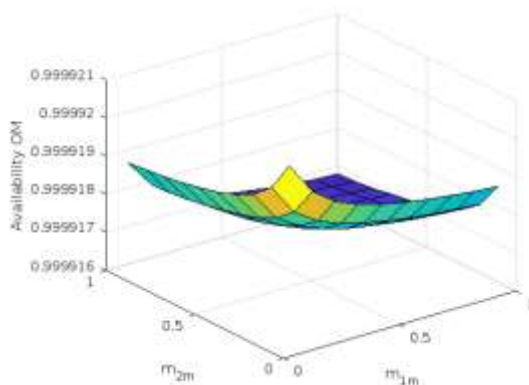
Γράφημα 31: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους

Γράφημα 32: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος οριζόντιας περιστροφής του κελύφους

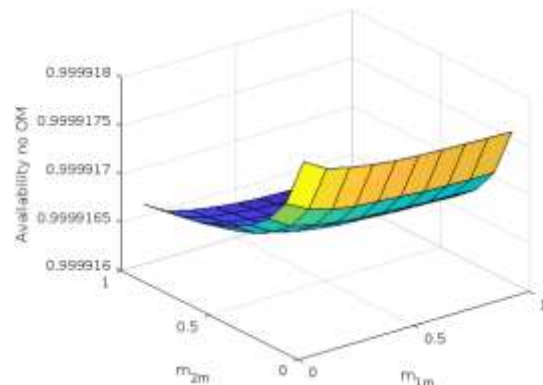
Το Γράφημα 33 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών

συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον υδραυλικό προωθητήρα και το ρουλεμάν αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε το m_{2m} του ρουλεμάν, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 34 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον υδραυλικό προωθητήρα και το ρουλεμάν αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 32.



Γράφημα 33: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

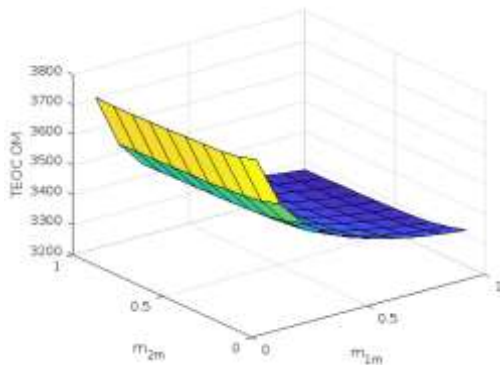


Γράφημα 34: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

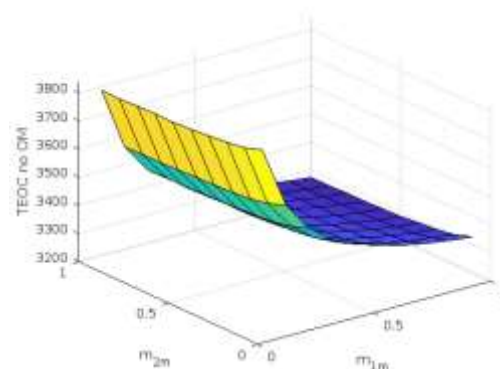
Το Γράφημα 35 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον υδραυλικό προωθητήρα και το ρουλεμάν αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του υδραυλικού

προωθητήρα είτε του m_{2m} του ρουλεμάν, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 36 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} για τον υδραυλικό προωθητήρα και το ρουλεμάν αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 35.



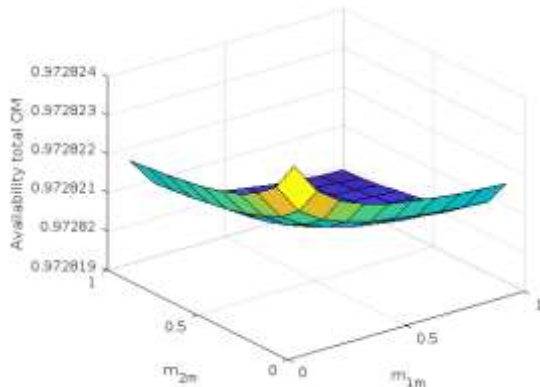
Γράφημα 35: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}



