



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας

Διπλωματική Εργασία

«Μελέτη Αξιοπιστίας ανεμογεννήτριας : μοντελοποίηση
βασικού εξοπλισμού με δυναμικά μοντέλα»

Μαρίνα Αντωνίου

Επιβλέπων καθηγητής : Αγάπιος Πλατής

Πάτρα, Ιούνιος 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Αντωνίου Μαρίνας που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ Αγάπιο Πλατή για την βοήθεια και την καθοδήγηση του. Επίσης να ευχαριστήσω τον κ Παναγιώτη Ψωμά για την βοήθεια του.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και στους φίλους μου και ιδιαίτερα στην μητέρα μου και στον σύζυγο μου που με στήριξαν και με βοήθησαν σε όλη την πορεία μου

Περίληψη

Η μελέτη και η αξιολόγηση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού αποτελεί ένα μεγάλο αντικείμενο μελέτης σε όλο το εύρος της σημερινής βιομηχανίας. Η βλάβη και η αστοχία ενός μηχανήματος ή εξοπλισμού αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα της παραγωγικής διαδικασίας. Με την μελέτη αξιοπιστίας προσπαθούμε να προβλέψουμε την ωφέλιμη ζωή των εξαρτημάτων του εξοπλισμού αλλά και το κόστος συντήρησης για την ομαλή λειτουργία του.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη αξιοπιστίας μιας ανεμογεννήτριας με σκοπό των υπολογισμό των στάσιμων πιθανοτήτων λειτουργίας και αστοχίας και στην συνέχεια την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Έγινε μελέτη του συστήματος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας η οποία διαχωρίστηκε σε 4 μέρη α) Θεμέλια-Πύργος, β) σύστημα λεπίδων, γ) ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μέρη και δ) σύστημα μετάδοσης κίνησης Gearbox.

Στην συνέχεια για το κάθε μέρος παρουσιάστηκε αναλυτική μελέτη τρόπων αστοχίας και έγινε εφαρμογή δέντρων βλαβών σε κάθε ένα από αυτά.

Λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος έγινε η επιλογή του συστήματος μετάδοσης κίνησης (Gearbox) για περαιτέρω ανάλυση.

Με την χρήση Μαρκοβιανών μοντέλων έγινε ο υπολογισμός των στάσιμων πιθανοτήτων και η ανάλυση της διαθεσιμότητας του συστήματος. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα matlab .

Τέλος έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων σχετικά με την διαθεσιμότητα του συστήματος του gearbox.

Λέξεις-Κλειδιά

Ανεμογεννήτρια, Δέντρο Σφαλμάτων , Μαρκοβιανά μοντέλα , αξιοπιστία

«Wind turbine reliability study: modelling of basic equipment with dynamic models»

Marina Antoniou

Abstract

The study and evaluation of equipment reliability is a major area of study across the breadth of today's industry. Failure and breakdown of a machine or equipment is one of the major problems in the production process. Reliability study tries to predict the useful life of the equipment components and the maintenance cost for its smooth operation.

The subject of this paper is the reliability study of a wind turbine in order to calculate the stationary probabilities of operation and failure and then analyze the results.

A study of the wind turbine operating system was carried out which was divided into 4 parts a) Foundation-Tower, b) Blade system, c) Electrical and electronic parts and d) Gearbox transmission system.

A detailed failure mode study was made and then presented for each part and fault trees were applied to each of them.

Due to the complexity of the system, the transmission system (Gearbox) was selected for further analysis.

Using Markovian models, the stationary probabilities were calculated and the availability analysis of the system was performed. The computer program matlab was used to extract the results.

Finally, the results regarding the availability of the gearbox system were analyzed.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Περιεχόμενα.....	6
Κατάλογος Πινάκων	8
1.Εισαγωγή.....	9
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία αιολικής ενέργειας.....	9
1.2 Πλεονεκτήματα Αιολικής ενέργειας.....	11
2. Ανάλυση ανεμογεννήτριας	12
2.1 Περιγραφή λειτουργίας ανεμογεννήτριας.....	12
2.2 Ιστορική εξέλιξη.....	12
2.3 Τύποι Ανεμογεννητριών.....	12
2.3.1 Απόδοση Ανεμογεννήτριας.....	13
2.4 Τα βασικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας.....	14
2.4.1 Θεμέλια και πύργος	14
2.4.2 Σύστημα Λεπίδων.....	14
2.4.3 Ηλεκτρικά και ηλεκτρονική μέρη	15
2.4.4 Σύστημα Μετάδοσης (Gearbox).....	15
2.5 Τρόπος λειτουργίας Ανεμογεννήτριας.....	15
3.Συντήρηση και αξιοπιστία.....	17
3.1 Έννοια του συστήματος.....	17
3.2 Ορισμός Συντήρησης-Σκοποί Συντήρησης.....	17
3.3 Αξιοπιστία-Διαθεσιμότητα	18
4 Μελέτη τρόπων αστοχίας – εφαρμογή δέντρων βλαβών	19
4.1 Μοντέλα αξιοπιστίας	19
4.2 Δέντρα Σφαλμάτων (FT)	19
4.2.1 Κατασκευή και ανάλυση δέντρων σφαλμάτων	19
4.2.2 Ποσοτική Εκτίμηση γεγονότων ενός δέντρου σφαλμάτων	22
4.2.3 Ποσοτική και ποιοτική ανάλυση δέντρων σφαλμάτων	22
4.2.4 Ποσοτική ανάλυση	22
4.2.5 Ποιοτική ανάλυση	23
4.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα δέντρων σφαλμάτων.....	23

4.3 Δέντρα σφαλμάτων για τον εντοπισμό της πιθανότητας βλάβης για κάθε ένα από τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας	24
4.3.1 Θεμέλια και πύργος	25
4.3.2 Σύστημα Λεπίδων.....	28
4.3.3 Γεννήτρια , ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα	31
4.3.4 Σύστημα μετάδοσης κίνησης (GearBox)	34
4.4 Στάσιμες Πιθανότητες	38
5. Μαρκοβιανό Μοντέλο-διάγραμμα καταστάσεων	40
5.1 Ιστορική αναδρομή της μαρκοβιανής μοντελοποίησης	40
5.2 Μαρκοβιανές αλυσίδες.....	41
5.3 Μαρκοβιανές αλυσίδες σε διακριτό χρόνο	42
5.3.1 Εξισώσεις Chapman-Kolmogorov σε διακριτό χρόνο	43
5.3.2 Υπολογισμός Στάσιμων Πιθανοτήτων σε διακριτό χρόνο	43
5.4 Μαρκοβιανές αλυσίδες σε συνεχή χρόνο.....	45
5.4.1 Εξισώσεις Chapman-Kolmogorov συνεχούς χρόνου.....	45
5.4.2 Υπολογισμός Στάσιμων Πιθανοτήτων συνεχούς χρόνου.....	45
5.5 Μοντελοποίηση δεδομένων κιβωτίου ταχυτήτων	46
5.5.1 Συνάρτηση ρυθμού αποτυχιών ή ρυθμός βλάβης λ.....	47
6. Μαρκοβιανό μοντέλο (Gearbox).....	48
6.1 Μαρκοβιανό μοντέλο.....	48
6.2 Μελέτη Διαθεσιμότητας: Περίπτωση 1	48
6.2.1 Μεθοδολογία	50
6.2.2 Αποτελέσματα	54
6.3 Μελέτη Διαθεσιμότητας: Περίπτωση 2	56
6.3.1 Μεθοδολογία	56
6.3.2 Αποτελέσματα	58
6.4 Μελέτη Διαθεσιμότητας: Περίπτωση 3	59
6.4.1 Μεθοδολογία	59
6.4.1 Αποτελέσματα	60
7. Συμπεράσματα	62
Βιβλιογραφία	64
Παράρτημα.....	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Βασικά Σύμβολα δέντρων σφαλμάτων (Limnios Nikolaos.(2005).).....	21
Πίνακας 2 Θεμέλια και Πύργος.....	26
Πίνακας 3 Σύστημα Λεπίδων	29
Πίνακας 4 Γεννήτρια, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα	32
Πίνακας 5 Συστήματος μετάδοσης κίνησης (Gearbox).....	36
Πίνακας 6 Ρυθμοί επισκευών-βλαβών	49
Πίνακας 7 Πιθανότητες βασικών γεγονότων περίπτωση 1	53
Πίνακας 8 Πιθανότητες ενδιάμεσων και κορυφαίου γεγονότος, περίπτωση 1.....	54
Πίνακας 9 Ρυθμός επισκευής περίπτωση 2	56
Πίνακας 10 Πιθανότητες βασικών γεγονότων Περίπτωση 2	57
Πίνακας 11 Σύγκριση πιθανοτήτων Περίπτωση 1-Περίπτωση 2	57
Πίνακας 12 Πιθανότητες ενδιάμεσων και κορυφαίου γεγονότος, περίπτωση 2.....	58
Πίνακας 13 Σύγκριση διαθεσιμότητας Περίπτωση 1-Περίπτωση 2.....	59
Πίνακας 14 Ρυθμός Βλαβών Περίπτωση 3	59
Πίνακας 15 Πιθανότητες βασικών γεγονότων Περίπτωση 3	60
Πίνακας 16 Σύγκριση πιθανοτήτων Περίπτωση 1-Περίπτωση 3	60
Πίνακας 17 Πιθανότητες ενδιάμεσων και κορυφαίου γεγονότος, περίπτωση 3.....	61
Πίνακας 18 Σύγκριση διαθεσιμότητας Περίπτωση 1-Περίπτωση 2-Περίπτωση 3	61

1.Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία αιολικής ενέργειας

Η ενεργειακή κρίση και η εξάντληση των ορυκτών αποθεμάτων του πλανήτη έχουν κάνει πλέον απαραίτητη την στρόφη των κρατών σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας . Τα ορυκτά καύσιμα είναι μη ανανεώσιμα και οι σχετικές τιμές τους παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, ενώ, οι αυξανόμενες περιβαλλοντικές και κλιματικές ανησυχίες της σημερινής εποχής έχουν μετατοπίσει το επίκεντρο της έρευνας από τις συμβατικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές .Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, είναι καθαρές εναλλακτικές λύσεις στα ορυκτά καύσιμα. Μεταξύ αυτών, η αιολική ενέργεια είναι ένας από τους πιο υποσχόμενους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους στον κόσμο σήμερα. Τα κύρια πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας είναι οι μεγάλοι πόροι και οι χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Υπό αυτές τις συνθήκες, η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ως απάντηση στην αύξηση της τιμής του πετρελαίου περίπου εκείνη την εποχή, ξεκίνησαν ορισμένα κυβερνητικά προγράμματα με στόχο την ανάπτυξη κατάλληλων ανεμογεννητριών. Για να μειωθεί η εξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, οι σχετικές χώρες πραγματοποίησαν πολλά προγράμματα και επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη ανεμογεννητριών, ισχύος έως 4 MW και διαμέτρων έως 100 m

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας ανθίζει σε όλο τον κόσμο και σε ορισμένες χώρες, η εστίαση έχει μετατοπιστεί σταδιακά από τα χερσαία στα υπεράκτια αιολικά πάρκα . Σε παγκόσμια βάση, το μέγεθος της ετήσιας αγοράς αυξήθηκε κατά 42% σε ετήσια βάση το 2014, έναντι πτώσης 20% το 2013 . Μέχρι το τέλος του 2014, η σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς σκαρφάλωσε στα 372 GW .Η συγκεκριμένη βιομηχανία παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη, ιδίως στην Κίνα, τη Γερμανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Σε αυτές τις τρεις χώρες, η Κίνα είναι η μεγαλύτερη αγορά αιολικής ενέργειας στον κόσμο με 23,2 GW νέας αιολικής ενέργειας εγκατεστημένης το 2014. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 51.473 MW

και το μερίδιο της Κίνας είναι 45,1%. Με την εγκατάσταση όλο και περισσότερων ανεμογεννητριών, πολλά πιθανά προβλήματα πρέπει ακόμη να επιλυθούν, όπως η, οι αστοχίες, η παρακολούθηση της κατάστασης, η λειτουργία και η συντήρηση, τα οποία ισχύουν ιδιαίτερα στις σημερινές συνθήκες όπου το ύψος του πύργου, η διάμετρος του ρότορα και το συνολικό βάρος της ανεμογεννήτριας έχουν σχεδόν τετραπλασιαστεί σε μέγεθος και δυναμικότητα, ως εκ τούτου, η αξιοπιστία των ανεμογεννητριών καθίσταται σήμερα πιο σημαντική από ποτέ.

Επιπλέον, η αιολική ενέργεια έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη σε λίγες δεκαετίες, καθιστώντας την μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο σήμερα. Ωστόσο, θεωρείται ότι η αιολική ενέργεια είναι ακόμη ανώριμη στις μέρες μας. Λόγω της τεχνολογικής προόδου, των πολιτικών πρωτοβουλιών και των οικονομικών παραγόντων, η αιολική ενέργεια είναι πλέον σε θέση να συνεισφέρει με ανταγωνιστικό κόστος στις αυξανόμενες ενεργειακές μας ανάγκες. Για παράδειγμα, το 2014 λειτουργούσαν στον κόσμο πάνω από 240.000 ανεμογεννήτριες εμπορικού μεγέθους, οι οποίες παρήγαγαν το 4% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας . Η αιολική ενέργεια έδειξε τη δυνατότητα να αντικαταστήσει το φυσικό αέριο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βάσει κόστους. Οι τεχνολογικές καινοτομίες συνεχίζουν να οδηγούν σε νέες εξελίξεις στην εφαρμογή της αιολικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα, η σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς έχει ξεπεράσει τα 400 GW. Με τον αυξανόμενο αριθμό των ανεμογεννητριών, ο κλάδος εξακολουθεί να έχει να αντιμετωπίσει πολλές προκλήσεις. Ορισμένα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών είναι επιρρεπή σε βλάβες και η επισκευή ή η αντικατάστασή τους είναι δύσκολη και δαπανηρή. Για παράδειγμα, τα ρουλεμάν, οι μετατροπείς και τα κιβώτια ταχυτήτων εγείρουν ζητήματα συντήρησης. Ακόμα, οι προκλήσεις της αιολικής ενέργειας εξακολουθούν να υφίστανται λόγω: (1) την κακή απόδοση και αξιοπιστία και (2) την αύξηση του κόστους λόγω μεταφοράς, συντήρησης κ.λπ. Για την επίτευξη μεγαλύτερης διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών και τη μείωση του κόστους συντήρησης, η ανάπτυξη τεχνολογιών για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ανεμογεννητριών αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τη μελλοντική ανάπτυξη, ιδίως για τις υπεράκτιες

ανεμογεννήτριες. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθούν μέτρα για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ανεμογεννητριών. Cai-chao Zhu, Yao Li (2018)

1.2 Πλεονεκτήματα Αιολικής ενέργειας

1. Η αιολική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που σημαίνει ότι δεν εξαντλείται σε αντίθεση με άλλα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούμε αυτή την στιγμή
2. Στην χώρα μας διαθέτουμε υψηλό αιολικό δυναμικό, ιδιαίτερα στα νησιά εμφανίζονται σχεδόν όλο το χρόνο άνεμοι σημαντικής ταχύτητας και διάρκειας
3. Η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας και ήπια προς το περιβάλλον, η χρήση της δεν επιβαρύνει το οικοσύστημα της περιοχής που εγκαθίσταται η ανεμογεννήτριας σε αντίθεση με τις πηγές ενέργειας που μπορεί να αντικαταστήσει που είναι ιδιαίτερα ρυπογόνες όπως το κάρβουνο ή το πετρέλαιο
4. Τα οικονομικά πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν από την ευρεία χρήση της αιολικής ενέργειας λόγω της απεξάρτησης της χώρας μας από τα συμβατικά εισαγόμενα καύσιμα και την μείωση της ενεργειακής εξάρτησης της χώρας
5. Η κατασκευή ανεμογεννητριών θεωρείται ασφαλείς σε αντίθεση με εγκαταστάσεις θερμοηλεκτρικές ή ακόμα και πυρηνικές οι οποίες λόγω της σεισμικότητας της χώρας μας μπορούν να θεωρηθούν επικίνδυνες.

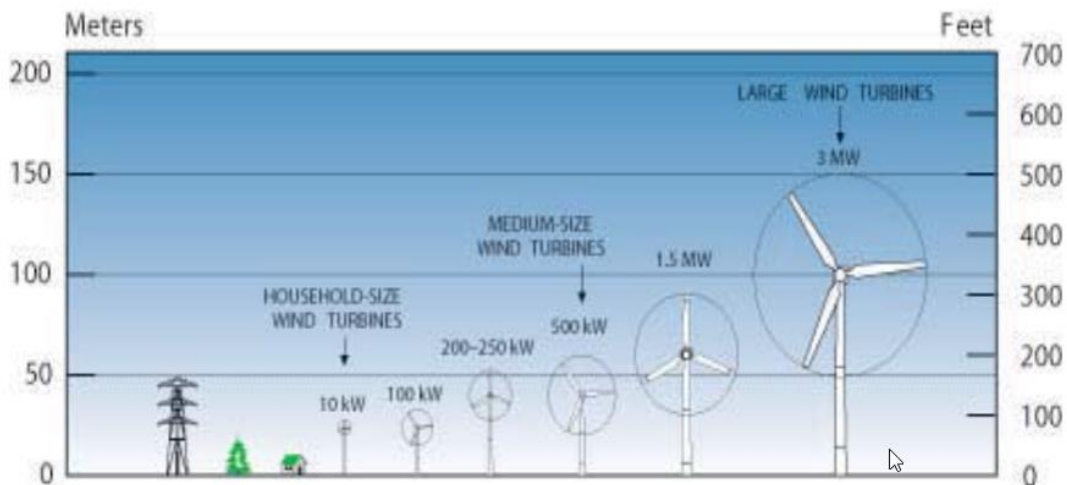
2. Ανάλυση ανεμογεννήτριας

2.1 Περιγραφή λειτουργίας ανεμογεννήτριας

Μια ανεμογεννήτρια είναι μια δομή που μετατρέπει την αιολική ενέργεια για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν τη δύναμη του ανέμου για να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια που κινείται με τον άξονά του. Στη συνέχεια, μέσω μιας γεννήτριας στροβίλου, τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ή να αποθηκευτεί σε μπαταρίες

2.2 Ιστορική εξέλιξη

Από τις αρχές της δεκαετίας του '80, οι τεχνολογικές εξελίξεις στοχεύουν στην καλύτερη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας βελτιώνοντας το σχεδιασμό και αυξάνοντας το μέγεθος των ανεμογεννητριών. Έτσι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε το 1981 είχε διάμετρο λεπίδας περίπου 15 μέτρα, η σημερινή γεννήτρια είναι περίπου 7,5 φορές μεγαλύτερη ή 112 μέτρα σε διάμετρο και η επιφάνεια σάρωσης έχει αυξηθεί κατά 55.



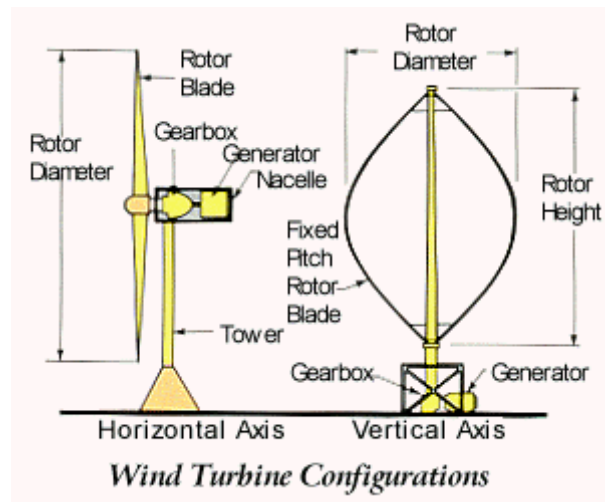
Εικόνα 1.1 Τύποι ανεμογεννητριών (<https://electrical-engineering-portal.com>)

2.3 Τύποι Ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δυο βασικά σχέδια ανεμογεννητριών: οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα στην οποία υπάρχει ένας κάθετος άξονας που παραμένει σταθερός και είναι

κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους πάνω στον οποίο στηρίζονται περιστρεφόμενα πτερύγια και οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (τύπου προπέλας) των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και διαθέτει την δυνατότητα περιστροφής .