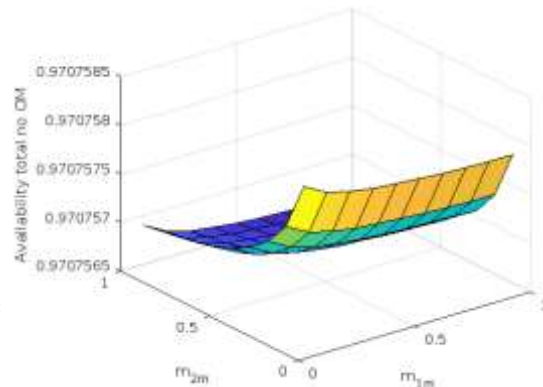
Γράφημα 36: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m}

Το Γράφημα 37 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} υδραυλικού προωθητήρα είτε το m_{2m} του ρουλεμάν, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν μείωση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 38 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 37.



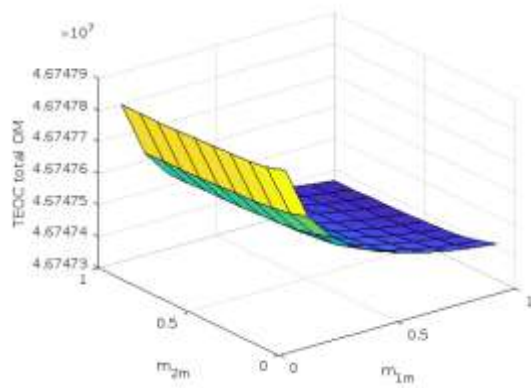
Γράφημα 37: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων



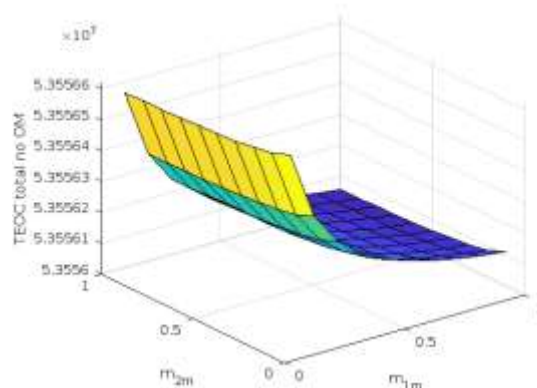
Γράφημα 38: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων

Το Γράφημα 39 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του υδραυλικού προωθητήρα είτε του m_{2m} του ρουλεμάν, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 40 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 39.



Γράφημα 39: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσεων των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων

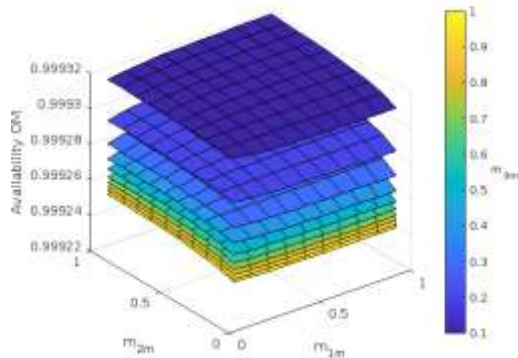


Γράφημα 40: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσεων των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} του υποσυστήματος περιστροφής πτερυγίων

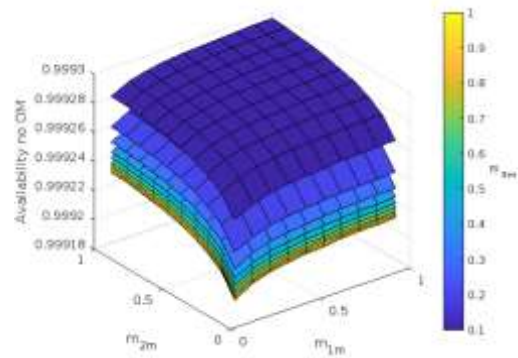
Το Γράφημα 41 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του ηλεκτρικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσεων των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για την γεννήτρια, τον μετατροπέα συχνότητας και τον μετασχηματιστή αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} της γεννήτριας είτε το m_{2m} του μετατροπέα συχνότητας, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του συστήματος παρουσιάζουν άνοδο, διότι για τα συγκεκριμένα στοιχεία, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής του, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης.

Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{3m} του μετασχηματιστή, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 42 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του ηλεκτρικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για την γεννήτρια, τον μετατροπέα συχνότητας και τον μετασχηματιστή αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 41.



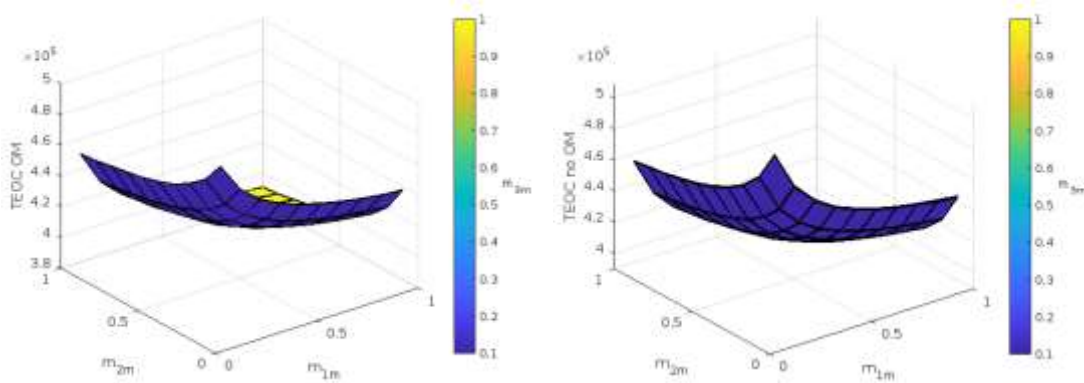
Γράφημα 41: Διαθεσιμότητα του ηλεκτρικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}



Γράφημα 42: Διαθεσιμότητα του ηλεκτρικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

Το Γράφημα 43 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για την γεννήτρια, τον μετατροπέα συχνότητας και τον μετασχηματιστή αντίστοιχα. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{3m} του μετασχηματιστή, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν άνοδο διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} της γεννήτριας είτε του m_{2m} του μετατροπέα, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 44 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για την γεννήτρια, τον μετατροπέα συχνότητας και τον μετασχηματιστή αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 43.



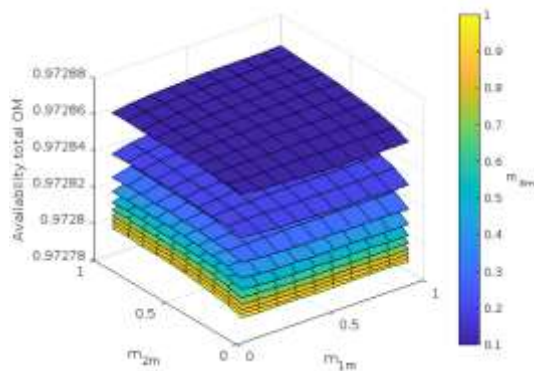
Γράφημα 43: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού υποσυστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

Γράφημα 44: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού υποσυστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

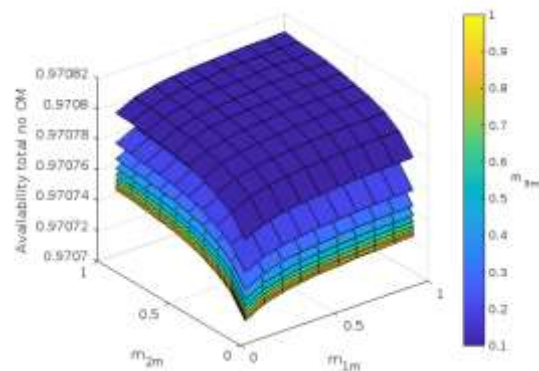
Το Γράφημα 45 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} της γεννήτριας είτε το m_{2m} του μετατροπέα συχνότητας, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν άνοδο, διότι για το συγκεκριμένο στοιχείο, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής του, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{3m} του μετασχηματιστή, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν μείωση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς

όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 46 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 45.