Πιο διαδεδομένες σήμερα είναι οι οριζοντίου άξονα



Εικόνα 1.2 Βασικοί τύποι ανεμογεννήτριας (American Wind Energy Association)

2.3.1 Απόδοση Ανεμογεννήτριας

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος και την ταχύτητα του ανέμου. Για να αυξήσουμε την αναμενόμενη απόδοση, μπορούμε να αυξήσουμε το ύψος του πύργου, αφού υποθέτουμε ότι σε μεγαλύτερα ύψη έχουμε και μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Οι τυπικές διαστάσεις για μια ανεμογεννήτρια 500 kW είναι η διάμετρος του ρότορα 40 μέτρα και το ύψος 40-50 μέτρα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κυριαρχούν στην αγορά λόγω της υψηλότερης απόδοσης με δύο ή τρία πτερύγια. Οι ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων με μήκος ρότορα μικρότερο από 10 μέτρα έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται ασθενείς ανέμους (δηλαδή μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου) και λόγω της πιο περιορισμένης δυναμικής καταπόνησης των μηχανικών εξαρτημάτων, η κατασκευή και Το κόστος συντήρησης είναι επίσης χαμηλότερο. Σε ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια απαιτούνται ως αποτέλεσμα υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής, αλλά αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη ζημιά και

περισσότερο θόρυβο, ενώ έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι λιγότερο δαπανηρές. («Wind Energy Basics». American Wind Energy Association.)

Οι ανεμογεννήτριες με συμπαγείς πτερωτές ξεκινάνε την λειτουργία τους με μικρές ταχύτητες ανέμου αλλά θα πρέπει να βγαίνουν εκτός λειτουργίας στις μεγάλες ταχύτητες. Ο μέσος κύκλος ζωής τους ανέρχεται στα 20-25 χρόνια και αντιστοιχεί σε περισσότερες από 120000 ώρες λειτουργίας. Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών εστιάζεται σε περιοχές με ικανοποιητικές μέσες ταχύτητες ανέμου καθώς η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται κατακόρυφα με την αύξηση των ταχυτήτων του ανέμου, ένα πάρκο ανεμογεννητριών μπορεί να αποδίδει 200kw με ταχύτητα ανέμων 4 m/sec ενώ σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου διπλασιαστεί η ισχύς που θα αποδοθεί θα είναι 8πλασια. Η κατασκευή γεννητριών της τάξεως μεγαβάτ έχουν ενταχθεί στο οικονομικά και κατασκευαστικά βιώσιμο κατακτημένο σήμερα μέσα από ευρωπαϊκά προγράμματα. Οι μεγαλύτερες γεννήτριες δεν έχουν σαν πλεονέκτημα μόνο την απόδοση τους. Συμβάλουν επίσης στην εξοικονόμηση χώρου και η απαιτούμενη έκταση για την επίτευξη συγκεκριμένης παραγωγής είναι αισθητά μικρότερη από την αντίστοιχη που απαιτούν οι γεννήτριες με μικρότερη επιφάνεια σάρωσης. (<https://www.renovablesverdes.com/el/turbina-eolica/>)

2.4 Τα βασικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας

2.4.1 Θεμέλια και πύργος

Θεμέλια και ο πύργος πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο όλο το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Είναι η δομική υποστήριξη την ανεμογεννήτριας όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος των λεπίδων τόσο μεγαλύτερο θα πρέπει να είναι και το ύψος του πύργου

2.4.2 Σύστημα Λεπίδων

Το σύστημα των λεπίδων που περιλαμβάνουν τον ρότορα και τα πτερύγια που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε περιστρεφόμενη μηχανική ενέργεια . Είναι το πιο ορατό μέρος μιας ανεμογεννήτριας. Τα πτερύγια πρέπει να έχουν υψηλή δομική

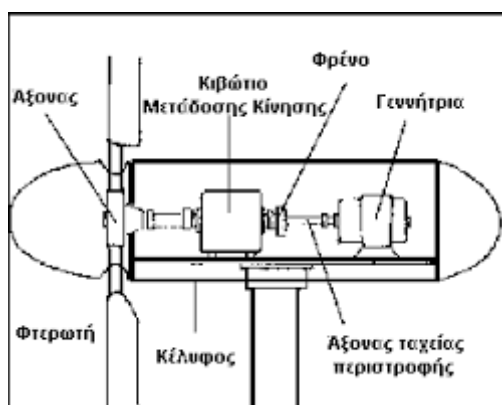
ακαμψία ώστε να μπορούν να αντέχουν τους δυνατούς ανέμους χωρίς να σπάνε. Στις τελευταίες τεχνολογίας ανεμογεννήτριες οι λεπίδες είναι συνήθως κατασκευασμένες από υαλοβάμβακα ή ανθρακονήματα και το σχήμα τους έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιήσει την απόδοση

2.4.3 Ηλεκτρικά και ηλεκτρονική μέρη

Τα ηλεκτρικά μέρη που περιλαμβάνουν την γεννήτρια τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κομμάτια. Η γεννήτρια είναι το εξάρτημα που μετατρέπει την ενέργεια σε ηλεκτρική. Αποτελείται από μια σειρά ηλεκτρομαγνητών και έναν ρότορα ο οποίος περιστρέφεται μέσα στον στάτορα για να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η ισχύς της γεννήτριας είναι ανάλογη με το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και μπορεί να κυμαίνεται από 5Kw για μικρές έως και 5Mw για μεγάλες

2.4.4 Σύστημα Μετάδοσης (Gearbox)

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης που περιλαμβάνει τους άξονες, το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα ελέγχου. Το κιβώτιο ταχυτήτων, περιέχει το σύστημα μετάδοσης κίνησης που την μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια ,επίσης περιέχει ένα φρένο ώστε να σταματήσει την περιστροφή του ρότορα σε περίπτωση πολύ δυνατού ανέμου ώστε να προστατέψει την ανεμογεννήτρια από τυχόν βλάβες.

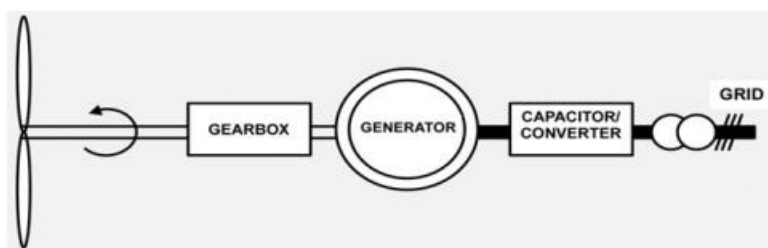


Εικόνα 1.3 Βασικά στοιχεία ανεμογεννήτριας (<https://windturbo.weebly.com>)

2.5 Τρόπος λειτουργίας Ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του ανέμου , μετατρέποντας την σε ηλεκτρική. Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας περιστρέφονται με

τον αέρα. Το σχήμα και η γωνία που είναι τοποθετημένα τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα ώστε να συλλαμβάνουν την μέγιστη δυνατή ποσότητα αιολικής ενέργειας. Καθώς περιστρέφονται τα πτερύγια περιστρέφουν έναν άξονα που είναι συνδεδεμένος με την γεννήτρια. Ο άξονας συνδέεται επίσης με το κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα περιστροφής ή να την μειώσει αν αυτό χρειαστεί. Στην συνέχεια η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την μετατροπή της περιστροφικής ενέργειας του άξονα σε ηλεκτρική. Η γεννήτρια αποτελείται από ρότορα και στάτορα οι οποίοι περιβάλλονται από μαγνητικό πεδίο. Καθώς ο ρότορας περιστρέφεται παράγει ηλεκτρικό ρεύμα στον στάτορα. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω ενός μετασχηματιστή μπορεί να αποσταλεί στο ηλεκτρικό δίκτυο ή να αποθηκευτεί σε μπαταρίες. Ο μετασχηματιστής μπορεί να αυξήσει την τάση ώστε να ταιριάζει με την τάση του δικτύου σε περίπτωση που διανεμηθεί κατευθείαν στο δίκτυο. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες μπορούν και προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του ανέμου. Είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες που παρακολουθούν την ταχύτητα, την κατεύθυνση και άλλες μεταβλητές. Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί τις πληροφορίες από τους αισθητήρες για να προσαρμόσει την γωνία των πτερυγίων και την ταχύτητα της γεννήτριας ώστε να βελτιστοποιήσει την παραγωγή της ενέργειας αλλά και να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια από ζημιές λόγω υψηλών ταχυτήτων του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν καλύτερα σε περιοχές με σταθερούς και ισχυρούς ανέμους.



Εικόνα 1.4 Βασική Λειτουργία ανεμογεννήτριας (G. Ofualagba, E. Ubeku 2008)

3. Συντήρηση και αξιοπιστία

Οι δύο πιο σημαντικές πτυχές της απόδοσης του συστήματος είναι η συντήρηση και αξιοπιστία (Misra, 2008). Ένα τμήμα συντήρησης σε έναν οργανισμό είναι ένα τμήμα που παρέχει υπηρεσίες και υποστήριξη να εκτελέσει το κύριο καθήκον του (Chan & Prakash, 2012). Η σωστή επιλογή του συστήματος συντήρησης όχι μόνο περιορίζει την πιθανότητα αστοχίας, αλλά βελτιώνει επίσης τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του (Panagiotidou & Tagaras, 2008)

3.1 Έννοια του συστήματος

Ένα σύστημα είναι μια ομάδα αλληλένδετων συσκευών που συνεργάζονται για να επιτύχουν την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας (Knezevic, 1997). Το σύστημα είναι κάτι παραπάνω από ένα άθροισμα μεμονωμένων συσκευών καθώς η κάθε μονάδα έχει χαρακτηριστικά η αποστολή που οι υπόλοιπες δεν μπορούν να εκπληρώσουν. Το μικρότερο μέρος ενός συστήματος είναι το εξάρτημα το οποίο και μπορεί να αντικατασταθεί από καινούργιο σε περίπτωση που χαλάσει (Μπακούρος 2002) . Τα στοιχεία ενός συστήματος μπορούν να αποτελούνται από μικρότερες υποσυσκευές που μπορούν να θεωρηθούν και αυτές συστήματα. Γενικά κάθε σύστημα μπορεί να αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος μέσα σε μια καθορισμένη ιεραρχία.

3.2 Ορισμός Συντήρησης-Σκοποί Συντήρησης

Με τον όρο συντήρηση αναφερόμαστε σε όλο τον συνδυασμό τεχνικών και διοικητικών ενεργειών που έχουν ως σκοπό την διατήρηση ή την επαναφορά ενός εξοπλισμού σε κατάσταση τέτοια ώστε να μπορεί να επιτελέσει την αποστολή του (Chan & Prakash, 2012)

Στον όρο περιλαμβάνονται ενέργειες ή διαδικασίες που ανακαλύπτουν την αρχή εμφάνισης μιας βλάβης στον εξοπλισμό και συμβάλουν στην αύξηση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού , την διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του και την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής της λειτουργίας του (Μπακούρος, 2002).

Οι εργασίες συντήρησης μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες, τις προγραμματισμένες και τις μη προγραμματισμένες. Οι προγραμματισμένες αφορούν την πρόληψη βλαβών ενώ οι μη προγραμματισμένες αφορούν κυρίως αποκατάσταση βλαβών (Misra, 2008)

Ο κύριος σκοπός συντήρησης ενός εξοπλισμού είναι η επιμήκυνση της διάρκειας της ζωής του και η πρόληψη φθοράς (Misra, 2008). Η συντήρηση σε συνδυασμό με στατικές μεθόδους, υπολογισμούς αξιοπιστίας και τεχνικές έγκαιρης διάγνωσης βλαβών έχει σαν στόχο την εξάλειψη των αιτιών μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του εξοπλισμού και στην επαναφορά του σε σωστή λειτουργία (Μπακούρος, 2002)

3.3 Αξιοπιστία-Διαθεσιμότητα

Η αξιοπιστία (reliability) αναφέρεται στην πιθανότητα ότι ένα κομμάτι του εξοπλισμού θα λειτουργήσει χωρίς βλάβη για μια καθορισμένη χρονική περίοδο υπό συγκεκριμένες συνθήκες. (Dhillon 2002) Έτσι, η αξιοπιστία μπορεί πάντα να παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 0. Η αξιοπιστία μπορεί να μοντελοποιηθεί με διάφορες μεθόδους οι κυριότερες εκ των οποίων είναι η διαδικασία Μαρκόβ (Markov Process) και η ανάλυση δέντρου βλαβών (Fault Tree Analysis)

Διαθεσιμότητα είναι η πιθανότητα ενός συστήματος να λειτουργεί σωστά σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή για οποιαδήποτε χρονική στιγμή μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (Διαλυνάς, 1998)

4 Μελέτη τρόπων αστοχίας – εφαρμογή δέντρων βλαβών

4.1 Μοντέλα αξιοπιστίας

Τα μοντέλα αξιοπιστίας χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της πιθανότητας λειτουργίας ενός συστήματος ή εξαρτήματος χωρίς βλάβη για μια δεδομένη χρονική περίοδο. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως στη μηχανική, τις κατασκευές και άλλες βιομηχανίες για να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα και τα συστήματα πληρούν τα απαιτούμενα επίπεδα αξιοπιστίας

4.2 Δέντρα Σφαλμάτων (FT)

Η ανάλυση δέντρων σφαλμάτων αναπτύχθηκε από την Bell Laboratories και την Boeing τη δεκαετία του 1960, αρχικά ως εργαλείο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας σύνθετων συστημάτων στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Dhillon B.S. (2005). Το δέντρο σφαλμάτων χρησιμοποιήθηκε αργότερα από τη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας ως εργαλείο για ανάλυση ασφάλειας και εκτίμηση κινδύνου και η εφαρμογή του επεκτάθηκε στη μηχανική και σε άλλους κλάδους για την ανάλυση των αιτιών των αστοχιών του συστήματος. Αποτελεί βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση και τη διαχείριση κινδύνου και έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας συστημάτων και διαδικασιών σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Το Fault Tree Analysis (FTA) είναι μια συστηματική, γραφική μέθοδος για τον εντοπισμό πιθανών αιτιών αστοχιών ή συμβάντων του συστήματος. Είναι μια προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω, που ξεκινά με ένα προκαθορισμένο ανεπιθύμητο συμβάν, όπως μια αποτυχία συστήματος, και στη συνέχεια εντοπίζει τις διάφορες πιθανές αιτίες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αυτό το συμβάν

4.2.1 Κατασκευή και ανάλυση δέντρων σφαλμάτων

Ένα δέντρο σφαλμάτων αποτελείται από γεγονότα και πύλες. Ένα γεγονός είναι ένα συμβάν εντός του συστήματος, συνήθως η αστοχία ενός υποσυστήματος σε ένα μεμονωμένο στοιχείο. Οι εκδηλώσεις μπορούν να χωριστούν σε βασικά γεγονότα (BE), που συμβαίνουν αυθόρμητα και ενδιάμεσα γεγονότα, τα οποία προκαλούνται από ένα

ή περισσότερα άλλα γεγονότα. Το γεγονός στην κορυφή του δέντρου, που ονομάζεται κορυφαίο συμβάν (TE), είναι το γεγονός που αναλύεται, μοντελοποιώντας την αστοχία του (υπο)συστήματος υπό εξέταση. Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2015)

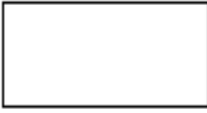
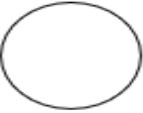


Για να κατασκευάσουμε ένα δέντρο σφαλμάτων ξεκινάμε με το ανεπιθύμητο συμβάν και λειτουργώντας αντίστροφα, εντοπίζοντας συστηματικά τις πιθανές αιτίες του συμβάντος. Οι αιτίες αναπαρίστανται ως λογικές πύλες, όπως πύλες AND και OR, που υποδεικνύουν τη σχέση μεταξύ των αιτιών και του ανεπιθύμητου συμβάντος. Για παράδειγμα, μια πύλη AND υποδεικνύει ότι πρέπει να υπάρχουν όλες οι αιτίες για να συμβεί το ανεπιθύμητο συμβάν, ενώ μια πύλη OR υποδεικνύει ότι οποιαδήποτε από τις αιτίες μπορεί να οδηγήσει στο ανεπιθύμητο συμβάν (Lazzaroni et al., 2011)

Η διαδικασία ανάλυσης του δέντρου σφαλμάτων περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: Προσδιορίζουμε το ανεπιθύμητο συμβάν ή την αστοχία του συστήματος που θέλουμε να αναλύσουμε και ονομάζουμε top event. Προσδιορίζουμε τις πιθανές αιτίες σφάλματος. Κατασκευάζουμε το διάγραμμα δέντρων σφαλμάτων χρησιμοποιώντας λογικές πύλες για να αναπαραστήσουμε τις σχέσεις μεταξύ αιτιών και του ανεπιθύμητου συμβάντος. Αναλύουμε το δέντρο σφαλμάτων ώστε να εντοπίσουμε τις πιο πιθανές και πιο κρίσιμες αιτίες του ανεπιθύμητου συμβάντος ή βλάβης (Limnios Nikolaos.(2005))

Σκοπός της ανάλυσης του δέντρου σφαλμάτων είναι να αναγνωρίσουμε τα στοιχεία που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στο top event και να προσπαθήσουμε να τα ελαχιστοποιήσουμε μέσω συντήρησης ή τακτικής αντικατάστασης.

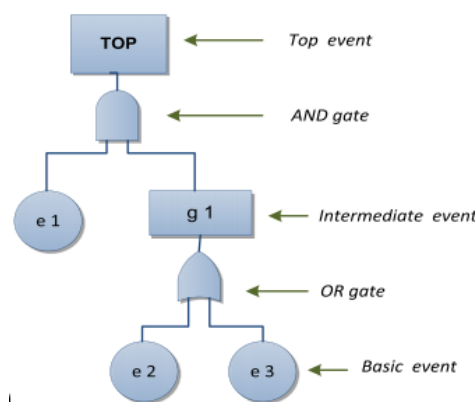
Τα δέντρα Σφαλμάτων (FT) μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας σύνθετων συστημάτων και για τον εντοπισμό πιθανών αδυναμιών και τρωτών σημείων. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση κινδύνων και τη λήψη αποφάσεων και μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της συνολικής ασφάλειας και απόδοσης συστημάτων και διαδικασιών.

Τα βασικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

	Τορ ή ενδιάμεσο συμβάν	Υποδηλώνει ένα σφάλμα που προκύπτει από τον συνδυασμό γεγονότων ή αστοχίας μέσω λογικών πυλών. Μπορεί να είναι ενδιάμεσο ή το top συμβάν
	Βασικό γεγονός	Αντιπροσωπεύει ένα βασικό σφάλμα ή μια αστοχία ενός στοιχείου
	Πύλη AND	Αντιπροσωπεύει μια λογική συνάρτηση όπου όλα τα συμβάντα πρέπει να συμβούν προκειμένου να συμβεί και το επόμενο επίπεδο στο δέντρο σφαλμάτων
	Πύλη OR	Αντιπροσωπεύει μια λογική συνάρτηση όπου μόνο ένα από τα συμβάντα πρέπει να συμβεί προκειμένου να συμβεί το επόμενο επίπεδο στο δέντρο σφαλμάτων

Πίνακας 1 Βασικά Σύμβολα δέντρων σφαλμάτων (Limnios Nikolaos.(2005).)

Με την βοήθεια των παραπάνω συμβόλων μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα απλό δέντρο σφαλμάτων



Εικόνα 1.5 Δέντρο σφαλμάτων

4.2.2 Ποσοτική Εκτίμηση γεγονότων ενός δέντρου σφαλμάτων

Η πιθανότητα να συμβεί το τελικό συμβάν εκτιμάται τυχαία, συνδέοντας την πιθανότητα κάθε σημαντικού γεγονότος και συνδυάζοντας τις διάφορες πιθανότητες σύμφωνα με τις σχέσεις που δείχνει το δέντρο μέσω υπολογισμών πιθανοτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, για κάθε τελικό συμβάν, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η κύρια αλυσίδα γεγονότων που οδηγούν στην αποτυχία και έτσι να προσδιοριστεί ποιο από αυτά τα γεγονότα έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί. Με βάση αυτό, μπορούμε να εντοπίσουμε τροποποιήσεις ή συντήρηση που είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του προϊόντος από το δέντρο σφαλμάτων.

Προκειμένου να δημιουργηθεί σωστά ένα δέντρο σφαλμάτων, απαιτείται ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος, με ορισμένους περιορισμούς: 1) Η ανάλυση δένδρων σφαλμάτων βασίζεται στην υπόθεση στατιστικά ανεξάρτητων και τυχαίων σφαλμάτων, δεν ασχολείται με στατιστικά σχετικά γεγονότα, 2) Η ανάλυση δέντρου σφαλμάτων δεν είναι κατάλληλη για την αναπαράσταση αστοχιών που προκαλούνται από μια ακολουθία γεγονότων, 3) Η ανάλυση δέντρου σφαλμάτων δεν μοντελοποιεί όλες τις πιθανές καταστάσεις αστοχίας επειδή εστιάζει στα συμβάντα ανώτατου επιπέδου που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη λειτουργία αστοχίας, αλλά περιλαμβάνει μόνο αυτές συνέβησαν γεγονότα που συμβάλλουν στο κυρίαρχο περιστατικό (Lazzaroni et al.,2011)

4.2.3 Ποσοτική και ποιοτική ανάλυση δέντρων σφαλμάτων

Το δέντρο σφαλμάτων είναι ένα εργαλείο ανάλυσης ευπάθειας που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας συστημάτων και διαδικασιών. Η ανάλυση του δέντρου σφαλμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, ποσοτικό και ποιοτικό.