Γράφημα 45: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος

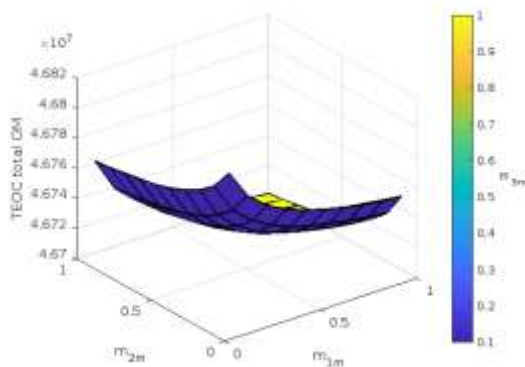


Γράφημα 46: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος

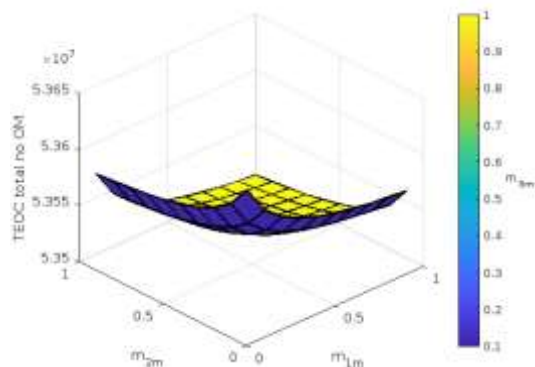
Το Γράφημα 47 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{3m} του μετασχηματιστή, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας παρουσιάζει μικρή αύξηση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} της γεννήτριας είτε του m_{2m} του μετατροπέα συχνότητας, οι τιμές

του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 48 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 47.



Γράφημα 47: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος

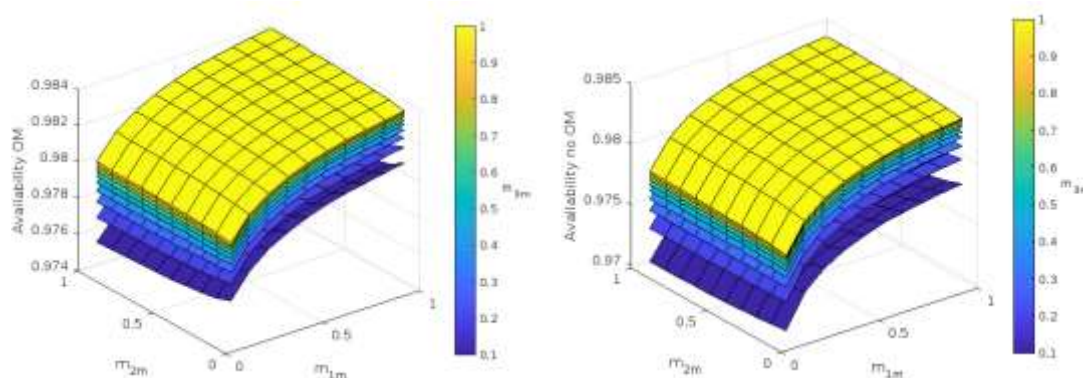


Γράφημα 48: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του ηλεκτρικού υποσυστήματος

Το Γράφημα 49 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος δομής με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον πύργο, το κέλυφος και τα θεμέλια αντίστοιχα. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του πύργου είτε το m_{3m} των θεμελίων, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του συστήματος παρουσιάζουν άνοδο, διότι για τα συγκεκριμένα στοιχεία, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής του, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{2m} του κελύφους, παρατηρείται ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας του υποσυστήματος παρουσιάζουν πτώση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι

παρουσιάζεται μείωση της διαθεσιμότητας, η διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 50 απεικονίζει τη διαθεσιμότητα του υποσυστήματος δομής χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον πύργο, το κέλυφος και τα θεμέλια αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 49.



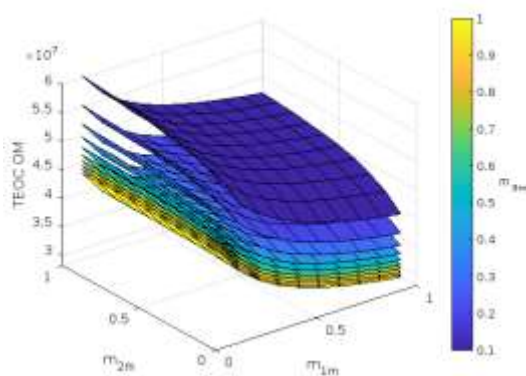
Γράφημα 49: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος δομής με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

Γράφημα 50: Διαθεσιμότητα του υποσυστήματος δομής χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

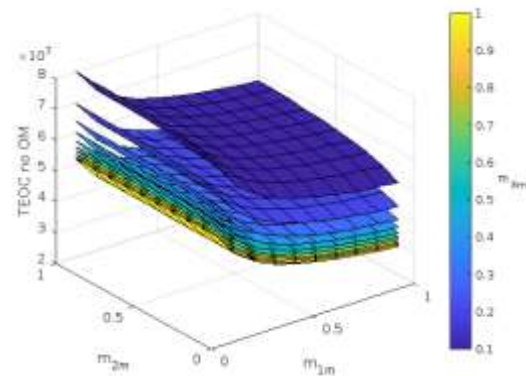
Το Γράφημα 51 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος δομής με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον πύργο, το κέλυφος και τα θεμέλια αντίστοιχα. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{2m} του κελύφους, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν άνοδο, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του πύργου είτε του m_{3m} των θεμελίων, οι τιμές του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 52 αφορά το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος δομής χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} για τον πύργο, το κέλυφος και τα θεμέλια αντίστοιχα. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 51.



Γράφημα 51: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος δομής με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

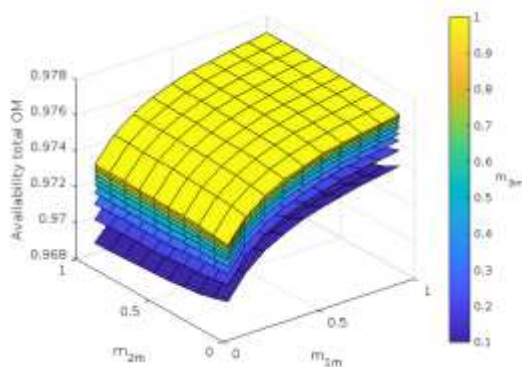


Γράφημα 52: Αναμενόμενο κόστος λειτουργίας του υποσυστήματος δομής χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m}

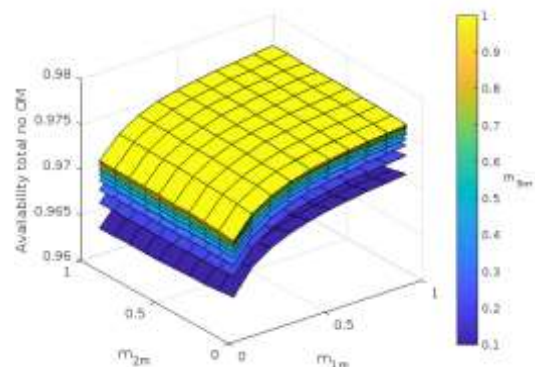
Το Γράφημα 53 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής. Αυξάνοντας είτε το ρυθμό συντήρησης m_{1m} του πύργου είτε το m_{3m} των θεμελίων, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν άνοδο. Η άνοδος των τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι για τα συγκεκριμένα στοιχεία, σύμφωνα με τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, μας ωφελεί η αύξηση του ρυθμού συντήρησής τους, καθυστερώντας έτσι την εμφάνιση βλάβης. Αυξάνοντας το ρυθμό συντήρησης m_{2m} του κελύφους, παρατηρείται ότι οι τιμές της συνολικής διαθεσιμότητας παρουσιάζουν μείωση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση των συγκεκριμένων στοιχείων, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας

να θέτουμε τα συγκεκριμένα στοιχεία συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται μείωση της συνολικής διαθεσιμότητας, η συνολική διαθεσιμότητα με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μεγαλύτερη από αυτή χωρίς ευκαιριακή συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται.

Το Γράφημα 54 απεικονίζει τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} και m_{3m} του υποσυστήματος δομής. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 53.