4.2.4 Ποσοτική ανάλυση

Η ποσοτική ανάλυση των δέντρων σφαλμάτων βασίζεται στη χρήση αριθμητικών και μαθηματικών μοντέλων για τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης γεγονότων. Η

πιθανότητα εμφάνισης της αιτίας της αστοχίας προσδιορίζεται με τεχνική ανάλυση. Η ποσοτική ανάλυση απαιτεί τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων και τη χρήση στατιστικών μεθόδων για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αστοχίας. Για την ποσοτική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν επίσης τυχαία και σημαντικά μέτρα. Ένα στοχαστικό μέτρο είναι ένα μέτρο που είναι ένα σύστημα μέτρησης που περιγράφει ή προβλέπει πιθανολογικά γεγονότα. (Lazzaroni et al., 2011)

Ένα μέτρο σημασίας είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της σημασίας μιας μεταβλητής σε ένα σύστημα ή μια διαδικασία. Τα μέτρα σημασίας μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε ποιες μεταβλητές έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση του συστήματος ή της διαδικασίας και ποιες είναι περιττές ή λιγότερο σημαντικές (Rausand et al., 1994).

4.2.5 Ποιοτική ανάλυση

Η ποιοτική ανάλυση αναφέρεται στην εξέταση και αξιολόγηση δεδομένων που δεν μπορούν να μετρηθούν επακριβώς ή ποσοτικά, επομένως δεν απαιτούν τιμές πιθανότητας για γεγονότα. Κατά τη διάρκεια της ποιοτικής ανάλυσης, μπορούν να εντοπιστούν ενδιάμεσα γεγονότα που μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για σημεία του συστήματος που ενδέχεται να αποτύχουν και απαιτούν περισσότερη προσοχή. (Lazzaroni et al., 2011)

4.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα δέντρων σφαλμάτων

Όπως κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα: Επιτρέπει τον εντοπισμό αιτιών αστοχιών που έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα τελικά γεγονότα Βοηθά στη διερεύνηση πιθανών αιτιών δυνητικά απρόβλεπτων τελικών αποτελεσμάτων Επιτρέπει τον εντοπισμό λογικών διαδικασιών ζημίας ξεκινώντας από συγκεκριμένα αποτελέσματα

Μειονεκτήματα: Σύνθετη ανάλυση εάν το εύρος της ανάλυσης είναι πολύ ευρύ, ενώ το σύστημα μπορεί να αποτύχει προκαλώντας τη δημιουργία πολύ μεγάλων δέντρων σφαλμάτων, οι ακριβείς πιθανότητες συμβάντος αιχμής απαιτούν εκτεταμένους υπολογισμούς σε μια χρονοβόρα διαδικασία. Το ίδιο συμβάν μπορεί να εμφανιστεί σε

διαφορετικά μέρη του δέντρου ενώ το δέντρο δεν αντιπροσωπεύει τις μεταβατικές διαδρομές μεταξύ των καταστάσεων οποιουδήποτε γεγονότος.

4.3 Δέντρα σφαλμάτων για τον εντοπισμό της πιθανότητας βλάβης για κάθε ένα από τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας

Στην παρούσα πτυχιακή έγινε προσδιορισμός των κρίσιμων εξαρτημάτων μιας ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας την μέθοδο ανάλυσης δέντρου σφαλμάτων FTA με την πάροδο του χρόνου. Έχει δημιουργηθεί ένα διαφορετικό δέντρο για το κάθε ένα από τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας

Η επιτυχημένη δημιουργία και ανάλυση ενός δέντρου σφαλμάτων προϋποθέτει την πραγματοποίηση συγκεκριμένων βημάτων. Συνοπτικά αναφέρονται τα ακόλουθα

1. Προσδιορισμός του στόχου του δέντρου
2. Ορισμός του κορυφαίου γεγονότος
3. Ορισμός των ενδιάμεσων και βασικών γεγονότων
4. Ορισμός της επίλυσης και βασικών κανόνων
5. Κατασκευή του δέντρου
6. Αξιολόγηση

Επιπροσθέτως υπάρχουν βασικοί κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται για την κατασκευή αποτελεσματικών δέντρων. Αφού προσδιοριστεί το πρόβλημα, είναι απαραίτητο να περιγράφει κάθε γεγονός με ακρίβεια. Οι καταστάσεις που καταχωρούνται στα ορθογώνια σχήματα του δέντρου αναφέρονται ως σφάλματα (κανόνας 1ος). Επιπλέον σε αυτό το επίπεδο θα πρέπει να καθοριστούν τα γεγονότα που είναι ικανά να οδηγήσουν σε ένα σφάλμα, αυτό το κομμάτι περιγράφεται στα πλαίσια των ενδιάμεσων γεγονότων (κανόνας 2ος). Τα ενδιάμεσα γεγονότα ακολουθούνται από βασικά γεγονότα. Ο προσδιορισμός των τελευταίων θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πριν την κατασκευή του δέντρου καθώς επίσης και αν το κάθε ένα από αυτά είναι ικανό μόνο του ή σε συνδυασμό με άλλα γεγονότα να οδηγήσει σε μια

βλάβη. Η σύνδεση των παραπάνω πραγματοποιείται με τη χρήση λογικών πυλών (κανόνας 3ος). (Stamatelopoulos, 2002)

Οι πύλες δείχνουν τις σχέσεις των γεγονότων που είναι απαραίτητες για την εμφάνιση του υψηλότερου, σε θέση, γεγονότος. Εδώ ορίζεται ότι κάθε γεγονός που βρίσκεται σε υψηλότερη θέση θεωρείται έξοδος, ενώ αντίστοιχα οποιοδήποτε είναι σε χαμηλότερη ως είσοδος. Είναι σημαντικό να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι οι πύλες εισόδου δε θα πρέπει να συνδέονται άμεσα με άλλες πύλες (Stamatelopoulos, 2002).

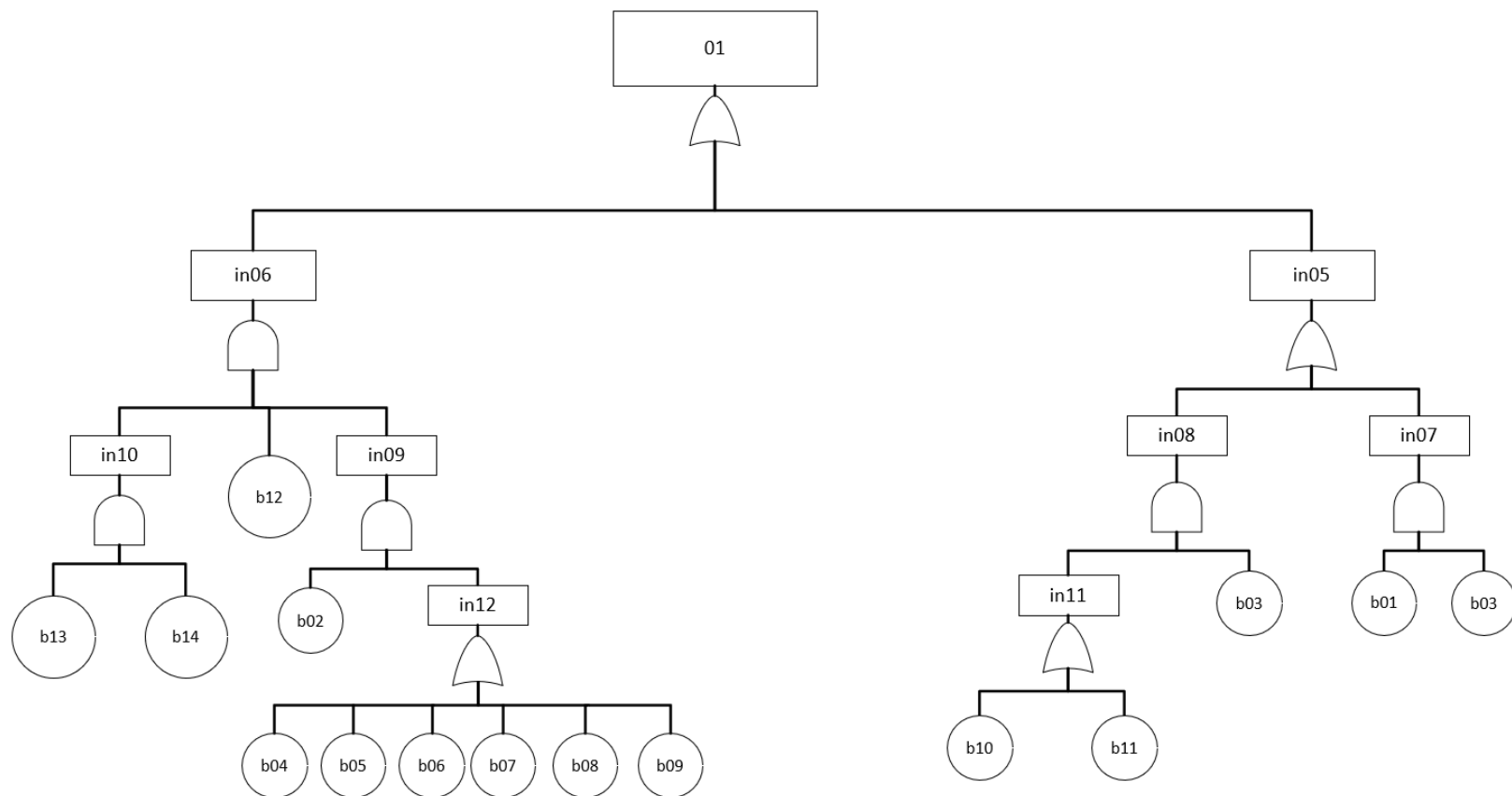
4.3.1 Θεμέλια και πύργος

Πάνω στον πύργο στηρίζεται η άτρακτος η οποία βρίσκεται σε κατάλληλο ύψος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των αναταράξεων και η μεγιστοποίηση της αιολικής ενέργειας. Ο πύργος αποτελείται από κυλινδρικά στοιχεία χάλυβα λεπτού τοιχώματος συγκολλημένα μεταξύ τους κατά μήκους τους περιμετρικά και σε τρία τμήματα ενώνονται με μπουλόνια. Αυτό γίνεται ώστε να είναι εύκολη η μεταφορά των στοιχείων στο σημείο τοποθέτησης για να μπορέσουν να συναρμολογηθούν επιτόπου. Η βάση του πύργου είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και θεμελιωμένη στο σημείο που θα μπει η ανεμογεννήτρια. Οι δομικές αστοχίες του πύργου συνήθως εξελίσσονται με το χρόνο. Οι κύριες αστοχίες είναι η ύπαρξη και διάδοση ρωγμών που μπορεί να προκληθούν από καταπόνηση λόγω υψηλών ταχυτήτων ανέμου αλλά και ακραίες αναταράξεις. Επίσης αστοχία μπορεί να προκαλέσουν καιρικά φαινόμενα όπως η συσσώρευση πάγου, χαλάζι αλλά και χτύπημα από κεραυνό. Στην κορυφή του πύργου το σύστημα προσανατολισμού που περιστρέφει την άτρακτο σε γωνία κατάλληλη σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου. Το σύστημα τροφοδοτείται από ηλεκτρομηχανικούς ή υδραυλικούς μηχανισμούς, (στην παρούσα εργασία το σύστημα που εξετάζεται είναι με ηλεκτρομηχανικό μηχανισμό) . Το σύστημα προσανατολισμού μπορεί να ακινητοποιήσει την άτρακτο σε περίπτωση βλάβης ή σε περίπτωση λανθασμένης γωνίας εκτροπής. Δομική αστοχία στον πύργο μπορεί να εμφανιστεί σε περίπτωση που παρουσιάσει βλάβη ο κινητήρας έκτροπης η δεν διαθέτει τροφοδοσία ρεύματος

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 1 που περιέχει τα βασικά και ενδιάμεσα γεγονότα για το δέντρο βλαβών και τα θεμέλια και τον πύργο όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1

Αστοχία στο σύστημα προσανατολισμού	in05	Βλάβη στον κινητήρα εκτροπής	b01
Δομική αστοχία	in06	Ασυνήθιστοι κραδασμοί I	b02
Αστοχία στον κινητήρα εκτροπής	in07	Ασυνήθιστοι κραδασμοί H	b03
Λάθος γωνία κινητήρα εκτροπής	in08	Ρωγμές στην τσιμεντένια βάση των θεμελίων	b04
Εκτεταμένη δομική αστοχία στα θεμέλια και στον πύργο	in09	Ζημιά στις συγκολλήσεις	b05
Απώλεια παροχής ρεύματος στο σύστημα προσανατολισμού	in10	Διάβρωση	b06
Αστοχία μετεωρολογικής μονάδας	in11	Χαλαρά μπουλόνια στην ένωση ανάμεσα στα θεμέλια και στον πύργο	b07
Δομική αστοχία στον πύργο και στα θεμέλια	in12	Χαλαρές βίδες στις ενώσεις	b08
		Κενά στα θεμέλια	b09
		Βλάβη στα πτερύγια	b10
		Βλάβη στο ανεμόμετρο	b11
		Αναταράξεις από υψηλή ταχύτητα του αέρα	b12
		Απώλεια παροχής ρεύματος από την γεννήτρια	b13
		Απώλεια παροχής ρεύματος από το δίκτυο	b14

Πίνακας 2 Θεμέλια και Πύργος



Σχήμα 1 Δέντρο Βλαβών Θεμέλια-Πύργος

4.3.2 Σύστημα Λεπίδων

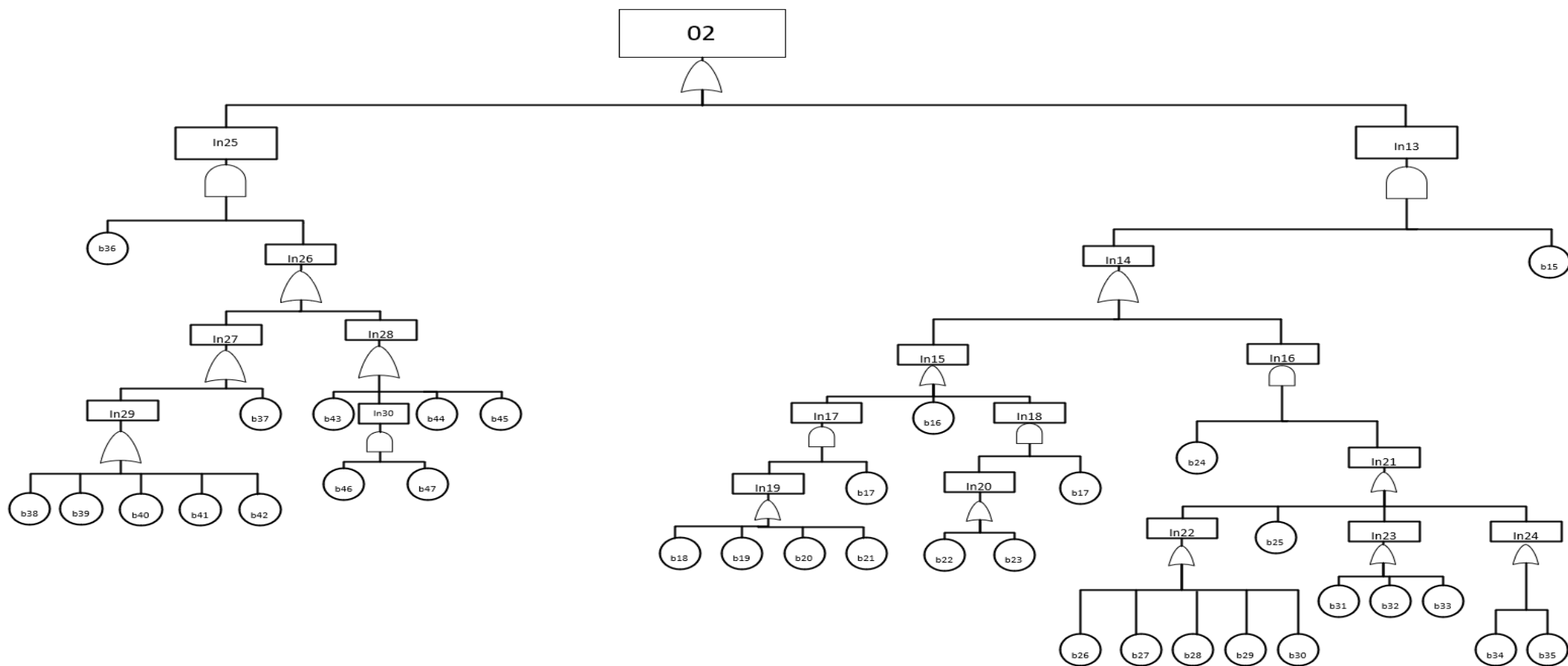
Στο σύστημα λεπίδων , οι λεπίδες συνδέονται με τον άξονα του ρότορα από την πλήμνη και είναι τοποθετημένα σε ρουλεμάν στο ρότορα. Ο ρότορας βρίσκεται στο εσωτερικό της ατράκτου. Η πλήμνη του ρότορα υποστηρίζει βαριά φορτία και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες όπως ρωγμές και ανισορροπία του συστήματος. Οι λεπίδες επίσης, μπορεί να φθαρούν , να εμφανίσουν ρωγμές ή ακόμα και να αποκολληθεί κάποια άκρο. Τα ρουλεμάν τέλος μπορεί να εμφανίσουν αστοχία λόγω διάβρωσης, λειαντικής φθοράς ή ρωγμών. Ένα επίσης κοινό σφάλμα στο σύστημα των λεπίδων σχετίζεται με την αστοχία του συστήματος ελέγχου βήματος. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι ο μηχανισμός που στρέφει την λεπίδα ή μέρος αυτής προκειμένου να ρυθμιστεί η γωνία προσβολής του ανέμου. Οι αναταράξεις του ανέμου είναι μια σημαντική αιτία σφάλματος του συγκεκριμένου συστήματος. Η κίνηση πραγματοποιείται με υδραυλικό σύστημα στο οποίο όμως μπορεί να εμφανιστούν αστοχίες λόγω διαρροής , διάβρωσης ή υπερβολικής πίεσης Τέλος η μετεωρολογική μονάδα που είναι τοποθετημένη πάνω στο σύστημα των λεπίδων είναι αυτή που παρέχει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του ανέμου (κατεύθυνση και ταχύτητα) προς το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Μια βλάβη στην μετεωρολογική μονάδα μπορεί να οδηγήσει σε λάθος ρύθμισης γωνίας των λεπίδων και κατ επέκταση σε αστοχία όλου του συστήματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 2 που περιέχει τα βασικά και ενδιάμεσα γεγονότα για το δέντρο βλαβών για το σύστημα λεπίδων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2

Σοβαρή αστοχία λεπίδας	in13	Υψηλή ταχύτητα αέρα/ αναταράξεις	b15
Αστοχία λεπίδας	in14	Ασυμμετρία γωνιών των λεπίδων	b16
Αστοχία βήματος και περιστροφής	in15	Μη φυσιολογική δόνηση Α	b17
Δομική βλάβη λεπίδων	in16	Αστοχία υδραυλικού κινητήρα	b18
Βλάβη υδραυλικού συστήματος	in17	Διαρροές στο υδραυλικό σύστημα	b19
Λάθος γωνία λεπίδων	in18	Υπερβολική πίεση στο υδραυλικό σύστημα	b20
Σφάλμα υδραυλικού συστήματος	in19	Διάβρωση στο υδραυλικό σύστημα	b21
Αστοχία μετεωρολογικής μονάδας	in20	Ζημιά στα πτερύγια	b22
Δομικό σφάλμα λεπίδων	in21	Ζημιά στο ανεμόμετρο	b23
Βλάβη πρόσθιων και οπίσθιων άκρων	in22	Μη φυσιολογική δόνηση Β	b24
Ζημιά στο περίβλημα του πτερυγίου	in23		b25

Ζημιά στα άκρα του πτερυγίου	in24	Ρωγμές στις άκρες των λεπίδων	b26
Αστοχία στο σύστημα του ρότορα	in25	Διάβρωση στις άκρες των λεπίδων	b27
Σφάλμα στο σύστημα του ρότορα	in26	Αποκόλληση στα μπροστινά άκρα των λεπίδων	b28
Σφάλμα στα ρουλεμάν του ρότορα	in27	Αποκόλληση στα πίσω άκρα των λεπίδων	b29
Σφάλμα στην πλήμνη του ρότορα	in28	Εκδορές στις άκρες των λεπίδων	b30
Φθορά στα ρουλεμάν του ρότορα	in29	Αποκόλληση στο περίβλημα	b31
Ανισορροπία του συστήματος των λεπίδων	in30	Ρωγμές με δομικές βλάβες στο περίβλημα	b32
		Ρωγμές στην άρθρωση δοκού-περιβλήματος	b33
		Ανοιχτή κορυφή	b34
		Χτύπημα κεραυνού στην κορυφή	b35
		Μη φυσιολογική δόνηση C	b36
		Ρωγμές στα ρουλεμάν του ρότορα	b37
		Διάβρωση των ακίδων στα ρουλεμάν του ρότορα	b38
		Λειαντική φθορά στα ρουλεμάν του ρότορα	b39
		Διάτρηση στα ρουλεμάν του ρότορα	b40
		Παραμόρφωση της όψης και του κυλιόμενου στοιχείου στα ρουλεμάν του ρότορα	b41
		Σφάλμα λίπανσης στα ρουλεμάν του ρότορα	b42
			b43
		Ρωγμές στην πλήμνη	b44
		Τραχύτητα επιφάνειας στην πλήμνη	b45
		Μαζική ανισορροπία στον πλήμνη	b46
		Σφάλμα στη ρύθμιση του βήματος	b47