Γράφημα 53: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής

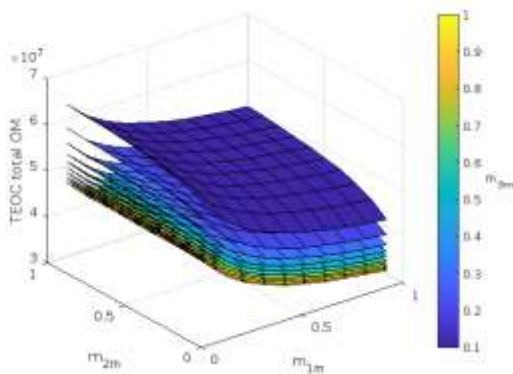


Γράφημα 54: Συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής

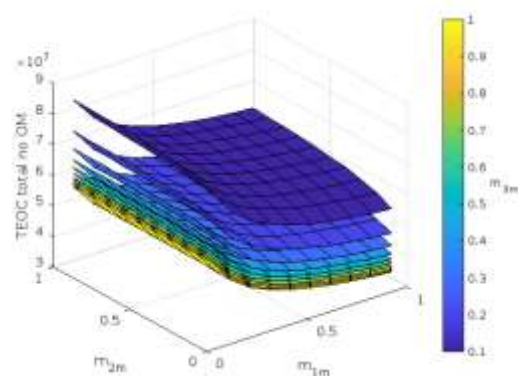
Το Γράφημα 55 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής. Αυξάνοντας τις τιμές του m_{2m} του κελύφους, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας παρουσιάζει μικρή αύξηση, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Παρατηρώντας και τους υπόλοιπους ρυθμούς μετάβασης, δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το συγκεκριμένο στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζεται αύξηση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας με ευκαιριακή συντήρηση παραμένει μικρότερο από αυτό χωρίς ευκαιριακή

συντήρηση, καθώς όταν εφαρμόζεται ευκαιριακή συντήρηση το υποσύστημα επιστρέφει σε καλύτερη κατάσταση από ότι όταν δεν εφαρμόζεται. Αυξάνοντας είτε τις τιμές του m_{1m} του πύργου είτε του m_{3m} των θεμελίων, οι τιμές του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας παρουσιάζουν μείωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Το Γράφημα 56 αφορά το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής. Ακολουθεί όμοια επεξήγηση με αυτή του Γραφήματος 55.



Γράφημα 55: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος με τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής



Γράφημα 56: Συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος χωρίς τη χρήση ευκαιριακής συντήρησης συναρτήσει των ρυθμών συντήρησης m_{1m} , m_{2m} , m_{3m} του υποσυστήματος δομής

5. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές έρευνας

5.1 Συμπεράσματα

Για την υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας ακολουθήσαμε τη μεθοδολογία της δευτερογενούς έρευνας και τη μεθοδολογία της βιβλιογραφικής έρευνας (Critical Review of the Literature). Ειδικότερα, πραγματοποιήσαμε δευτερογενή έρευνα με συλλογή δεδομένων από διαθέσιμα επιστημονικά άρθρα και βιβλιογραφική έρευνα (Ozturk et al., 2018). Στη συνέχεια, για τη δημιουργία των Μαρκοβιανών μοντέλων προχωρήσαμε στην κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων της βιβλιογραφίας. Ακολούθως, χρησιμοποιήσαμε το περιβάλλον προγραμματισμού “MATLAB” για να υπολογίσουμε την ασυμπτωτική κατανομή πιθανότητας κάθε κατάστασης, όπως και για να υπολογίσουμε τη διαθεσιμότητα και το αναμενόμενο λειτουργικό κόστος για κάθε υποσύστημα της ανεμογεννήτριας όπως και για την ανεμογεννήτρια.

Έτσι, οδηγούμαστε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων σχετικά με τον αν κάθε υποσύστημα καθώς και η ανεμογεννήτρια ωφελείται ή όχι από την ευκαιριακή συντήρηση και συμπεραίνουμε πως πράγματι υπάρχει όφελος από την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 46, κάθε υποσύστημα όπως και η ανεμογεννήτρια παρουσίασαν υψηλότερη διαθεσιμότητα και χαμηλότερο αναμενόμενο κόστος λειτουργίας στην περίπτωση που εφαρμόστηκε ευκαιριακή συντήρηση έναντι της περίπτωσης μη εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης, λόγω του ότι η κατάσταση στην οποία επιστρέφει το υποσύστημα έπειτα από ευκαιριακή συντήρηση είναι καλύτερη από αυτή χωρίς την εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης και το κόστος συντήρησης είναι εμφανώς πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 4.3 αυξήσαμε τους ρυθμούς συντήρησης των στοιχείων των υποσυστημάτων κατά 0.1 ξεκινώντας από την τιμή 0.1 έως την τιμή 1, και παρουσιάσαμε για κάθε υποσύστημα, για κάθε νέο ρυθμό συντήρησης, πώς μεταβάλλονται οι τιμές της διαθεσιμότητας και του αναμενόμενου κόστους λειτουργίας. Η μείωση των τιμών της διαθεσιμότητας όταν αυξάνεται ο ρυθμός συντήρησης ενός στοιχείου του υποσυστήματος δικαιολογείται από το γεγονός ότι το υποσύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας, μέσω της συντήρησης, συχνότερα από όσο

πραγματικά χρειάζεται. Αντιθέτως, η άνοδος των τιμών της διαθεσιμότητας οφείλεται στο γεγονός ότι καθυστερεί η εμφάνιση βλάβης. Το συνολικό αναμενόμενο κόστος λειτουργίας, αυξάνεται, όταν αυξάνουμε το ρυθμό συντήρησης ενός στοιχείου του υποσυστήματος, διότι θέτουμε το υποσύστημα εκτός λειτουργίας, πραγματοποιώντας συντήρηση του συγκεκριμένου στοιχείου, συχνότερα από όσο πραγματικά χρειάζεται. Αντιθέτως, ο λόγος που συμβαίνει μείωση του συνολικού αναμενόμενου κόστους λειτουργίας, αποδίδεται στο ότι το κόστος συντήρησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος αντικατάστασης.

Επομένως, για κάθε στοιχείο που η διαθεσιμότητά του μειώνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός συντήρησής του, συμπεραίνουμε πως δεν είναι συμφέρον από πλευράς διαθεσιμότητας να θέτουμε το εκάστοτε στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Αντιστοίχως, για κάθε στοιχείο που το συνολικό αναμενόμενο κόστος του αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός συντήρησής του, συμπεραίνουμε πως δεν είναι συμφέρον από πλευράς κόστους να θέτουμε το εκάστοτε στοιχείο συχνά σε συντήρηση. Μελλοντικά, προτείνεται να λυθεί πρόβλημα βελτιστοποίησης έτσι ώστε να απαντηθεί το ερώτημα πότε ακριβώς με συμφέρει και πότε όχι η εφαρμογή ευκαιριακής συντήρησης

Με βάση τα παραπάνω, η Διπλωματική Εργασία παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή ή όχι ευκαιριακής συντήρησης σε κάθε ένα από τα βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας.

5.2 Μελλοντικές προοπτικές έρευνας

Μια ενδιαφέρουσα προοπτική για μελλοντική έρευνα, που προκύπτει από την παρούσα Διπλωματική Εργασία, είναι η εκτενέστερη εξέταση της εφαρμογής της ευκαιριακής συντήρησης στα κύρια υποσυστήματα των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας Ημι-Μαρκοβιανά μοντέλα. Σε μια Ημι-Μαρκοβιανή αλυσίδα η πιθανότητα μετάβασης από μια κατάσταση σε μια άλλη μπορεί να εξαρτάται από το χρόνο που έχει περάσει από την τελευταία μετάβαση και να μην εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα κατάσταση, επιτρέποντας μια περιπλοκότερη μοντελοποίηση. Σημαντική προσθήκη σε αυτήν την έρευνα θα ήταν η ανάλυση μη εκθετικών κατανομών, καθώς αυτό μπορεί να αντικατοπτρίσει πιο ρεαλιστικά την πραγματική συμπεριφορά των υποσυστημάτων.

Επιπρόσθετα, μπορεί να επιδιωχθεί μια πιο λεπτομερή ανάλυση των καταστάσεων υποβάθμισης που υφίστανται τα στοιχεία των ανεμογεννητριών. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη διερεύνηση των ορίων αντοχής των υποσυστημάτων, καθώς και τη συλλογή δεδομένων στο πεδίο για να γίνει ακόμη πιο κατανοητή η εξέλιξη της κατάστασης των υποσυστημάτων.

Τέλος, η έρευνα μπορεί να επεκταθεί στην επίλυση των βέλτιστων πολιτικών συντήρησης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι βελτιστοποίησης για να προταθούν στρατηγικές συντήρησης που λαμβάνουν υπόψη το κόστος, την απόδοση και τη βιωσιμότητα. Αυτό θα βοηθήσει τους φορείς λήψης αποφάσεων να εξετάσουν καλύτερα πώς να διαχειριστούν τη συντήρηση των ανεμογεννητριών για βέλτιστα αποτελέσματα.