Πίνακας 3 Σύστημα Λεπίδων



Σχήμα 2 Δέντρο Βλαβών Σύστημα Λεπίδων

4.3.3 Γεννήτρια , ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα

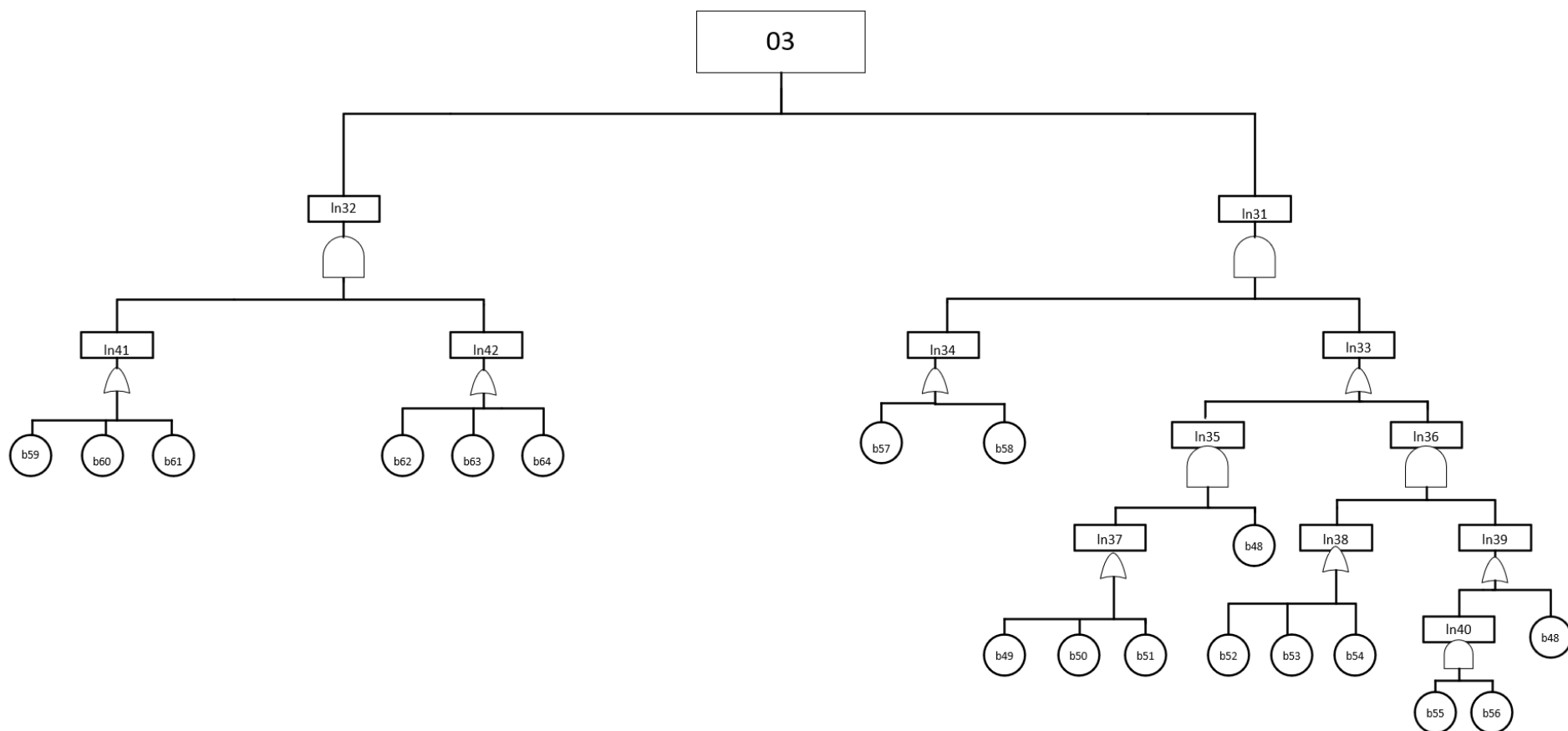
Η γεννήτρια, τα ηλεκτρικά και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι εγκατεστημένα στο εσωτερικό της ατράκτου. Ο άξονας υψηλής ταχύτητας οδηγεί την περιστροφική ροπή στην γεννήτρια όπου η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Αυτή η μετατροπή χρειάζεται συγκεκριμένη ταχύτητα εισόδου ή έναν ηλεκτρονικό εξοπλισμό ισχύος για να προσαρμόζει την ενέργεια εξόδου από την γεννήτρια στο δίκτυο. Οι βλάβες στις γεννήτριες μπορεί να είναι αποτέλεσμα ηλεκτρικών ή μηχανικών αιτιών. Οι κύριες ηλεκτρικές βλάβες οφείλονται σε ανοιχτά κυκλώματα ή βραχυκυκλώματα στον ρότορα που μπορεί να προκληθούν από υπερθέρμανση. Οι αστοχίες στα ρουλεμάν της γεννήτριας προκαλούνται συνήθως από φθορά , ρωγμές κόπωσης, ασυμμετρία και ανισορροπία. Αστοχίες στο ρότορα μπορεί να προκληθούν από σπασμένες ράβδους, εκκρεντρότητες διάκενου αέρα και δυναμικές εκκρεντρότητες. Από ανομοιόμορφη συσσώρευση πάγου και βρωμιάς πάνω στις λεπίδες μπορεί να προκληθεί ανισορροπία του ρότορα και αεροδυναμική ασυμμετρία που να έχουν σαν αποτέλεσμα την αστοχία του συστήματος. Η διάβρωση και η βρωμιά μπορεί να προκαλέσουν βλάβες σε όλα τα εξαρτήματα. Το σύστημα που σχηματίζεται από την γεννήτρια το ηλεκτρικό σύστημα και το σύστημα ελέγχου έχει ένα σχετικό ποσοστό αστοχιών και χρόνου διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

Ο πίνακας 3 περιέχει τα κύρια στοιχεία και αστοχίες στην γεννήτρια , στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Και στο σχήμα 3 παρουσιάζεται το δέντρο βλαβών για τα κύρια στοιχεία της γεννήτριας τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα

κρίσιμη αστοχία γεννήτριας	in31	μη φυσιολογική δόνηση C	b48
Βλάβη ισχύος ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών ελέγχου	in32	Ρωγμές	b49
Μηχανική βλάβη γεννήτριας	in33	Ανισορροπία	b50
Ηλεκτρική βλάβη γεννήτριας	in34	Ασυμμετρία	b51
Βλάβη στα ρουλεμάν της γεννήτριας	in35	Εκκρεντρότητες κενού αέρος	b52
Βλάβη σε ρότορα και στάτορα	in36	Σπασμένες ράβδοι	b53

Αστοχία στα ρουλεμάν της γεννήτριας	in37	Δυναμική εκκεντρότητα	b54
Αστοχία σε ρότορα και στάτορα	in38	Σφάλμα αισθητήρα	b55
Μη φυσιολογικά σήματα	in39	θερμοκρασία πάνω από το όριο	b56
Υπερθέρμανση γεννήτριας	in40	Βραχυκύκλωμα γεννήτριας	b57
Ηλεκτρική βλάβη (ισχύς ηλεκτρονικών)	in41	Ανοικτό κύκλωμα γεννήτριας	b58
Μηχανική βλάβη (ισχύς ηλεκτρονικών)	in42	Βραχυκύκλωμα ηλεκτρονικών	b59
		Ανοικτό κύκλωμα ηλεκτρονικών	b60
		Κύκλωμα μετάδοσης πυλών	b61
		Διάβρωση	b62
		Βρωμιά	b63
		ζημιά στα τερματικά	b64

Πίνακας 4 Γεννήτρια, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα



Σχήμα 3: Δέντρο Βλαβών Γεννήτρια ,Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα

4.3.4 Σύστημα μετάδοσης κίνησης (GearBox)

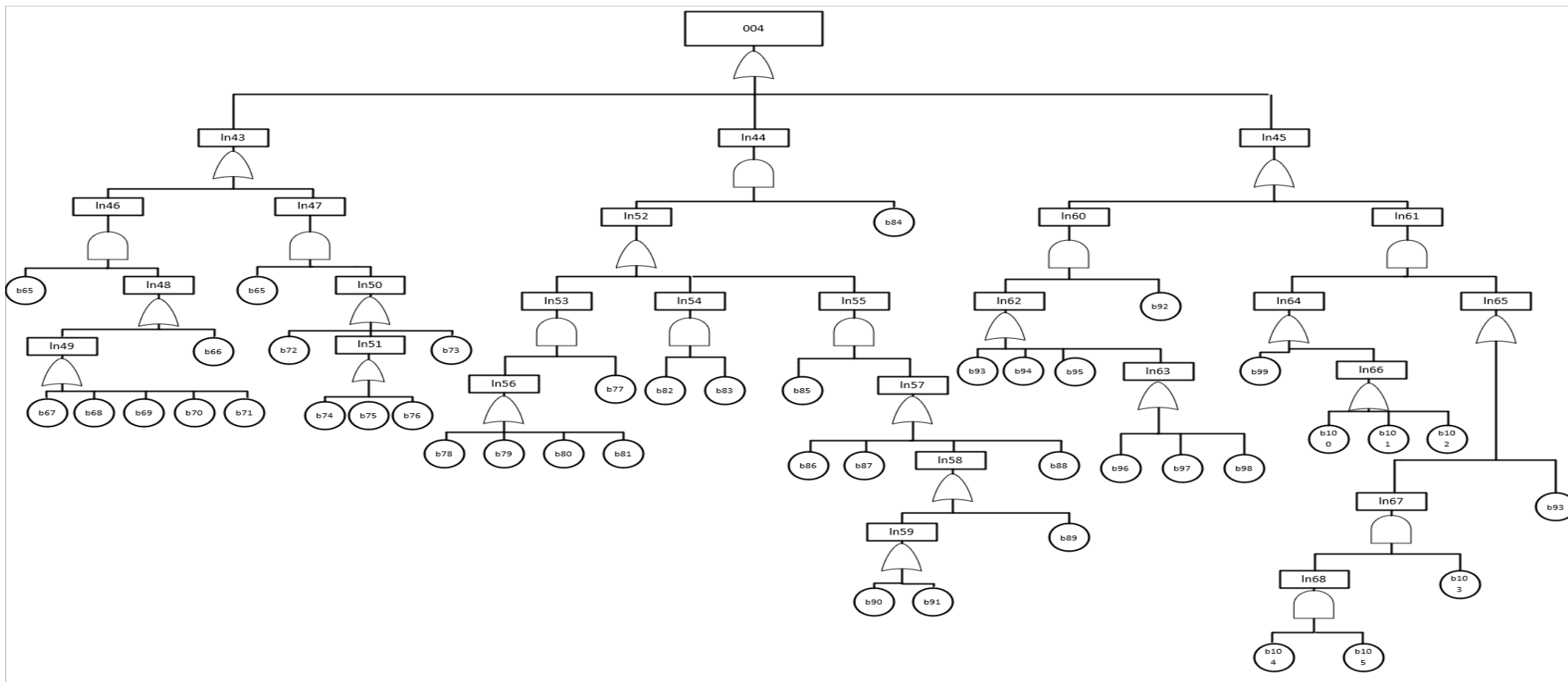
Το σύστημα μετάδοσης κίνησης είναι εγκατεστημένο στην άτρακτο και αποτελείται από το κύριο ρουλεμάν, τον κύριο άξονα , το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια. Μέσω του κύριου ρουλεμάν ο ρότορας συνδέεται στον άξονα χαμηλής ταχύτητας που οδηγεί στην περιστροφική ενέργεια στο κιβώτιο ταχυτήτων. Το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετείται μεταξύ του ρότορα και της γεννήτριας προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής. Επίσης σαν δευτερεύουσα ασφάλεια στο σύστημα θραύσης τοποθετείται ένα μηχανικό φρένο που τροφοδοτείται από ένα υδραυλικό σύστημα. Αστοχία στο σύστημα μετάδοσης κίνησης περιλαμβάνει το κύριο ρουλεμάν και ελάττωμα στον κύριο άξονα. Μπορεί να εμφανιστούν έντονες δονήσεις η οποίες να οδηγήσουν σε ρωγμές σε οποιοδήποτε εξάρτημα ή ανισορροπία στον άξονα. Η αστοχία στο κιβώτιο ταχυτήτων είναι από τις πιο χαρακτηριστικές αστοχίες σε μια ανεμογεννήτρια. Μια βλάβη στο κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές διακοπές λειτουργίας σε όλη την ανεμογεννήτρια. Τα πιο συνηθισμένα σφάλματα εντοπίζονται στα δόντια των γραναζιών και στα ρουλεμάν λόγω σφαλμάτων λίπανσης. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω ελαττωματικής στεγανοποίησης, απώλεια λαδιού, φθορά ή ζημιά από καταπόνηση που μπορεί να προκαλέσει σκασίματα, ρωγμές , εκκεντρότητα γραναζιού, φθορά των δοντιών του κιβωτίου ταχυτήτων , μετατόπιση ή άλλα πιθανά σφάλματα. Οι κύριες αστοχίες στον άξονα υψηλής ταχύτητα είναι η υπερθέρμανση που μπορεί να εμφανιστεί στους άξονες λόγω της περιστροφικής κίνησης του συστήματος μετάδοσης, η φθορά και η καταπόνηση . Ενώ οι κύριες αιτίες αστοχίας των φρένων είναι η υπερβολική πίεση ή οι διαρροές λαδιού και οι ρωγμές του δίσκου του φρένου .

Ο πίνακας 4 περιέχει τα κύρια στοιχεία και αστοχίες για το σύστημα μετάδοσης και στο σχήμα 4 παρουσιάζεται το δέντρο βλαβών για τα κύρια στοιχεία του συστήματος μετάδοσης κίνησης (gearbox)

χαμηλή ταχύτητα στο σύστημα κίνησης	in43	μη φυσιολογική δόνηση D	b65
βλάβη το κιβώτιο ταχυτήτων	in44	ρωγμές στο κύριο ρουλεμάν	b66
υψηλή ταχύτητα στο σύστημα κίνησης	in45	φθορά στο κύριο ρουλεμάν	b67
αστοχία του κύριου ρουλεμάν	in46	διάβρωση των ακίδων του κύριου ρουλεμάν	b68
αστοχία άξονα χαμηλής ταχύτητας	in47	λειαντική φθορά στο κύριο ρουλεμάν	b69
βλάβη του κύριου ρουλεμάν	in48	Παραμόρφωση όψης και στοιχείου κύλισης του κύριου ρουλεμάν	b70
φθορά στο κύριο ρουλεμάν	in49	κοίλωμα του κύριου ρουλεμάν	b71
σφάλμα άξονα χαμηλής ταχύτητας	in50	ανισορροπία άξονα χαμηλής ταχύτητας	b72
φθορά στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	in51	ρωγμές στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	b73
αστοχία στο κιβώτιο ταχυτήτων	in52	φθορά στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	b74
βλάβη στα ρουλεμάν του κιβωτίου ταχυτήτων	in53	λειαντική φθορά στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	b75
λίπανση του κιβωτίου ταχυτήτων	in54	τρύπημα του άξονα χαμηλής ταχύτητας	b76
αστοχία του γραναζιού	in55	μη φυσιολογική δόνηση F	b77
Φθορά στο κιβώτιο ταχυτήτων	in56	διάβρωση των ακίδων των ρουλεμάν του κιβωτίου ταχυτήτων	b78
σφάλμα στο κιβώτιο ταχυτήτων	in57	λειαντική φθορά στο κιβώτιο ταχυτήτων	b79
φθορά στους οδοντωτούς τροχούς των γραναζιών	in58	τρύπημα του κιβωτίου ταχυτήτων	b80
μετατόπιση οδοντωτών γραναζιών	in59	Παραμόρφωση όψης και στοιχείου κύλισης του κιβωτίου ταχυτήτων	b81
σφάλμα άξονα υψηλής ταχύτητας	in60	διήθηση λαδιού στο κιβώτιο ταχυτήτων	b82
κρίσιμη αστοχία φρένων	in61	σωματιδιακή μόλυνση του κιβωτίου ταχυτήτων	b83
δομικές ζημιές υψηλής ταχύτητας	in62	υπερθέρμανση κιβωτίου ταχυτήτων	b84
φθορά του άξονα με υψηλή ταχύτητα	in63	μη φυσιολογική δόνηση E	b85
αστοχία φρένων	in64	εκκεντρότητα γραναζιών	b86
μη φυσιολογική δόνηση B	in65	διάτρηση γραναζιών	b87
σφάλμα υδραυλικού συστήματος πέδησης	in66	Ρωγμές στα γρανάζια	b88

μη φυσιολογικά σήματα C	in67	φθορά των δοντιών του γραναζιού	b89
υπερθέρμανση φρένων	in68	κακή σχεδίαση των οδοντωτών γραναζιών	b90
		ελαττώματα στην επιφάνεια των οδοντωτών γραναζιών	b91
		μη φυσιολογική δόνηση J	b92
		ρωγμές στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b93
		ανισορροπία άξονα υψηλής ταχύτητας	b94
		υπερθέρμανση στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b95
		φθορά στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b96
		λειαντική φθορά στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b97
		τρύπημα του άξονα υψηλής ταχύτητας	b98
		ρωγμές στο δίσκο του φρένου	b99
		βλάβη κινητήρα	b100
		διαρροή λαδιού στο υδραυλικό φρένο	b101
		υπερβολική πίεση στο υδραυλικό φρένο	b102
		μη φυσιολογική ταχύτητα	b103
		T ^a σφάλμα στον αισθητήρα φρένου	b104
		T ^a πάνω από το όριο	b105

Πίνακας 5 Συστήματος μετάδοσης κίνησης (Gearbox)

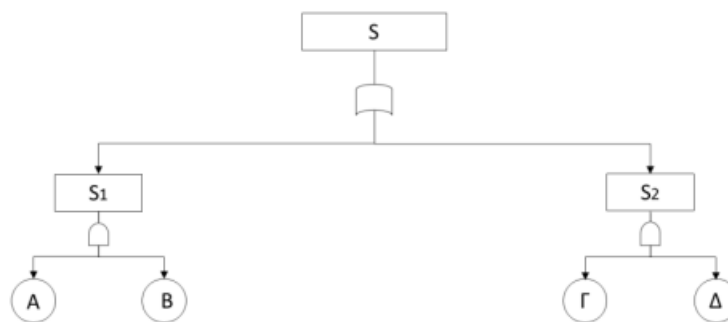


Σχήμα 4 Δέντρο Βλαβών Συστήματος μετάδοσης κίνησης (Gearbox)

4.4 Στάσιμες Πιθανότητες

Σε όλα τα παραπάνω δέντρα βλαβών τα βασικά γεγονότα (basic events) παρουσιάζονται με τις αντίστοιχες πιθανότητες στα διαγράμματα. Οι πιθανότητες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας του κορυφαίου γεγονότος. Σε αυτό το σημείο θεωρείται χρήσιμο να διατυπωθεί ο τρόπος που υπολογίζεται. Για το σκοπό αυτό, δίνεται το παρακάτω απλό παράδειγμα.

Παράδειγμα: Έστω ότι έχουμε ο παρακάτω δέντρο σφαλμάτων και θέλουμε να υπολογιστεί η πιθανότητα του κορυφαίου γεγονότος. Δίνονται $P(A)=P(B)=P(\Gamma)=P(\Delta)$



Σχήμα 5

Ξεκινώντας από το κορυφαίο γεγονός και πηγαίνοντας στα ενδιάμεσα γεγονότα, παρατηρούμε ότι υπάρχει πύλη OR που τα ενώνει. Άρα προκύπτει η σχέση:

$$P(S) = P(S_1 \cup S_2) \quad (1)$$

Αναλύοντας τη σχέση (1) με τη βοήθεια της άλγεβρας Boole προκύπτει

$$P(S) = P(S_1) + P(S_2) - P(S_1 \cap S_2) = P(S_1) + P(S_2) - P(S_1)(S_2) \quad (2)$$

Στο σημείο αυτό περνάμε από τα ενδιάμεσα γεγονότα στα βασικά γεγονότα , όπου το S1, S2 συνδέονται με πύλη AND με τα (A,B), (Γ,Δ) αντίστοιχα. Συνεπώς η σχέση (2) γίνεται:

$$\begin{aligned} P(S) &= P(A \cap B) + P(\Gamma \cap \Delta) - P(A \cap B)P(\Gamma \cap \Delta) \\ &= P(A)P(B) + P(\Gamma)P(\Delta) - P(A)P(B)P(\Gamma)P(\Delta) \end{aligned} \quad (3)$$

Υποθέτοντας ότι το κορυφαίο γεγονός είναι μια «Βλάβη του συστήματος S», η πιθανότητα να συμβεί είναι ίση με $P(S)$. Άρα η διαθεσιμότητα του συστήματος θα είναι $1 - P(S)$.

5. Μαρκοβιανό Μοντέλο-διάγραμμα καταστάσεων

5.1 Ιστορική αναδρομή της μαρκοβιανής μοντελοποίησης

Ο Andrey Andreyevich Markov (14 Ιουνίου 1856 – 20 Ιουλίου 1922) ήταν Ρώσος μαθηματικός. Είναι περισσότερο γνωστός για το έργο του στη θεωρία των στοχαστικών διεργασιών Markov. Η έρευνά του αργότερα έγινε γνωστή ως διαδικασία Markov και αλυσίδες Markov. Ο Andrey Andreyevich Markov παρουσίασε τις αλυσίδες Markov το 1906 όταν παρήγαγε το πρώτα θεωρητικά αποτελέσματα για στοχαστικές διεργασίες χρησιμοποιώντας τον όρο «αλυσίδα» για πρώτη φορά. Το 1913 υπολόγισε τις ακολουθίες γραμμάτων της ρωσικής γλώσσας Basharin et al (2004). Μια γενίκευση σε μετρήσιμους χώρους άπειρων καταστάσεων δόθηκε από τον Kolmogorov (1931). Οι μαρκοβιανές αλυσίδες σχετίζονται με την κίνηση Brown και την εργοδοτική υπόθεση δύο θέματα στην φυσική που ήταν σημαντικά στα πρώτα χρόνια του 20ου αιώνα. Αλλά ο Μαρκόβ φαίνεται να είχε μαθηματικά κίνητρα την επέκταση του νόμου των μεγάλων αριθμών σε εξαρτώμενα γεγονότα. Από αυτή την προσέγγιση αναπτύχθηκε ένα γενικό στατιστικό όργανο η λεγόμενη στοχαστική διαδικασία Markov. Στα μαθηματικά γενικά, τη θεωρία πιθανοτήτων και ιδιαίτερα τη στατιστική, μια διαδικασία Markov μπορεί να θεωρηθεί ως ένα χρονικά μεταβαλλόμενο τυχαίο φαινόμενο για το οποίο επιτυγχάνονται ιδιότητες Markov. Σε μια κοινή περιγραφή, μια στοχαστική διαδικασία με την ιδιότητα Markov, ή η έλλειψη μνήμης, είναι αυτή για την οποία εξαρτώνται από την παρούσα κατάσταση του συστήματος, το μέλλον του και το παρελθόν είναι ανεξάρτητα (Markov1908), Οι διαδικασίες Markov προκύπτουν από πιθανότητες και στατιστικές με δυο τρόπους. Μια στοχαστική διαδικασία που ορίζεται μέσω ενός ξεχωριστού ορίσματος, μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά να έχει την ιδιότητα Markov και κατά συνέπεια να έχει τις ιδιότητες που μπορούν να συναχθούν από αυτό για όλες τις διαδικασίες Markov. Μια πιο πρακτική σημασία έχει η χρήση της υπόθεσης ότι Μαρκοβιανη ιδιότητα ισχύει για μια ορισμένη τυχαία διαδικασία προκειμένου να κατασκευαστεί ένα στοχαστικό μοντέλο για αυτή την διαδικασία. Με όρους μοντελοποίησης υποθέτοντας ότι η Μαρκοβιανη ιδιότητα είναι ένας από τους περιορισμένους αριθμούς απλών τρόπων εισαγωγής της στατιστικής εξάρτησης σε ένα

μοντέλο για στοχαστική διαδικασία με τέτοιο τρόπο που επιτρέπει τη μείωση της ισχύος της εξάρτησης σε διαφορετικές καθυστερήσεις καθώς αυξάνεται η υστέρηση. Συχνά, ο όρος Μαρκοβιανή χρησιμοποιείται για να σημαίνει μια διαδικασία Markov που έχει μια διακριτή (πεπερασμένη ή μετρήσιμη) κατάσταση-χώρος. Συνήθως μια αλυσίδα Markov ορίζεται για ένα διακριτό σύνολο χρόνου (δηλαδή μια αλυσίδα Markov διακριτού χρόνου) αν και ορισμένοι συγγραφείς χρησιμοποιούν την ίδια ορολογία όπου ο «χρόνος» μπορεί να πάρει συνεχείς τιμές Basharin et al (2004)

5.2 Μαρκοβιανές αλυσίδες

Τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε προσδιοριστικά (deterministic) και σε στοχαστικά (stochastic) με στόχο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση του πραγματικού μοντέλου με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του. Η προσέγγιση των στοχαστικών μοντέλων γίνεται μέσω των Μαρκοβιανών αλυσίδων. Η Μαρκοβιανή αλυσίδα είναι μια στοχαστική διαδικασία που δε διατηρεί μνήμη για τις προηγούμενες μεταβολές. Η επόμενη κατάσταση εξαρτάται μόνο από την τωρινή κατάσταση και σε καμία περίπτωση από αυτές που προηγήθηκαν. Αυτό το συγκεκριμένο είδος «αμνησίας» καλείται Μαρκοβιανή ιδιότητα (Markovian property). Ο όρος «Μαρκοβιανή αλυσίδα» αναφέρεται στην αλληλουχία των καταστάσεων μέσω των οποίων κινείται μια τέτοια διαδικασία. Μια Μαρκοβιανή αλυσίδα (Markov chain) είναι μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $\{X_n, n = 0, 1, \dots\}$ με τη Μαρκοβιανή ιδιότητα, δηλαδή με δεδομένη την παρούσα κατάσταση, οι παλαιότερες και οι μελλοντικές καταστάσεις είναι ανεξάρτητες.:

$$P(X_{n+1} = x | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = P(X_{n+1} = x | X_n = x_n).$$

Οι πιθανές τιμές των X_i σχηματίζουν ένα αριθμήσιμο σύνολο I που το ονομάζουμε χώρο καταστάσεων της αλυσίδας. Οι Μαρκοβιανές αλυσίδες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στις Μαρκοβιανές αλυσίδες σε διακριτό χρόνο και στις Μαρκοβιανές αλυσίδες σε συνεχή χρόνο.

5.3 Μαρκοβιανές αλυσίδες σε διακριτό χρόνο

Μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $\{X_n : n \in \mathbb{N}\}$, με χώρο καταστάσεων I , λέγεται Μαρκοβιανή αλυσίδα αν και μόνο αν αυτή έχει τη Μαρκοβιανή ιδιότητα (Markovian property):

$$P\{X_n + 1 = i_{n+1} | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0\} =$$

$$P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i\} = P_{ij}$$

Για κάθε $i_0, i_1, \dots, i_{n+1} \in I$

Η δεσμευμένη πιθανότητα $P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} = P_{ij}$, $i, j \in S$, $\forall n \in \mathbb{N}$ ονομάζεται πιθανότητα μετάβασης 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. Οι πιθανότητες μετάβασης p_{ij} καλούνται πιθανότητες μετάβασης πρώτης τάξης και ικανοποιούν τις εξής σχέσεις:

i. $p_{ij} \geq 0$, $i, j \in S$

ii.

$$\sum_{j \in S} p_{ij} = 1$$

, $i, j \in S$

Οι πιθανότητες μετάβασης πρώτης τάξης γράφονται συνοπτικά με τη μορφή ενός πίνακα, ο οποίος καλείται πίνακας μετάβασης πρώτης τάξης της αλυσίδας (one – step transition probability matrix). Ο πίνακας ικανοποιεί τις παραπάνω σχέσεις συμβολίζεται με P , ονομάζεται στοχαστικός πίνακας (stochastic matrix) και έχει την παρακάτω μορφή:

$$p^{(n)} = \begin{pmatrix} P_0^{(n)} & \dots & P_{0N}^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N0}^{(n)} & \dots & P_{NN}^{(n)} \end{pmatrix}, n = 0, 1, \dots$$

Ο P είναι ένας τετραγωνικός πίνακας μη αρνητικών στοιχείων, αφού η i γραμμή του είναι η δεσμευμένη συνάρτηση πιθανότητας $P_{ij}, j \in I$ της τυχαίας μεταβλητής X_{n+1} δοθέντος ότι $X_n = j$ (συμβολικά $X_{n+1}|X_n = 1$), όπου το άθροισμα των στοιχείων κάθε γραμμής του είναι ίσο με την μονάδα. Μια Μαρκοβιανή αλυσίδα X_n είναι πλήρως ορισμένη όταν δίνεται ο πίνακας P και η αρχική κατανομή, δηλαδή η συνάρτηση πιθανότητας $P_i^{(0)} = P(X_0 = i)$ με $(i \in S)$ της αρχικής τυχαίας μεταβλητής X_0 . Όταν αυτά τα δύο είναι γνωστά, τότε προσδιορίζεται η πιθανότητα οποιασδήποτε πεπερασμένης πραγματοποίησης $(i_0, i_1 \dots i_{n-1}, i_n)$.

5.3.1 Εξισώσεις Chapman-Kolmogorov σε διακριτό χρόνο

Αν συμβολίσουμε με $p_{ij}^{(n)} = P(X_{n+1} = j | X_t = i \text{ με } n, t \geq 0)$ τότε οι εξισώσεις Chapman-Kolmogorov είναι

$$p_{ij}^{(n+m)} = \sum_{i=0}^k P_{ij}^{(n)} P_{ij}^{(m)}$$

Για μια μαρκοβιανή αλυσίδα με k το πλήθος των καταστάσεων .Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει από το θεώρημα για τις Μαρκοβιανές αλυσίδες “Έστω X_n μια μαρκοβιανή αλυσίδα με χώρο καταστάσεων $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ με αρχική κατανομή $m^{(0)}$ και πίνακα μετάβασης P . Τότε έχουμε ότι $P(X_{m+n} = s_j | X_m = s_i) = P_{ij}^n$ αφού $P_{ij}^{(n+m)} = P_{ij}^{n+m}$ δηλαδή το ij στοιχείο της $n+m$ δύναμης του πίνακα μετάβασης . Και από τις ιδιότητες των πινάκων έχουμε $P_{ij}^{n+m} = (P^n P^m)_{ij} = \sum_{i=0}^k P_{ij}^n P_{ij}^m$

5.3.2 Υπολογισμός Στάσιμων Πιθανοτήτων σε διακριτό χρόνο

Για μια πεπερασμένη, μη-διαχωρίσιμη και απεριοδική Μαρκοβιανή αλυσίδα, οι πιθανότητες μετάβασης n βημάτων, γίνονται ανεξάρτητες από τα n και i καθώς το n τείνει στο άπειρο. Kishor Shridharbhai Trivedi (2002) Η οριακή πιθανότητα κατάστασης, θα ισούται με:

$$u_j = \lim_{n \rightarrow \infty} p_j(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} p_j(n-1)$$

Αυτό όμως, υπονοεί ότι καθώς το n τείνει στο άπειρο το P^n συγκλίνει σε ένα πίνακα u , με πανομοιότυπες σειρές $u=[u_0, u_1, \dots]$. Επίσης, μπορεί να αποδειχτεί ότι για κάθε j ισχύει: $\sum u_j \leq 1$ Επομένως, είτε όλες οι πιθανότητες u_{ij} θα είναι ίσες με μηδέν, είτε για κάθε j θα ισχύει: $\sum u_j = 1$

Έτσι, οι $u_j, j \in I$ δημιουργούν ένα διάνυσμα πιθανοτήτων σταθερών καταστάσεων, το οποίο είναι ανεξάρτητο της αρχικής κατάστασης. Επίσης, από το θεώρημα ολικής πιθανότητας παίρνουμε:

$$p_j(n) = \sum_i p_i(n-1)p_{ij}$$

και εφόσον έχουμε ότι $u_j = \lim_{n \rightarrow \infty} p_j(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} p_j(n-1)$, θα ισχύει τελικά :

$$u_j = \sum_i u_i p_{ij}, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

ή αλλιώς σε μορφή πίνακα: $u=uP$. Από τη στιγμή που το διάνυσμα u είναι διάνυσμα πιθανοτήτων, θα ισχύει ότι:

$$u_j \geq 0, \sum_j u_j = 1$$

Κάθε διάνυσμα που ικανοποιεί τις παραπάνω σχέσεις, λέγεται διάνυσμα στάσιμων πιθανοτήτων της Μαρκοβιανής αλυσίδας Kishor Shridharbhai Trivedi (2002)

Για να υπολογιστεί το διάνυσμα στάσιμων πιθανοτήτων, πρέπει να λυθεί το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει από τη συνθήκη ισορροπίας. Αν η αλυσίδα έχει n καταστάσεις, τότε το σύστημα εξισώσεων θα έχει n εξισώσεις. Για κάθε κατάσταση i , η εξίσωση ισορροπίας έχει τη μορφή: $\pi_i * P_i = 0$ όπου π_i είναι η πιθανότητα στάσιμης κατάστασης και P_i είναι η γραμμή της πίνακα μετάβασης που αντιστοιχεί στην κατάσταση i . Ο πίνακας μετάβασης P περιέχει τους ρυθμούς μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων της αλυσίδας. Αφού λυθεί το σύστημα, το διάνυσμα πιθανοτήτων

που προκύπτει από τη λύση αντιστοιχεί στις στάσιμες πιθανότητες κάθε κατάστασης της Μαρκοβιανής αλυσίδας.

5.4 Μαρκοβιανές αλυσίδες σε συνεχή χρόνο

Η μετάβαση από μία κατάσταση της διαδικασίας σε μία άλλη μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε χρονική στιγμή, $t \geq 0$. Η ανάγκη τέτοιων αναλύσεων μας δίνει τον ακόλουθο ορισμό: Μία στοχαστική διαδικασία σε συνεχή χρόνο $\{X(t), t \geq 0\}$, με διακριτό χώρο καταστάσεων το πεπερασμένο ή απείρως αριθμήσιμο σύνολο S καλείται Μαρκοβιανή αλυσίδα σε συνεχή χρόνο (continuous – time Markov chains) αν:

$$P\{X(t_n) = i_n | X(t_0) = i_0, \dots, X(t_{n-1}) = i_{n-1}\} = P\{X(t_n) = i_n | X(t_{n-1}) = i_{n-1}\}$$

Για οποιαδήποτε $0 \leq t_0 < t_{n-1} < t_n$ και $i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i_n \in S$

5.4.1 Εξισώσεις Chapman-Kolmogorov συνεχούς χρόνου

Οι πιθανότητες μετάβασης της Μαρκοβιανής αλυσίδας συνεχούς χρόνου, ικανοποιούν την εξίσωση Chapman-Kolmogorov ως εξής :

$$p_{ij}(u, t) = \sum_{k \in I} p_{ik}(u, v) p_{kj}(v, t), 0 \leq u \leq v \leq t$$

5.4.2 Υπολογισμός Στάσιμων Πιθανοτήτων συνεχούς χρόνου

Η μαρκοβιανή αλυσίδα έχει στάσιμες πιθανότητες μετάβασης αν η $p_{ij}(u, t)$ εξαρτάται μόνο από την διαφορά $(t-u)$. Σε αυτήν την περίπτωση θα ισχύει επίσης

$$\sum_{j \in I} p_{ij}(u, t) = 1 \text{ για κάθε } i : 0 \leq u \leq t$$

Αν ορίσουμε την πιθανότητα κατάστασης $X(t)$ ως :

$$\pi_j(t) = P(X(t) = j), j = 0, 1, 2, \dots, t \geq 0 \text{ τότε θα ισχύει}$$

$$\sum_{j \in I} \pi_j(t) = 1$$

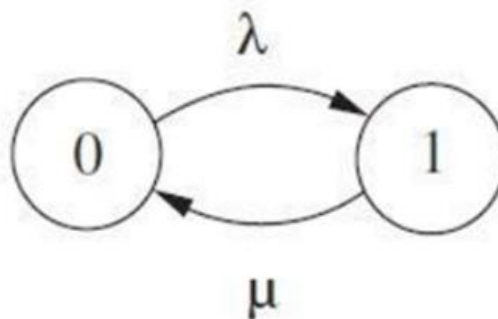
Με βάση το θεώρημα ολικής πιθανότητας, θα ισχύει επίσης για οποιοδήποτε u :

$$\pi_j(t) = \sum_{i \in I} p_{ij}(u, t) \pi_i(u) \text{ και αν θέσουμε } u = 0 \text{ έχουμε } \pi_j(t) = \sum_{i \in I} p_{ij}(0, t) \pi_i(0)$$

Έτσι η πιθανοτική συμπεριφορά της αλυσίδας θα μπορεί να προσδιοριστεί από τις πιθανότητες μετάβασης $p_{ij}(u, t)$ και το αρχικό διάνυσμα πιθανοτήτων $\pi(0)=[\pi_0(0), \pi_1(0), \dots]$ Kishor Shridharbhai Trivedi (2002)

5.5 Μοντελοποίηση δεδομένων κιβωτίου ταχυτήτων

Η μοντελοποίηση κιβωτίου ταχυτήτων ανεμογεννητριών με μοντέλα Markov μπορεί να γίνει για την πρόβλεψη της κατάστασης λειτουργίας του κιβωτίου ταχυτήτων με βάση την ιστορία των προηγούμενων καταστάσεων του. Τα μοντέλα Markov αναπαριστούν μια σειρά από καταστάσεις, όπου η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα κατάσταση και όχι από την ιστορία των προηγούμενων καταστάσεων. Για να μοντελοποιήσουμε το κιβώτιο ταχυτήτων μιας ανεμογεννήτριας με ένα μοντέλο Markov, πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε τις διάφορες καταστάσεις του κιβωτίου ταχυτήτων. Για παράδειγμα, μπορούμε να έχουμε καταστάσεις όπως "σε λειτουργία", και "βλάβη". Όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου 0 είναι η κατάσταση λειτουργίας του κιβωτίου ταχυτήτων και 1 η κατάσταση βλάβης, λ ο ρυθμός βλάβης και μ ο ρυθμός επισκευής.



Εικόνα 1.7

5.5.1 Συνάρτηση ρυθμού αποτυχιών ή ρυθμός βλάβης λ

Η συνάρτηση ρυθμού αποτυχιών ονομάζεται και ρυθμός βλάβης γιατί είναι μια πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου. Συνήθως, αυτός ο ρυθμός εκφράζεται σε μονάδες αποτυχιών ανά μονάδα χρόνου, όπως αποτυχίες ανά ώρα, αποτυχίες ανά ημέρα κλπ. Η συνάρτηση ρυθμού αποτυχιών είναι η πιθανότητα μια μονάδα που λειτουργεί για χρόνο t να αποτύχει στο άμεσο διάστημα και δίνεται από τον τύπο $\lambda(t)=f(t)/R(t)$

Όπου $F(t)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αποτυχιών και $R(t)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής των επιτυχιών.