Συνοψίζοντας, αυτές οι προοπτικές έρευνας θα επεκτείνουν και θα εμβαθύνουν την κατανόηση της συντήρησης ανεμογεννητριών, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών συντήρησης και την αύξηση της απόδοσης των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- B. Le and J. Andrews. (2016). "Modelling wind turbine degradation and maintenance". *Wind Energy*, 19, pp. 571-591. doi:<https://doi.org/10.1002/we.1851>
- B. Navinkumar, K.M. Parammasivam, S. Rajendran and V. Mohanavel. (2021). "CFD analysis of horizontal axis wind turbine braking system using chordwise spacing". *Materials Today: Proceedings*, 37, pp. 542-552. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.564>
- C. Zhang, W. Gao, S. Guo, Y. Li and T. Yang. (2017). "Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance". *Renewable Energy*, 103, pp. 606-612. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.072>
- D. Song, L. Li, J. Yang and Y. H. Joo. (2019). "A Model predictive control for the yaw control system of horizontal-axis wind turbines". *Energy Procedia*, 158, pp. 237-242. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.082>
- F. Besnard, M. Patriksson, A.-B. Strömberg, A. Wojciechowski and L. Bertling. (2009). "An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system". *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1-7. doi:10.1109/PTC.2009.5281868
- F. Ding and Z. Tian. (2012). "Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds". *Renewable Energy*, 45, pp. 175-182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.030>
- H. Abdollahzadeh, K. Atashgar and M. Abbasi. (2016). "Multi-objective opportunistic maintenance optimization of a wind farm considering limited number of maintenance groups". *Renewable Energy*, 88, pp. 247-261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.022>
- H. Li, P. Li, N. Gao, L. Niu, Y. Zhang, Y. Bao and W. Xu. (2018). "Opportunistic Maintenance Model for Wind Turbine Based on Reliability Constraint". *Materials Science and Engineering*, 366. doi:10.7667/PSPC161505
- J. Carroll, A. McDonald and D. McMillan. (2016). "Failure Rate, Repair Time and Unscheduled O&M Cost Analysis of Offshore Wind Turbines". *Wind Energy*, 19(6), pp. 1107-1119. doi:<https://doi.org/10.1002/we.1887>

- M. Li, X. Jiang and R. R. Negenborn. (2021). "Opportunistic maintenance for offshore wind farms with multiple-component age-based preventive dispatch". *Ocean Engineering*, 231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109062>
- M. Shafiee, M. Finkelstein and C. Bérenguer. (2015). "An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks". *Reliability Engineering and System Safety*, 142, pp. 463-471. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.001>
- Mishnaevsky Jr., L. (2019). "Repair of wind turbine blades: Review of methods and related computational mechanics problems". *Renewable Energy*, 140, pp. 828-839. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.113>
- Nationalgrid. (2022, March 30). Retrieved from <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy>
- P. Zhou and P.T. Yin. (2019). "An opportunistic condition-based maintenance strategy for offshore wind farm based on predictive analytics". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.049>
- S. Koukoura, M. N. Scheu and A. Kolios. (2021). "Influence of extended potential-to-functional failure intervals through condition monitoring systems on offshore wind turbine availability". *Reliability Engineering & System Safety*, 208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107404>
- S. Ozturk, V. Fthenakis and S. Faulstich. (2018). "Failure Modes, Effects and Criticality Analysis for Wind Turbines Considering Climatic Regions and Comparing Geared and Direct Drive Wind Turbines". *Energies*, 11. doi:[10.20944/preprints201807.0602.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201807.0602.v1)
- Sangroudi, H. (2018). "Wind Power Performance Optimization Considering Redundancy and Opportunistic Maintenance". *MENDEL*, 24(1), pp. 55-62. doi:[10.13164/mendel.2018.1.055](https://doi.org/10.13164/mendel.2018.1.055)
- V.P. Koutras, S. Malefaki and A.N. Platis. (2017). "Optimization of the dependability and performance measures of a generic model for multi-state deteriorating

- systems under maintenance". *Reliability Engineering and System Safety*, 166, pp. 73-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.01.002>
- WindEurope. (2023, June 15). Retrieved from <https://windeurope.org/about-wind/wind-basics/#wind-turbine>
- WWEA. (2022, March 18). Retrieved from <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/>
- Διαλυνάς, Ε. (2016). "Ανάλυση και Υπολογισμός των Δεικτών Αξιοπιστίας Λειτουργίας των Τεχνολογικών Συστημάτων". Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ.
- Φακίνος, Δ. (2007). "ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ" (Β' εκδ.). Αθήνα: ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- Χρυσάφινου, Ο. (2016). "ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΕΛΙΞΕΙΣ". Θεσσαλονίκη: σοφία.