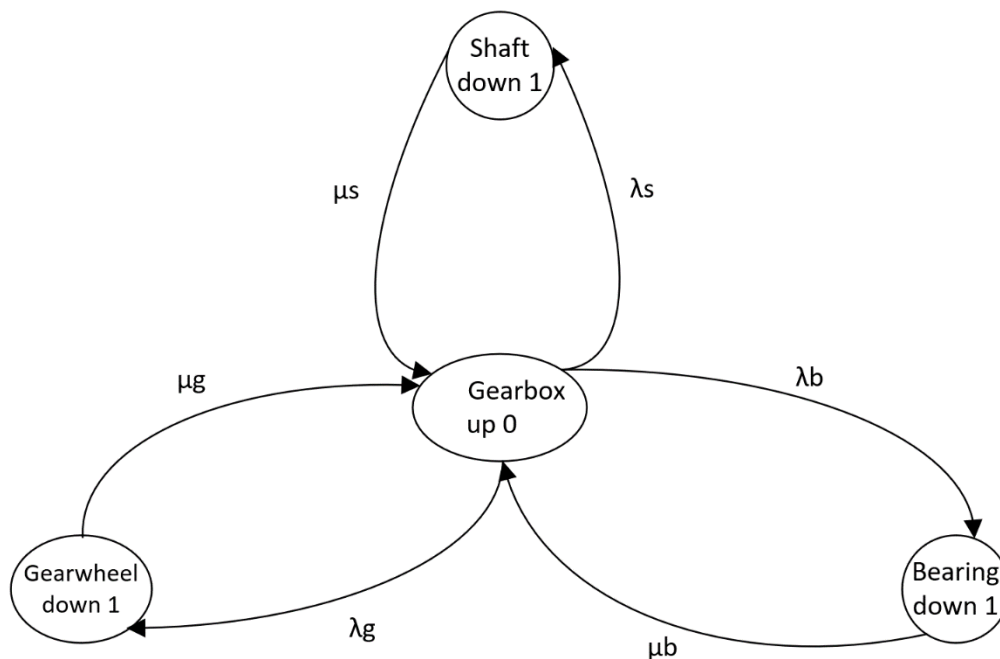
Για κάθε ενδεχόμενη βλάβη υπάρχουν και οι αντίστοιχοι ρυθμοί επισκευής (μ)

Το σύστημα είναι σε λειτουργία στην κατάσταση 0 και με ρυθμό λ γίνεται η μετάβαση στην κατάσταση 1 όπου το σύστημα βρίσκεται εκτός λειτουργίας ενώ επιστρέφει στην κατάσταση 0 με ρυθμό μ

6. Μαρκοβιανό μοντέλο (Gearbox)

6.1 Μαρκοβιανό μοντέλο

Στην παρούσα πτυχιακή λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος επιλέχθηκε το σύστημα του gearbox για να μελετηθεί



Σχήμα 5

Για τον υπολογισμό των στάσιμων κατανομών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab

6.2 Μελέτη Διαθεσιμότητας: Περίπτωση 1

Για να γίνει η μελέτη της διαθεσιμότητας του συστήματος του Gearbox επιλέχθηκαν εμπειρικά οι τιμές των ρυθμών βλαβών και επισκευής λ και μ για το κάθε βασικό γεγονός του δέντρου που παρουσιάστηκε στο σχήμα 4. Ακολουθεί ο πίνακας με τις τιμές για το κάθε ένα από τα βασικά γεγονότα του δέντρου βλαβών

Συμβάν		μ (επισκευές /ώρα)	λ (βλάβες /ώρα)
Φθορά στο κύριο ρουλεμάν	b67	m67=0.65;	l67=0.0175;
Διάβρωση των ακίδων του κύριου ρουλεμάν	b68	m68=0.55;	l68=0.0125;
Λειαντική φθορά στο κύριο ρουλεμάν	b69	m69=0.6;	l69=0.015;
Παραμόρφωση όψης και στοιχείου κύλισης του κύριου ρουλεμάν	b70	m70=0.4;	l70=0.008;
Κοίλωμα του κύριου ρουλεμάν	b71	m71=0.45;	l71=0.009;
Ανισορροπία άξονα χαμηλής ταχύτητας	b72	m72=0.35;	l72=0.006;
Ρωγμές στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	b73	m73=0.55;	l73=0.0125;
Φθορά στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	b74	m74=0.35;	l74=0.006;
Λειαντική φθορά στον άξονα χαμηλής ταχύτητας	b75	m75=0.6;	l75=0.015;
Τρύπημα του άξονα χαμηλής ταχύτητας	b76	m76=0.5;	l76=0.01;
Μη φυσιολογική δόνηση F	b77	m77=0.35;	l77=0.006;
Διάβρωση των ακίδων των ρουλεμάν του κιβωτίου ταχυτήτων	b78	m78=0.5;	l78=0.01;
Λειαντική φθορά στο κιβώτιο ταχυτήτων	b79	m79=0.65;	l79=0.0175;
Τρύπημα του κιβωτίου ταχυτήτων	b80	m80=0.60;	l80=0.014;
Παραμόρφωση όψης και στοιχείου κύλισης του κιβωτίου ταχυτήτων	b81	m81=0.55;	l81=0.0125;
Εκκεντρότητα γραναζιών	b86	m86=0.45;	l86=0.009;
Διάτρηση γραναζιών	b87	m87=0.5;	l87=0.01;
Ρωγμές στα γρανάζια	b88	m88=0.65;	l88=0.0175;
Φθορά των δοντιών του γραναζιού	b89	m89=0.65;	l89=0.0175;
Κακή σχεδίαση των οδοντωτών γραναζιών	b90	m90=0.55;	l90=0.0125;
Ελαττώματα στην επιφάνεια των οδοντωτών γραναζιών	b91	m91=0.5;	l91=0.01;
Ρωγμές στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b93	m93=0.5;	l93=0.01;
Ανισορροπία άξονα υψηλής ταχύτητας	b94	m94=0.4;	l94=0.008;
Υπερθέρμανση στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b95	m95=0.6;	l95=0.015;
Φθορά στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b96	m96=0.45;	l96=0.008;
Λειαντική φθορά στον άξονα υψηλής ταχύτητας	b97	m97=0.4;	l97=0.008;
Τρύπημα του άξονα υψηλής ταχύτητας	b98	m98=0.45;	l98=0.008;
Ρωγμές στο δίσκο του φρένου	b99	m99=0.35;	l99=0.006;
Βλάβη κινητήρα	b100	m100=0.6;	l100=0.015;
Διαρροή λαδιού στο υδραυλικό φρένο	b101	m101=0.65;	l101=0.0175;
Υπερβολική πίεση στο υδραυλικό φρένο	b102	m102=0.4;	l102=0.008;

Πίνακας 6 Ρυθμοί επισκευών-βλαβών

6.2.1 Μεθοδολογία

Ξεκινώντας την επίλυση του δέντρου βλαβών έγινε η επίλυση ξεκινώντας από το αριστερό κλαδί προς τα δεξιά και από τα βασικά γεγονότα ανεβαίνοντας προς τα επάνω.

Από το κλαδί που περιλαμβάνει το basic events b67-b71 ορίζεται ένας μηδενικός πίνακας A 6×6 (1,1) (1,2) (1,3) (1,4) (1,5) (1,6) σε γραμμές και στήλες αντίστοιχα. Η μετάβαση από το ενδιάμεσο γεγονός ln49 στα b67...b71 γίνεται με ρυθμό βλάβης λ που από πίνακα 5 είναι αντίστοιχα l67...l71, ενώ η μετάβαση από το βασικό γεγονός στο ενδιάμεσο γίνεται με ρυθμό που είναι ο ρυθμός επισκευής από πίνακα 5 m67...m71. Επίσης ορίζεται ένας πίνακας b 1×6 (ένας πίνακας με μια γραμμή και έξι στήλες) για να γίνουν οι πράξεις των πινάκων και να βρεθούν οι αντίστοιχες πιθανότητες p67..p71

Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων των βασικών γεγονότων έγινε η χρήση του προγράμματος matlab όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω output

```
function [p004,p67,p68,p69,p70,p71,p005,p72,p73,p74,p75,p76] =  
gearbox1(l67,m67,l68,m68,l69,m69,l70,m70,l71,m71,l72,m72,l73,m73,l74,m74,l75,m75,l76,m76)
```

```
A=zeros(6);
```

```
A(1,1)=-(l67+l68+l69+l70+l71);
```

```
A(1,2)=l67;
```

```
A(1,3)=l68;
```

```
A(1,4)=l69;
```

```
A(1,5)=l70;
```

```
A(1,6)=l71;
```

```
A(2,1)=m67;
```

```
A(2,2)=-m67;
```

```
A(3,1)=m68;
```

```
A(3,3)=-m68;
```

```
A(4,1)=m69;
```

```
A(4,4)=-m69;
```

```
A(5,1)=m70;
```

```
A(5,5)=-m70;
```

```
A(6,1)=m71;
```

```
A(6,6)=-m71;
```

```
A(:,end)=1.0;
```

```
b=zeros(1,6);
```

```
b(1,6)=1.0;
```

```
ssp=b/A;
```

```
p004=ssp(1);
```

```
p67=ssp(2);
```

```
p68=ssp(3);
```

```
p69=ssp(4);
```

```
p70=ssp(5);
```

```
p71=ssp(6);
```

```
%επόμενο κλαδί
```

```
B=zeros(6);

B(1,1)=-(172+173+174+175+176);
B(1,2)=172;
B(1,3)=173;
B(1,4)=174;
B(1,5)=175;
B(1,6)=176;

B(2,1)=m72;
B(2,2)=-m72;

B(3,1)=m73;
B(3,3)=-m73;

B(4,1)=m74;
B(4,4)=-m74;

B(5,1)=m75;
B(5,5)=-m75;

B(6,1)=m76;
B(6,6)=-m76;

B(:,end)=1.0;

c=zeros(1,6);

c(1,6)=1.0;

ssp=c/B;

p005=ssp(1);
p72=ssp(2);
p73=ssp(3);
p74=ssp(4);
p75=ssp(5);
p76=ssp(6);
end
```

Με τον ίδιο τρόπο έγινε ο υπολογισμός των πιθανοτήτων για τα υπόλοιπα κλαδιά

Από το matlab πήραμε τις παρακάτω τιμές για τις πιθανότητες των βασικών γεγονότων που απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα 7

p67	0,0242	p78	0,018	p94	0,0178
p68	0,0204	p79	0,0243	p95	0,0223
p69	0,0224	p80	0,021	p96	0,0159
p70	0,0179	p81	0,0205	p97	0,0178
p71	0,0179	p86	0,0176	p98	0,0159
p72	0,0156	p87	0,0176	p99	0,0157
p73	0,0206	p88	0,0237	p100	0,023
p74	0,0156	p89	0,0237	p101	0,0247
p75	0,0227	p90	0,02	p102	0,0184
p76	0,0181	p91	0,0176		
p77	0,0154	p93	0,0178		

Πίνακας 7 Πιθανότητες βασικών γεγονότων περίπτωση 1

Παρατηρούμε ότι όλες οι πιθανότητες για τα βασικά γεγονότα είναι της ίδιας τάξης και αποκλίσεις τους είναι αναμενόμενες βάσει των διαφορετικών ρυθμών βλαβών και επισκευών ανάλογα με την βαρύτητα του καθενός

Στην συνέχεια με το υπολογιστικό πρόγραμμα matlab έγινε ο υπολογισμός των ενδιάμεσων γεγονότων του δέντρου με την αρχή inclusion-exclusion principle ο γενικός τύπος της οποίας είναι :

$$|A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n| = |A_1| + |A_2| + \dots + |A_n| - |A_1 \cap A_2| - |A_1 \cap A_3| - \dots - |A_{n-1} \cap A_n| + |A_1 \cap A_2 \cap A_3| + \dots + (1^{n-1})|A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n|$$

Η αρχή μπορεί να επεκταθεί σε γεγονότα στην θεωρία πιθανοτήτων όπου τα μεγέθη των συνόλων αντικαθίστανται από πιθανότητες.

Σε αυτή την περίπτωση για τον υπολογισμό της πιθανότητας του ενδιάμεσου γεγονότος όταν υπάρχει πύλη “OR” προσθέτουμε τις επιμέρους πιθανότητες των βασικών γεγονότων αφαιρώντας τις πιθανότητες των διασταυρώσεων τους κατά ζεύγη, προσθέτοντας ξανά τις πιθανότητες των τριπλών διασταυρώσεων του κ.ο.κ

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας όταν υπάρχει πύλη “AND” υπολογίζουμε το γινόμενο των πιθανοτήτων που οδηγούν στην πύλη “AND”

```
function [p149,p148,p146,p150,p147,p143]=marina_gearbox1(p67,p68,p69,p70,p71,p72,p73,p74,p75,p76)
p149=(p67+p68+p69+p70+p71)-((p67*p68)+(p67*p69)+(p67*p70)+(p67*p71)+(p68*p69)+...
(p68*p70)+(p68*p71)+(p69*p70)+(p69*p71)+(p70*p71))+((p67*p68*p69)+(p67*p68*p70)+...
(p67*p68*p71)+(p67*p69*p70)+(p67*p69*p71)+(p67*p70*p71)+(p68*p69*p70)+(p68*p69*p71)+...
(p68*p70*p71)+(p69*p70*p71))-((p67*p68*p69*p70)+(p67*p68*p69*p71)+(p68*p69*p70*p71)+...
(p67*p69*p70*p71)+(p67*p68*p70*p71))-((p67*p68*p69*p70*p71));
p66=0.0173;
p65=0.0148;
p148=(p149+p66)-(p149*p66);
p146=p65*p148;
p150=(p72+p73+p74+p75+p76)-((p72*p73)+(p72*p74)+(p72*p75)+(p72*p76)+(p73*p74)+(p73*p75)+...
(p73*p76)+(p74*p75)+(p74*p76)+(p75*p76))+((p72*p73*p74)+(p72*p73*p75)+(p72*p73*p76)+...
(p72*p75*p76)+(p72*p74*p75)+(p72*p74*p76)+(p73*p75*p76)+(p73*p74*p75)+(p73*p75*p76)+...
(p74*p75*p76))-((p72*p73*p74*p75*p76));
p147=p150*p65;
p143=(p146+p147)-(p146*p147);

end
```

6.2.2 Αποτελέσματα

Με την εφαρμογή της συνάρτησης για όλα τα κλαδιά υπολογίζουμε τις πιθανότητες μέχρι το κορυφαίο γεγονός όπως εμφανίζονται στον πίνακα 8

p143	0,003	p153	0,0013	p162	0,1029
p144	0,000056782	p154	0,0002464	p163	0,0488
p145	0,0029	p155	0,0017	p164	0,0793
p146	0,0017	p156	0,0812	p165	0,0179
p147	0,0013	p157	0,1143	p166	0,0646
p148	0,1143	p158	0,06	p167	3,3415E-06
p149	0,0987	p159	0,0372	p168	0,00023868
p150	0,0892	p160	0,0015	p04	0,0059
p152	0,0032	p161	0,0014		

Πίνακας 8 Πιθανότητες ενδιάμεσων και κορυφαίου γεγονότος, περίπτωση 1

Παρατηρούμε ότι τα ενδιάμεσα γεγονότα στα όποια καταλήγουν πύλες “OR” είναι πολύ μεγαλύτερης τάξης από αυτά που καταλήγουν πύλες “AND” κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο γιατί στην πρώτη περίπτωση αρκεί να συμβεί ένα από τα βασικά γεγονότα ενώ στην δεύτερη περίπτωση θα πρέπει να συμβούν όλα τα βασικά γεγονότα που αποτελούν το κλαδί.

Η πιθανότητα για το ενδιαμέσο γεγονός p_{149} που είναι η φθορά στο κύριο ρουλεμάν στο οποίο υπάρχει πύλη “OR” με 5 βασικά γεγονότα είναι 0,0987 , ομοίως στο p_{150} που είναι το σφάλμα στον άξονα χαμηλής ταχύτητας είναι 0,0892 η διαφορά οφείλετε στους διαφορετικούς ρυθμούς των βασικών γεγονότων. Παρατηρείται επίσης ότι όσο λιγότερα είναι τα βασικά γεγονότα που οδηγούν στην πύλη “OR” τόσο μειώνεται η πιθανότητα του ενδιάμεσου γεγονότος. Γι’ αυτό το p_{156} που είναι η φθορά στο κιβώτιο ταχυτήτων με 4 βασικά γεγονότα είναι 0,0812, το p_{163} που είναι η φθορά του άξονα με υψηλή ταχύτητα και το p_{166} το σφάλμα υδραυλικού συστήματος πέδησης με 3 βασικά γεγονότα είναι 0,0488 και 0,0646 αντίστοιχα και το p_{159} η μετατόπιση οδοντωτών γραναζιών με 2 βασικά γεγονότα 0,0372.

Αντίθετα τα ενδιαμέσα γεγονότα στα οποία έχουμε πύλη “AND” είναι πολύ μικρότερα όπως το p_{154} η λίπανση του κιβωτίου ταχυτήτων στο οποίο οδηγούμαστε από δυο βασικά γεγονότα που ενώνονται με πύλη “AND” είναι σημαντικά μικρότερο 0,0002464 . Ομοίως και το p_{168} η υπερθέρμανση φρένων που είναι 0,00023868.

Συνεχίζοντας την επίλυση του δέντρου προς τα επάνω παρατηρούμε ότι τα ενδιαμέσα γεγονότα στα οποία οδηγούμαστε με παραπάνω από μια πύλη “OR” έχουν ακόμα μεγαλύτερες τιμές όπως το p_{148} -βλάβη του κύριου ρουλεμάν 0.1143 το p_{157} -σφάλμα στο κιβώτιο ταχυτήτων 0.1143, p_{162} -δομικές ζημιές υψηλής ταχύτητας 0.1029 και p_{164} -αστοχία φρένων 0.0793 , η παρατήρηση είναι αναμενόμενη γιατί αυξάνονται τα βασικά γεγονότα που οδηγούν στο ενδιαμέσο γεγονός και εφόσον υπάρχει η πύλη “OR” αρκεί να συμβεί ένα από αυτά . Αντίθετα στο p_{167} που αναφέρεται στα μη φυσιολογικά σήματα C που οδηγείτε από 2 πύλες “AND” είναι σημαντικά μικρότερο 0,0000033415.

Την ίδια παρατήρηση κάνουμε και στα ενδιαμέσα γεγονότα από τα 3 βασικά κλαδιά του δέντρου. Το p_{143} η χαμηλή ταχύτητα στο σύστημα κίνησης και το p_{145} η υψηλή ταχύτητα στο σύστημα κίνησης που οδηγούνται σε πύλη “OR” έχουν παρόμοιες τιμές 0,003 και 0,0029 αντίστοιχα. Ενώ το p_{144} η βλάβη στο κιβώτιο ταχυτήτων που οδηγείτε από πύλη “AND” είναι πολύ μικρότερης τάξης 0,000056782.

Στην παρούσα εργασία ως κορυφαίο γεγονός (top event) έχει οριστεί η βλάβη του gearbox η πιθανότητα $P=1-P$ βλάβης δείχνει το ποσοστό που το gearbox βρίσκεται σε λειτουργία δηλαδή την διαθεσιμότητα της. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που πήραμε από το Matlab έχουμε

$P=1-p04=1-0.0059=0.9941$ δηλαδή με βάση τα δεδομένα που υποθέσαμε το σύστημα του gearbox είναι διαθέσιμο κατά 99,41%

6.3 Μελέτη Διαθεσιμότητας: Περίπτωση 2

6.3.1 Μεθοδολογία

Γνωρίζοντας ότι μπορούμε να επέμβουμε και να βελτιώσουμε τους ρυθμούς επισκευών μ, για να διερευνήσουμε περαιτέρω την διαθεσιμότητα του συστήματος θα αυξήσουμε τον ρυθμό επισκευών σε τρία κύρια γεγονότα που έχουν αρκετά υψηλό ρυθμό βλαβών το b67 (φθορά στα τα κύρια ρουλεμάν) b76 (τρύπημα του άξονα χαμηλής ταχύτητας) και b100 (βλάβη στον κινητήρα). Για να πετύχουμε την αύξηση του ρυθμού της επισκευής θα πρέπει να γίνει αύξηση του προσωπικού συντήρησης και αύξηση διαθεσιμότητας των ανταλλακτικών ώστε να μπορεί να γίνει άμεση αντικατάσταση των εξαρτημάτων που έχουν υποστεί βλάβη και δεν μπορούν να επιδιορθωθούν. Οι νέοι ρυθμοί επισκευών που υποθέτουμε είναι στον πίνακα 9

Ρυθμός επισκευής μ	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση
m67	0.65	0.75
m76	0.5	0.6
m100	0.6	0.7

Πίνακας 9 Ρυθμός επισκευής περίπτωση 2

Με την ίδια μεθοδολογία υπολογίζουμε τις νέες πιθανότητες για τα βασικά γεγονότα όπως απεικονίζονται στον πίνακα 10, όπου παρατηρούμε ότι ακόμη και εκείνα τα γεγονότα που δεν υποθέτουμε ότι αλλάζουν αλλά σχετίζονται με τις αλλαγές στο δέντρο, παρουσιάζουν κάποιες μικρές αυξομειώσεις στις πιθανότητες τους.

<u>p67</u>	<u>0,0210</u>
p68	0,0205
p69	0,0225

p70	0,0180
p71	0,0180
p72	0,0156
p73	0,0207
p74	0,0156
p75	0,0228
p76	0,0152
p77	0,0154
p78	0,018
p79	0,0243
p80	0,021
p81	0,0205
p86	0,0176
p87	0,0176
p88	0,0237
p89	0,0237
p90	0,02
p91	0,0176
p93	0,0178
p94	0,0178
p95	0,0223
p96	0,0159
p97	0,0178
p98	0,0159
p99	0,0158
p100	0,0197
p101	0,0248
p102	0,0184

Πίνακας 10 Πιθανότητες βασικών γεγονότων Περίπτωση 2

Παρατηρούμε ότι με αύξηση του ρυθμού επισκευών μ κατά 0,10 στα 3 βασικά γεγονότα που επιλέχθηκαν έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της πιθανότητας κατά 0,0032 ,0,0029 και 0,0033 αντίστοιχα, όπως βλέπουμε στον πίνακα 11

	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση	Μεταβολή
p67	0.0242	0.0210	0.0032
p76	0.0181	0.0152	0.0029
p100	0.023	0.0197	0.0033

Πίνακας 11 Σύγκριση πιθανοτήτων Περίπτωση 1-Περίπτωση 2

6.3.2 Αποτελέσματα

Οι αλλαγές στις πιθανότητες των βασικών γεγονότων επιφέρουν αλλαγές και ενδιάμεσα γεγονότα και επηρεάζουν και το κορυφαίο γεγονός όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα 12

p143	0,0029
p144	0,000056782
p145	0,0028
p146	0,0017
p147	0,0013
p148	0,1117
p149	0,0960
p150	0,0868
p152	0,0032
p153	0,0013
p154	0,0002464
p155	0,0017
p156	0,0812
p157	0,1143
p158	0,06
p159	0,0372
p160	0,0015
p161	0,0014
p162	0,1029
p163	0,0488
p164	0,0765
p165	0,0179
p166	0,0617
p167	3,3415E-06
p168	0,00023868
p04	0,0058

Πίνακας 12 Πιθανότητες ενδιάμεσων και κορυφαίου γεγονότος, περίπτωση 2

Παρατηρούμε ότι πλέον έχει αλλάξει η διαθεσιμότητα του συστήματος η οποία είναι πλέον $P=1-p04=1-0.0058=0.9942$ ή 99,42% διαθεσιμότητα. Παρατηρούμε ότι είναι βελτιωμένη κατά 0,0001 από την προηγούμενη περίπτωση του μελετήσαμε πριν αυξήσουμε τους ρυθμούς επισκευών των 3 βασικών γεγονότων. Άρα μπορεί να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα του συστήματος που μελετάμε αρκεί να αυξηθεί ο ρυθμός επισκευών σε βασικά γεγονότα που έχουν υψηλότερο ρυθμό βλαβών.

Διαθεσιμότητα Συστήματος	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση
p04	0.9941	0.9942

Πίνακας 13 Σύγκριση διαθεσιμότητας Περίπτωση 1-Περίπτωση 2

6.4 Μελέτη Διαθεσιμότητας: Περίπτωση 3

6.4.1 Μεθοδολογία

Σε συνέχεια της διερεύνησης της διαθεσιμότητας του συστήματος θα μελετήσουμε την περίπτωση να μειώσουμε τους ρυθμούς βλαβών σε τρία βασικά γεγονότα. Τα γεγονότα που επιλέχθηκαν είναι το b69 (λειαντική φθορά ρουλεμάν), b88 (ρωγμές στα γρανάζια), b101 (διαρροή λαδιού στο υδραυλικό φρένο). Η μείωση του ρυθμού βλαβών μπορεί να επιτευχθεί με συχνότερους ελέγχους, προληπτική αντικατάσταση των εξαρτημάτων και επιλογή καλύτερων υλικών ώστε να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη χρονική διάρκεια αδιάληπτης λειτουργίας των εξαρτημάτων.

Οι νέοι ρυθμοί βλαβών παρουσιάζονται στον πίνακα 14 και είναι μειωμένοι κατά 0,01

Ρυθμός βλαβών λ	1η Περίπτωση	3η Περίπτωση
λ69	0,015	0,005
λ88	0,0175	0,0075
λ101	0,0175	0,0075

Πίνακας 14 Ρυθμός Βλαβών Περίπτωση 3

Με την ίδια μεθοδολογία που εφαρμόσαμε στην περίπτωση 1 και 2 υπολογίζουμε τις νέες πιθανότητες για τα βασικά γεγονότα όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 15 και όπως και την περίπτωση 2 έχουμε μικρές διακυμάνσεις και στις πιθανότητες των βασικών γεγονότων που δεν έγιναν αλλαγές στους ρυθμούς λόγω της σύνδεσης τους στο δέντρο

p67	0.0245
p68	0,0207
p69	0,0076
p70	0,0182
p71	0,0182
p72	0,0156
p73	0,0206
p74	0,0156
p75	0,0227

p76	0,0181
p77	0,0154
p78	0,018
p79	0,0243
p80	0,0210
p81	0,0205
p86	0,0178
p87	0,0178
p88	0,0103
p89	0,0240
p90	0,0203
p91	0,0178
p93	0,0178
p94	0,0178
p95	0,0223
p96	0,0159
p97	0,0178
p98	0,0159
p99	0,0160
p100	0,0233
p101	0,0107
p102	0,0186

Πίνακας 15 Πιθανότητες βασικών γεγονότων Περίπτωση 3

Παρατηρούμε ότι με την μείωση του ρυθμού βλαβών κατά 0,01 στα 3 βασικά γεγονότα που επιλέχθηκαν έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της πιθανότητα τους κατά 0,0148, 0,0134 και 0,0354 αντίστοιχα.

	1 ^η Περίπτωση	3 ^η Περίπτωση	Μεταβολή
p69	0,0224	0,0076	0,0148
p88	0,0237	0,0103	0,0134
p101	0,0247	00,0107	0.0354

Πίνακας 16 Σύγκριση πιθανοτήτων Περίπτωση 1-Περίπτωση 3

6.4.1 Αποτελέσματα

Όπως και στις περιπτώσεις 1 και 2 οι αλλαγές στις πιθανότητες των βασικών γεγονότων επιφέρουν αλλαγές στα ενδιάμεσα γεγονότα και επηρεάζουν και το κορυφαίο γεγονός όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα 17

p143	0,0028
p144	0,00005393

pl45	0,0027
pl46	0,0015
pl47	0,0013
pl48	0,1020
pl49	0,0862
pl50	0,0892
pl52	0,0030
pl53	0,0013
pl54	0,0002464
pl55	0,0015
pl56	0,0812
pl57	0,1034
pl58	0,0609
pl59	0,0377
pl60	0,0015
pl61	0,0012
pl62	0,1029
pl63	0,0488
pl64	0,0669
pl65	0,0179
pl66	0,0518
pl67	3,3415E-06
pl68	0,00023868
p04	0,0055

Πίνακας 17 Πιθανότητες ενδιάμεσων και κορυφαίου γεγονότος, περίπτωση 3

Παρατηρούμε ότι πλέον έχει αλλάξει η διαθεσιμότητα του συστήματος $P=1-p04=1-0.0055=0.9945$ ή 99,45% διαθεσιμότητα. Επίσης παρατηρούμε ότι η βελτίωση είναι μεγαλύτερη από τις περιπτώσεις 1 και 2 που μελετήθηκαν παραπάνω. Η βελτίωση είναι της τάξης του 0,0004 από την περίπτωση 1 του μελετήσαμε πριν μειώσουμε τους ρυθμούς βλαβών των 3 βασικών γεγονότων και της τάξης του 0,003 από την περίπτωση 2 που αυξήσαμε τους ρυθμούς επισκευής. Άρα μπορεί να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα του συστήματος που μελετάμε αρκεί να μειωθεί ο ρυθμός βλαβών σε βασικά γεγονότα που έχουν υψηλότερο ρυθμό.

Διαθεσιμότητα Συστήματος	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση	3 ^η Περίπτωση
p04	0.9941	0.9942	0.9945

Πίνακας 18 Σύγκριση διαθεσιμότητας Περίπτωση 1-Περίπτωση 2-Περίπτωση 3

7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με την εφαρμογή του δέντρου βλαβών αναλύθηκε ο βασικός εξοπλισμός μιας ανεμογεννήτριας και μελετήθηκαν οι τρόποι αστοχίας.

Αρχικά δημιουργήθηκαν δέντρα σφαλμάτων για κάθε ένα από τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, α) Θεμέλια και πύργος, β) Πτερύγια, γ) Γεννήτρια ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά στοιχεία δ) Σύστημα μετάδοσης (gearbox).

Στην συνέχεια έγινε ανάλυση του δέντρου βλαβών για το gearbox όπου υπολογίστηκε η πιθανότητα του κορυφαίου γεγονότος, η πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας το gearbox με εμπειρικά δεδομένα.

Αναλυτικά μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση υπολογίστηκε η διαθεσιμότητα του συστήματος του gearbox με τα αρχικά δεδομένα. Στην δεύτερη περίπτωση με το ίδιο μοντέλο υποθέσαμε μια αύξηση του ρυθμού επισκευής της τάξης του 0,1 σε τρία βασικά γεγονότα και υπολογίστηκε εκ νέου η διαθεσιμότητα η οποία υπολογίστηκε βελτιωμένη 0,9942 έναντι 0,9941 της πρώτης περίπτωσης. Στην τρίτη περίπτωση υποθέσαμε πάλι με το ίδιο μοντέλο μια μείωση του ρυθμού βλαβών σε τρία βασικά γεγονότα της τάξης του 0,01 και υπολογίστηκε ξανά η διαθεσιμότητα του συστήματος βελτιωμένη σε 0,9945.

Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι το gearbox, που επιλέχθηκε λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος του έχει ικανοποιητική διαθεσιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι παρότι υπάρχουν βλάβες, το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά εφόσον οι επισκευές γίνονται με τον ρυθμό που υποθέσαμε. Μελετώντας τις περιπτώσεις να αυξήσουμε το ρυθμό επισκευών και να μειώσουμε τον ρυθμό βλαβών αποδείξαμε ότι μπορούμε να πετύχουμε αύξηση της διαθεσιμότητας του συστήματος και με τις δυο περιπτώσεις. Για να επιτευχθεί αύξηση του ρυθμού επισκευής θα πρέπει να αυξηθούν οι τεχνικοί συντήρησης της ανεμογεννήτριας ώστε να μειωθεί ο χρόνος επέμβασης αλλά και να αυξηθεί η διαθεσιμότητα ανταλλακτικών ώστε εξαρτήματα που έχουν υποστεί βλάβη και δεν μπορούν να επιδιορθωθούν να μπορούν να αντικατασταθούν άμεσα. Ενώ για επιτύχουμε μείωση του ρυθμού βλαβών πρέπει να γίνει επιλογή

ποιοτικότερων υλικών και συχνή συντήρηση τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, αλλά και προληπτική αντικατάσταση εξαρτημάτων που υπόκεινται σε μεγαλύτερη καταπόνηση και έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να αστοχήσουν. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης με την μείωση του ρυθμού βλαβών μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη αύξηση της διαθεσιμότητας του συστήματος όπως φαίνεται στον πίνακα 18. Όλη η παρούσα μελέτη έχει γίνει με αύξηση και μείωση των ρυθμών χωρίς να υπολογιστεί το κόστος αυτών των ενεργειών που προτάθηκαν. Για μελλοντική και περαιτέρω διερεύνηση του παραπάνω συστήματος θα πρέπει να αναλυθεί και να μελετηθεί το κόστος που θα έχει η αύξηση του ρυθμού επισκευών σε σχέση με το ποσοστό της αύξησης που προσφέρει, όπως και το κόστος της προληπτικής συντήρησης του συστήματος που επιφέρει μείωση του ρυθμού βλαβών σε σχέση με το ποσοστό της αύξησης που προσφέρει και ποια από τις δυο περιπτώσεις ή ακόμα και ένας συνδυασμός των δυο περιπτώσεων βελτίωσης θα ήταν προτιμότερος από οικονομικής άποψης για την βελτίωση της διαθεσιμότητας του συστήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] «Wind Energy Basics». American Wind Energy Association.
- [2] Akitoshi, T.; Takashi, H.; Hiroshi, I. (2017) Application of Condition Monitoring System for Wind Turbines.
- [3] B.S Dhillon, (2002) Corrective Maintenance In: B.S Dhillon, Engineering Maintenance-A modern Approach, CRC Press LLC
- [4] Basharin G, Langville A, Naumov V (2004) The life and work of A.A. Markov
- [5] Cai-chao Zhu, Yao Li (2018), Reliability Analysis of Wind Turbines: Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines
- [6] Chan, F., & Prakash, A. (2012). Maintenance policy selection in manufacturing firms using the fuzzy MCDM approach.
- [7] Dhillon B.S. (2005). Reliability Quality, and Safety for Engineer, Boca Raton, FL: CRC Press Raghavaiah
- [8] G.Jiang, H. He, P. Xie, and Y. Tang, (2017) Stacked multilevel-denoising autoencoders: A new representation learning approach for wind turbine gearbox fault diagnosis
- [9] G. Ofualagba, E. Ubeku (2008) Wind energy conversion system- wind turbine modeling
- [10] Gasch, R., & Tvele, J. (2011). Wind Power Plants
- [11] Howard R. A. (1960) Dynamic Programming and Markov Processes
- [12] <https://www.renovablesverdes.com/el/turbina-eolica/>
- [13] J. P. Salameh, S. Cauet, E. Etien, A. Sakout, and L. Rambault, (2018) “Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review

- [14] Jantara Junior, V. L., Basoalto, H., Dong, H., Marquez, F. P. G., & Papaelias, M. (2018). Evaluating the challenges associated with the long-term reliable operation of industrial wind turbine gearboxes
- [15] Johan Ribrant (2006) Reliability performance and maintenance - A survey of failures in wind power systems
- [16] Kishor Shridharbhai Trivedi (2002), Discrete-Time Markov Chains In: Kishor Shridharbhai Trivedi, Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications
- [17] Kishor Shridharbhai Trivedi, (2002) Continuous-Time Markov Chains In: Kishor Shridharbhai Trivedi, Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications
- [18] Knezevic, J. (1994). Determination of Operations/ Production Downtime for Group Replacement Maintenance Policy
- [19] Kusiak A, Li W. (2011) The prediction and diagnosis of wind turbine faults. Renewable Energy
- [20] Lazzaroni M., Cristaldi L., Peretto L., Rinaldi P., & Catelani M. (2011). Reliability Engineering-Basic Concepts and Applications in ICT. Berlin: Springer- Verlag
- [21] Limnios Nikolaos (2005). Fault Trees.U.K.: ISTE
- [22] Misra, K. B. (2008). Maintenance engineering and maintainability: An introduction Handbook of performability engineering
- [23] P. Bangalore and L. B. Tjernberg, (2015) “An artificial neural network approach for early fault detection of gearbox bearings,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6
- [24] P. Qian, X. Ma, and P. Cross (2017) “Integrated data-driven model-based approach to condition monitoring of the wind turbine gearbox,” IET Renew. Power Gener., vol. 11

- [25] Panagiotidou, S., & Tagaras, G. (2008). Evaluation of maintenance policies for equipment subject to quality shifts and failures.
- [26] Peng Guo and Nan Bai (2011) Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring with AAKR and Moving Window Statistic Methods
- [27] Pérez, J. M. P., Márquez, F. P. G., Tobias, A., & Papaelias, M. (2013) Wind turbine reliability analysis
- [28] Q. He, J. Zhao, G. Jiang, and P. Xie, (2020) An unsupervised Multiview sparse filtering approach for current-based wind turbine gearbox fault diagnosis
- [29] Rausand M., Barros A. & Høyland A (1994). System Reliability Theory.U.S.: Wiley
- [30] Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2015) Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools
- [31] Stamatiopoulos, M., (2002.) Fault tree handbook with aerospace applications.
- [32] Tavner P, Gindele R, Faulstich S, Whittle M, Greenwood D, Hahn B. (2010) Study of effects of weather & location on wind turbine failure rates.
- [33] Tavner PJ, Xiang J, Spinato F. (2007) Reliability analysis for wind turbines. Wind Energy
- [34] Virgil Dumbrava, A.P. Ulmeanu, M. Scutariu, George Cristian Lazaroiu, P. Duquenne (2011) Analysis of reliability aspects of wind power generation in Romania using Markov models
- [35] X. Wu, G. Jiang, X. Wang, P. Xie, and X. Li, (2019) A multi-level-denoising autoencoder approach for wind turbine fault detection
- [36] Y. Feng, Y. Qiu, C. J. Crabtree, H. Long, and P. J. Tavner (2013) Monitoring wind turbine gearboxes, Wind Energy, vol. 16

- [37] Z. He, H. Shao, X. Zhang, J. Cheng, and Y. Yang, (2019) Improved deep transfer auto-encoder for fault diagnosis of gearbox under variable working conditions with small training samples
- [38] Διαλυνάς Ευάγγελος Ν. (1998) Ανάλυση Αξιοπιστίας τεχνολογικών συστημάτων
- [39] Κουτρουβέλης, Ι. (1999). Πιθανότητες και Στατιστική ΙΙ
- [40] Μπακούρος, Ι. (2002). Ειδικά θέματα για την Ποιότητα. Αξιοπιστία και Συντήρηση
- [41] Φακίνος, Δ. (2007) Στοχαστικά μοντέλα στην επιχειρησιακή έρευνα
- [42] Χαλιδιάς Νικόλαος (2021) Εφαρμοσμένα Μαθηματικά για Οικονομολόγους και Μηχανικούς

Παράρτημα

Δεδομένα από το Matlab

```
function [p004,p67,p68,p69,p70,p71,p005,p72,p73,p74,p75,p76] = gearbox1(167,m67,168, ...  
    m68,169,m69,170,m70,171,m71,172,m72,173,m73,174,m74,175,m75,176,m76)  
  
A=zeros(6);  
  
A(1,1)=-(167+168+169+170+171);  
A(1,2)=167;  
A(1,3)=168;  
A(1,4)=169;  
A(1,5)=170;  
A(1,6)=171;  
  
A(2,1)=m67;  
A(2,2)=-m67;  
  
A(3,1)=m68;  
A(3,3)=-m68;  
  
A(4,1)=m69;  
A(4,4)=-m69;  
  
A(5,1)=m70;  
A(5,5)=-m70;  
  
A(6,1)=m71;  
A(6,6)=-m71;  
  
A(:,end)=1.0;  
  
b=zeros(1,6);  
  
b(1,6)=1.0;  
  
ssp=b/A;  
  
p004=ssp(1);  
p67=ssp(2);  
p68=ssp(3);  
p69=ssp(4);  
p70=ssp(5);  
p71=ssp(6);  
%Επόμενο κλαδί
```

```
B=zeros(6);

B(1,1)=-(172+173+174+175+176);
B(1,2)=172;
B(1,3)=173;
B(1,4)=174;
B(1,5)=175;
B(1,6)=176;

B(2,1)=m72;
B(2,2)=-m72;

B(3,1)=m73;
B(3,3)=-m73;

B(4,1)=m74;
B(4,4)=-m74;

B(5,1)=m75;
B(5,5)=-m75;

B(6,1)=m76;
B(6,6)=-m76;

B(:,end)=1.0;

c=zeros(1,6);

c(1,6)=1.0;

ssp=c/B;

p005=ssp(1);
p72=ssp(2);
p73=ssp(3);
p74=ssp(4);
p75=ssp(5);
p76=ssp(6);
end
```

```
function [p149,p148,p146,p150,p147,p143]=marina_gearbox1(p67,p68,p69,p70,p71,p72,p73,p74,p75,p76)
p149=(p67+p68+p69+p70+p71)-((p67*p68)+(p67*p69)+(p67*p70)+(p67*p71)+(p68*p69)+ ...
(p68*p70)+(p68*p71)+(p69*p70)+(p69*p71)+(p70*p71))+((p67*p68*p69)+(p67*p68*p70)+ ...
(p67*p68*p71)+(p67*p69*p70)+(p67*p69*p71)+(p67*p70*p71)+(p68*p69*p70)+(p68*p69*p71)+ ...
(p68*p70*p71)+(p69*p70*p71))-((p67*p68*p69*p70)+(p67*p68*p69*p71)+(p68*p69*p70*p71)+ ...
(p67*p69*p70*p71)+(p67*p68*p70*p71))-(p67*p68*p69*p70*p71);
p66=0.0173;
p65=0.0148;
p148=(p149+p66)-(p149*p66);
p146=p65*p148;
p150=(p72+p73+p74+p75+p76)-((p72*p73)+(p72*p74)+(p72*p75)+(p72*p76)+(p73*p74)+(p73*p75)+ ...
(p73*p76)+(p74*p75)+(p74*p76)+(p75*p76))+((p72*p73*p74)+(p72*p73*p75)+(p72*p73*p76)+ ...
(p72*p75*p76)+(p72*p74*p75)+(p72*p74*p76)+(p73*p75*p76)+(p73*p74*p75)+(p73*p75*p76)+ ...
(p74*p75*p76))-(p72*p73*p74*p75*p76);
p147=p150*p65;
p143=(p146+p147)-(p146*p147);

end
```

```
function [p006,p77,p78,p79,p80,p81]=gearbox2(l77,m77,l78,m78,l79,m79,l80,m80,l81,m81)

A=zeros(6);

A(1,1)=-(l77+l78+l79+l80+l81);
A(1,2)=l77;
A(1,3)=l78;
A(1,4)=l79;
A(1,5)=l80;
A(1,6)=l81;

A(2,1)=m77;
A(2,2)=-m77;

A(3,1)=m78;
A(3,3)=-m78;

A(4,1)=m79;
A(4,4)=-m79;

A(5,1)=m80;
A(5,5)=-m80;

A(6,1)=m81;
A(6,6)=-m81;

A(:,end)=1.0;

b=zeros(1,6);

b(1,6)=1.0;

ssp=b/A;

p006=ssp(1);
p77=ssp(2);
p78=ssp(3);
p79=ssp(4);
p80=ssp(5);
p81=ssp(6);

end
```

```
function [p007,p86,p87,p88,p89,p90,p91]=gearbox3(l86,m86,l87,m87,l88,m88,l89,m89, ...  
    l90,m90,l91,m91)  
  
A=zeros(7);  
  
A(1,1)=-(l86+l87+l88+l89+l90+l91);  
A(1,2)=l86;  
A(1,3)=l87;  
A(1,4)=l88;  
A(1,5)=l89;  
A(1,6)=l90;  
A(1,7)=l91;  
  
A(2,1)=m86;  
A(2,2)=-m86;  
  
A(3,1)=m87;  
A(3,3)=-m87;  
  
A(4,1)=m88;  
A(4,4)=-m88;  
  
A(5,1)=m89;  
A(5,5)=-m89;  
  
A(6,1)=m90;  
A(6,6)=-m90;  
  
A(7,1)=m91;  
A(7,7)=-m91;  
  
A(:,end)=1.0;  
  
b=zeros(1,7);  
  
b(1,7)=1.0;  
  
ssp=b/A;  
  
p007=ssp(1);  
p86=ssp(2);  
p87=ssp(3);  
p88=ssp(4);  
p89=ssp(5);  
p90=ssp(6);  
p91=ssp(7);  
  
end
```

```
function [p156,p153,p154,p159,p158,p157,p155,p152,p144]=marina_gearbox2_3(p78,p79, ...
    p80,p81,p90,p91,p89,p86,p87,p88,p77)
p156=(p78+p79+p80+p81)-((p78*p79)+(p78*p80)+(p78*p81)+(p79*p80)+(p79*p81)+(p80*p81))+
((p78*p79*p80)+(p78*p80*p81)+(p79*p80*p81)+(p78*p79*p81))-(p78*p79*p80*p81);
p82=0.0176;
p83=0.0140;
p85=0.0145;
p84=0.0180;
p153=p156*p77;
p154=p82*p83;
p159=(p90+p91)-(p90*p91);
p158=(p159+p89)-(p159*p89);
p157=(p86+p87+p158+p88)-((p86*p87)+(p86*p158)+(p86*p88)+(p87*p158)+(p87*p88)+(p158*p88))+
((p86*p87*p158)+(p86*p158*p88)+(p87*p158*p88)+(p86*p87*p88))-(p86*p87*p158*p88);
p155=p157*p85;
p152=(p153+p154+p155)-((p153*p154)+(p153*p155)+(p154*p155)+(p153*p154*p155));
p144=p152*p84;
end
```

```
function [p008,p93,p94,p95,p96,p97,p98,p009,p99,p100,p101,p102] = gearbox4(l93,m93, ...
    194,m94,195,m95,196,m96,197,m97,198,m98,199,m99,1100,m100,1101,m101,1102,m102)

A=zeros(7);

A(1,1)=-(193+194+195+196+197+198);
A(1,2)=193;
A(1,3)=194;
A(1,4)=195;
A(1,5)=196;
A(1,6)=197;
A(1,7)=198;

A(2,1)=m93;
A(2,2)=-m93;

A(3,1)=m94;
A(3,3)=-m94;

A(4,1)=m95;
A(4,4)=-m95;

A(5,1)=m96;
A(5,5)=-m96;
|
A(6,1)=m97;
A(6,6)=-m97;

A(7,1)=m98;
A(7,7)=-m98;

A(:,end)=1.0;
```



```
b=zeros(1,7);

b(1,7)=1.0;

ssp=b/A;

p008=ssp(1);
p93=ssp(2);
p94=ssp(3);
p95=ssp(4);
p96=ssp(5);
p97=ssp(6);
p98=ssp(7);

B=zeros(5);

B(1,1)=-(199+1100+1101+1102);
B(1,2)=199;
B(1,3)=1100;
B(1,4)=1101;
B(1,5)=1102;

B(2,1)=m99;
B(2,2)=-m99;

B(3,1)=m100;
B(3,3)=-m100;

B(4,1)=m101;
B(4,4)=-m101;

B(5,1)=m102;
B(5,5)=-m102;

B(:,end)=1.0;


c=zeros(1,5);

c(1,5)=1.0;


































ssp=c/B;


































p009=ssp(1);
p99=ssp(2);
p100=ssp(3);
p101=ssp(4);
p102=ssp(5);
end
```

```
function [p04,p163,p162,p160,p168,p167,p166,p164,p161,p165,p145]=marina_gearbox4(p96, ...
    p97,p98,p93,p94,p95,p100,p101,p102,p99,p143,p144)
p163=(p96+p97+p98)-((p96*p97)+(p96*p98)+(p97*p98))+(p96*p97*p98);
p162=(p93+p94+p95+p163)-((p93*p94)+(p93*p95)+(p93*p163)+(p94*p95)+(p94*p163)+ ...
    |(p95*p163)))+(p93*p94*p95)+(p93*p95*p163)+(p93*p94*p163)+(p94*p95*p163))- (p93*p94*p95*p163);
p92=0.0143;
p104=0.0156;
p103=0.0140;
p105=0.0153;
p160=p162*p92;
p168=p104*p105;
p167=p168*p103;
p165=(p167+p93)-(p167*p93);
p166=(p100+p101+p102)-((p100*p101)+(p100*p102)+(p101*p102))+(p100*p101*p102);
p164=(p99+p166)-(p99*p166);
p161=p164*p165;
p145=(p160+p161)-(p160*p161);
p04=(p143+p144+p145)-((p143*p144)+(p143*p145)+(p144*p145))+(p143*p144*p145);
end
```



























Περίπτωση 1

```
>> m67=0.65;      167=0.0175;
m68=0.55;      168=0.0125;
m69=0.6;       169=0.015;
m70=0.4;       170=0.008;
m71=0.45;      171=0.009;
m72=0.35;      172=0.006;
m73=0.55;      173=0.0125;
m74=0.35;      174=0.006;
m75=0.6;       175=0.015;
m76=0.5;       176=0.01;
m77=0.35;      177=0.006;
m78=0.5;       178=0.01;
m79=0.65;      179=0.0175;
m80=0.60;      180=0.014;
m81=0.55;      181=0.0125;
m86=0.45;      186=0.009;
m87=0.5;       187=0.01;
m88=0.65;      188=0.0175;
m89=0.65;      189=0.0175;
m90=0.55;      190=0.0125;
m91=0.5;       191=0.01;
m93=0.5;       193=0.01;
m94=0.4;       194=0.008;
m95=0.6;       195=0.015;
m96=0.45;      196=0.008;
m97=0.4;       197=0.008;
m98=0.45;      198=0.008;
m99=0.35;      199=0.006;
m100=0.6;      1100=0.015;
m101=0.65;     1101=0.0175;
m102=0.4;      1102=0.008;
>>
>> [p004,p67,p68,p69,p70,p71,p005,p72,p73,p74,p75,p76] = gearbox1(167,m67,168,m68, 169,m69,170,m70,171,m71,172,m72,173,m73,174,m74,175,m75,176,m76);
>> [p149,p148,p146,p150,p147,p143]=marina_gearbox1(p67,p68,p69,p70,p71,p72,p73,p74, 169,m69,170,m70,171,m71,172,m72,173,m73,174,m74,175,m75,176,m76);
>> [p006,p77,p78,p79,p80,p81]=gearbox2(177,m77,178,m78,179,m79,180,m80,181,m81);
>> [p007,p86,p87,p88,p89,p90,p91]=gearbox3(186,m86,187,m87,188,m88,189,m89,190,m90, 191,m91);
>> [p156,p153,p154,p159,p158,p157,p155,p152,p144]=marina_gearbox2_3(p78,p79,p80, 191,m91);
>> [p008,p93,p94,p95,p96,p97,p98,p009,p99,p100,p101,p102] = gearbox4(193,m93,194, 194,m94,195,m95,196,m96,197,m97,198,m98,199,m99,1100,m100,1101,m101,1102,m102);
>> [p04,p163,p162,p160,p168,p167,p166,p164,p161,p165,p145]=marina_gearbox4(p96,p97, 198,m93,p94,p95,p100,p101,p102,p99,p143,p144);
>>
```

Name ▲	Value
 l100	0.0150
 l101	0.0175
 l102	0.0080
 l67	0.0175
 l68	0.0125
 l69	0.0150
 l70	0.0080
 l71	0.0090
 l72	0.0060
 l73	0.0125
 l74	0.0060
 l75	0.0150
 l76	0.0100
 l77	0.0060
 l78	0.0100
 l79	0.0175
 l80	0.0140
 l81	0.0125
 l86	0.0090
 l87	0.0100
 l88	0.0175
 l89	0.0175
 l90	0.0125
 l91	0.0100
 l93	0.0100
 l94	0.0080
 l95	0.0150
 l96	0.0080
 l97	0.0080
 l98	0.0080
 l99	0.0060
 m100	0.6000
 m101	0.6500

Name ▲	Value
 m102	0.4000
 m67	0.6500
 m68	0.5500
 m69	0.6000
 m70	0.4000
 m71	0.4500
 m72	0.3500
 m73	0.5500
 m74	0.3500
 m75	0.6000
 m76	0.5000
 m77	0.3500
 m78	0.5000
 m79	0.6500
 m80	0.6000
 m81	0.5500
 m86	0.4500
 m87	0.5000
 m88	0.6500
 m89	0.6500
 m90	0.5500
 m91	0.5000
 m93	0.5000
 m94	0.4000
 m95	0.6000
 m96	0.4500
 m97	0.4000
 m98	0.4500
 m99	0.3500
 p004	0.8971
 p005	0.9074
 p006	0.9008
 p007	0.8798



































Name ▲	Value
p008	0.8924
p009	0.9182
p04	0.0059
p100	0.0230
p101	0.0247
p102	0.0184
p67	0.0242
p68	0.0204
p69	0.0224
p70	0.0179
p71	0.0179
p72	0.0156
p73	0.0206
p74	0.0156
p75	0.0227
p76	0.0181
p77	0.0154
p78	0.0180
p79	0.0243
p80	0.0210
p81	0.0205
p86	0.0176
p87	0.0176
p88	0.0237
p89	0.0237
p90	0.0200
p91	0.0176
p93	0.0178
p94	0.0178
p95	0.0223
p96	0.0159
p97	0.0178
p98	0.0159


































Name ▲	Value
 p99	0.0157
 pl43	0.0030
 pl44	5.6782e-05
 pl45	0.0029
 pl46	0.0017
 pl47	0.0013
 pl48	0.1143
 pl49	0.0987
 pl50	0.0892
 pl52	0.0032
 pl53	0.0013
 pl54	2.4640e-04
 pl55	0.0017
 pl56	0.0812
 pl57	0.1143
 pl58	0.0600
 pl59	0.0372
 pl60	0.0015
 pl61	0.0014
 pl62	0.1029
 pl63	0.0488
 pl64	0.0793
 pl65	0.0179
 pl66	0.0646
 pl67	3.3415e-06
 pl68	2.3868e-04


































Περίπτωση 2



























```
Command Window

>> m67=0.75;    167=0.0175;
m68=0.55;    168=0.0125;
m69=0.6;    169=0.015;
m70=0.4;    170=0.008;
m71=0.45;    171=0.009;
m72=0.35;    172=0.006;
m73=0.55;    173=0.0125;
m74=0.35;    174=0.006;
m75=0.6;    175=0.015;
m76=0.7;    176=0.01;
m77=0.35;    177=0.006;
m78=0.5;    178=0.01;
m79=0.65;    179=0.0175;
m80=0.60;    180=0.014;
m81=0.55;    181=0.0125;
m86=0.45;    186=0.009;
m87=0.5;    187=0.01;
m88=0.65;    188=0.0175;
m89=0.65;    189=0.0175;
m90=0.55;    190=0.0125;
m91=0.5;    191=0.01;
m93=0.5;    193=0.01;
m94=0.4;    194=0.008;
m95=0.6;    195=0.015;
m96=0.45;    196=0.008;
m97=0.4;    197=0.008;
m98=0.45;    198=0.008;
m99=0.35;    199=0.006;
m100=0.7;    1100=0.015;
m101=0.65;    1101=0.0175;
m102=0.4;    1102=0.008;
>> [p004,p67,p68,p69,p70,p71,p005,p72,p73,p74,p75,p76] = gearbox1(167,m67,168,m68, ...
    169,m69,170,m70,171,m71,172,m72,173,m73,174,m74,175,m75,176,m76);
>> [p149,p148,p146,p150,p147,p143]=marina_gearbox1(p67,p68,p69,p70, ...
    p71,p72,p73,p74,p75,p76);
>> [p006,p77,p78,p79,p80,p81]=gearbox2(177,m77,178,m78,179,m79,180, ...
    m80,181,m81);
>> [p007,p86,p87,p88,p89,p90,p91]=gearbox3(186,m86,187,m87,188,m88, ...
    189,m89,190,m90,191,m91);
>> [p156,p153,p154,p159,p158,p157,p155,p152,p144]=marina_gearbox2_3(p78, ...
    p79,p80,p81,p90,p91,p89,p86,p87,p88,p77);
>> [p008,p93,p94,p95,p96,p97,p98,p009,p99,p100,p101,p102] = gearbox4(193, ...
    m93,194,m94,195,m95,196,m96,197,m97,198,m98,199,m99,1100,m100,1101,m101,1102,m102);
fx >> [p04,p163,p162,p160,p168,p167,p166,p164,p161,p165,p145]=marina_gearbox4(p96, ...
    p97,p98,p93,p94,p95,p100,p101,p102,p99,p143,p144);|
```


Name 	Value
 I100	0.0150
 I101	0.0175
 I102	0.0080
 I67	0.0175
 I68	0.0125
 I69	0.0150
 I70	0.0080
 I71	0.0090
 I72	0.0060
 I73	0.0125
 I74	0.0060
 I75	0.0150
 I76	0.0100
 I77	0.0060
 I78	0.0100
 I79	0.0175
 I80	0.0140
 I81	0.0125
 I86	0.0090
 I87	0.0100
 I88	0.0175
 I89	0.0175
 I90	0.0125
 I91	0.0100
 I93	0.0100
 I94	0.0080
 I95	0.0150
 I96	0.0080
 I97	0.0080
 I98	0.0080
 I99	0.0060
 m100	0.7000
 m101	0.6500



































Name ▲	Value
 m102	0.4000
 m67	0.7500
 m68	0.5500
 m69	0.6000
 m70	0.4000
 m71	0.4500
 m72	0.3500
 m73	0.5500
 m74	0.3500
 m75	0.6000
 m76	0.7000
 m77	0.3500
 m78	0.5000
 m79	0.6500
 m80	0.6000
 m81	0.5500
 m86	0.4500
 m87	0.5000
 m88	0.6500
 m89	0.6500
 m90	0.5500
 m91	0.5000
 m93	0.5000
 m94	0.4000
 m95	0.6000
 m96	0.4500
 m97	0.4000
 m98	0.4500
 m99	0.3500
 p004	0.9000
 p005	0.9122
 p006	0.9008
 p007	0.8798



































Name ▲	Value
 p008	0.8924
 p009	0.9212
 p04	0.0058
 p100	0.0197
 p101	0.0248
 p102	0.0184
 p67	0.0210
 p68	0.0205
 p69	0.0225
 p70	0.0180
 p71	0.0180
 p72	0.0156
 p73	0.0207
 p74	0.0156
 p75	0.0228
 p76	0.0130
 p77	0.0154
 p78	0.0180
 p79	0.0243
 p80	0.0210
 p81	0.0205
 p86	0.0176
 p87	0.0176
 p88	0.0237
 p89	0.0237
 p90	0.0200
 p91	0.0176
 p93	0.0178
 p94	0.0178
 p95	0.0223
 p96	0.0159
 p97	0.0178
 p98	0.0159

Name ▲	Value
 p99	0.0158
 pl43	0.0029
 pl44	5.6782e-05
 pl45	0.0028
 pl46	0.0017
 pl47	0.0013
 pl48	0.1117
 pl49	0.0960
 pl50	0.0848
 pl52	0.0032
 pl53	0.0013
 pl54	2.4640e-04
 pl55	0.0017
 pl56	0.0812
 pl57	0.1143
 pl58	0.0600
 pl59	0.0372
 pl60	0.0015
 pl61	0.0014
 pl62	0.1029
 pl63	0.0488
 pl64	0.0765
 pl65	0.0179
 pl66	0.0617
 pl67	3.3415e-06
 pl68	2.3868e-04



























Περίπτωση 3

```
>> m67=0.65;    167=0.0175;
m68=0.55;    168=0.0125;
m69=0.6;    169=0.005;
m70=0.4;    170=0.008;
m71=0.45;    171=0.009;
m72=0.35;    172=0.006;
m73=0.55;    173=0.0125;
m74=0.35;    174=0.006;
m75=0.6;    175=0.015;
m76=0.5;    176=0.01;
m77=0.35;    177=0.006;
m78=0.5;    178=0.01;
m79=0.65;    179=0.0175;
m80=0.60;    180=0.014;
m81=0.55;    181=0.0125;
m86=0.45;    186=0.009;
m87=0.5;    187=0.01;
m88=0.65;    188=0.0075;
m89=0.65;    189=0.0175;
m90=0.55;    190=0.0125;
m91=0.5;    191=0.01;
m93=0.5;    193=0.01;
m94=0.4;    194=0.008;
m95=0.6;    195=0.015;
m96=0.45;    196=0.008;
m97=0.4;    197=0.008;
m98=0.45;    198=0.008;
m99=0.35;    199=0.006;
m100=0.6;    1100=0.015;
m101=0.65;    1101=0.0075;
m102=0.4;    1102=0.008;
>> [p004,p67,p68,p69,p70,p71,p005,p72,p73,p74,p75,p76] = gearbox1(167,m67,168,m68, ...
    169,m69,170,m70,171,m71,172,m72,173,m73,174,m74,175,m75,176,m76);
>> [p149,p148,p146,p150,p147,p143]=marina_gearbox1(p67,p68,p69,p70, ...
    p71,p72,p73,p74,p75,p76);
>> [p006,p77,p78,p79,p80,p81]=gearbox2(177,m77,178,m78,179,m79,180, ...
    m80,181,m81);
>> [p007,p86,p87,p88,p89,p90,p91]=gearbox3(186,m86,187,m87,188,m88, ...
    189,m89, 190,m90,191,m91);
>> [p156,p153,p154,p159,p158,p157,p155,p152,p144]=marina_gearbox2_3(p78, ...
    p79,p80,p81,p90,p91,p89,p86,p87,p88,p77);
>> [p008,p93,p94,p95,p96,p97,p98,p009,p99,p100,p101,p102] = gearbox4(193, ...
    m93,194,m94,195,m95,196,m96,197,m97,198,m98,199,m99,1100,m100,1101,m101,1102,m102);
>> [p04,p163,p162,p160,p168,p167,p166,p164,p161,p165,p145]=marina_gearbox4(p96, ...
    p97,p98,p93,p94,p95,p100,p101,p102,p99,p143,p144);
x >>
```

Name 	Value
 I100	0.0150
 I101	0.0075
 I102	0.0080
 I67	0.0175
 I68	0.0125
 I69	0.0050
 I70	0.0080
 I71	0.0090
 I72	0.0060
 I73	0.0125
 I74	0.0060
 I75	0.0150
 I76	0.0100
 I77	0.0060
 I78	0.0100
 I79	0.0175
 I80	0.0140
 I81	0.0125
 I86	0.0090
 I87	0.0100
 I88	0.0075
 I89	0.0175
 I90	0.0125
 I91	0.0100
 I93	0.0100
 I94	0.0080
 I95	0.0150
 I96	0.0080
 I97	0.0080
 I98	0.0080
 I99	0.0060
 m100	0.6000
 m101	0.6500

Name 	Value
 m102	0.4000
 m67	0.6500
 m68	0.5500
 m69	0.6000
 m70	0.4000
 m71	0.4500
 m72	0.3500
 m73	0.5500
 m74	0.3500
 m75	0.6000
 m76	0.5000
 m77	0.3500
 m78	0.5000
 m79	0.6500
 m80	0.6000
 m81	0.5500
 m86	0.4500
 m87	0.5000
 m88	0.6500
 m89	0.6500
 m90	0.5500
 m91	0.5000
 m93	0.5000
 m94	0.4000
 m95	0.6000
 m96	0.4500
 m97	0.4000
 m98	0.4500
 m99	0.3500
 p004	0.9108
 p005	0.9074
 p006	0.9008
 p007	0.8919

Name	Value
p008	0.8924
p009	0.9314
p04	0.0055
p100	0.0233
p101	0.0107
p102	0.0186
p67	0.0245
p68	0.0207
p69	0.0076
p70	0.0182
p71	0.0182
p72	0.0156
p73	0.0206
p74	0.0156
p75	0.0227
p76	0.0181
p77	0.0154
p78	0.0180
p79	0.0243
p80	0.0210
p81	0.0205
p86	0.0178
p87	0.0178
p88	0.0103
p89	0.0240
p90	0.0203
p91	0.0178
p93	0.0178
p94	0.0178
p95	0.0223
p96	0.0159
p97	0.0178
p98	0.0159

Name ▲	Value
 p99	0.0160
 pl43	0.0028
 pl44	5.3930e-05
 pl45	0.0027
 pl46	0.0015
 pl47	0.0013
 pl48	0.1020
 pl49	0.0862
 pl50	0.0892
 pl52	0.0030
 pl53	0.0013
 pl54	2.4640e-04
 pl55	0.0015
 pl56	0.0812
 pl57	0.1034
 pl58	0.0609
 pl59	0.0377
 pl60	0.0015
 pl61	0.0012
 pl62	0.1029
 pl63	0.0488
 pl64	0.0669
 pl65	0.0179
 pl66	0.0518
 pl67	3.3415e-06
 pl68	2.3868e-04

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης