



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μοντελοποίηση, Ανάλυση και Σχεδιασμός Βέλτιστων  
Στρατηγικών Ευκαιριακής Συντήρησης για Συστήματα με  
Στοιχεία που Υπόκεινται σε Πολλαπλά Στάδια Υποβάθμισης**

**Αλέξανδρος Σελεμίδης**

**A.M.: 2312013108**

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Κούτρας

Χίος, 2023

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
Abstract .....	7
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	9
Κεφάλαιο 2. Μοντελοποίηση αξιοπιστίας συστημάτων και σχετικές κατανομές πιθανότητας .....	14
2.1 Εισαγωγή στον ορισμό της αξιοπιστίας και του ρυθμού εμφάνισης βλάβης .....	14
2.2 Συστήματα σειριακής διάταξης.....	15
2.3 Συστήματα παράλληλης διάταξης .....	15
2.4 Συστήματα k-out-of-N .....	16
2.5 Τυχαία μεταβλητή .....	16
2.6 Διακριτή τυχαία μεταβλητή .....	17
2.6.1 Συνάρτηση πυκνότητας (μάζας) πιθανότητας (PMF).....	17
2.6.2 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (CDF) .....	18
2.6.3 Κατανομή Bernoulli .....	19
2.6.4 Διωνυμική κατανομή.....	20
2.6.5 Κατανομή Poisson .....	21
2.7 Συνεχής τυχαία μεταβλητή .....	21
2.7.1 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (CDF) .....	22
2.7.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF).....	22
2.7.3 Εκθετική κατανομή.....	23
2.7.4 Κατανομή Weibull .....	24
2.7.5 Κανονική κατανομή.....	24
Κεφάλαιο 3. Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος με στοιχεία που υπόκεινται σε υποβάθμιση και ενέργειες συντήρησης .....	26
3.1 Γενική περιγραφή του συστήματος και των στοιχείων που το αποτελούν.....	26
3.2 Ενέργειες συντήρησης.....	28
3.3 Μοντελοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος .....	28
3.3.1 Μοντελοποίηση της αξιοπιστίας ενός στοιχείου με δύο συνεχόμενα στάδια υποβάθμισης.....	29
3.4 Ανάπτυξη μοντέλου συντήρησης.....	30
3.4.1 Βασική στρατηγική .....	31
3.4.2 Δυναμική στρατηγική.....	33
3.5 Αλγοριθμική διαδικασία επιλογής ενεργειών κατά τις προγραμματισμένες διακοπές .....	35

3.5.1 Ευκαιριακή απόφαση συντήρησης .....	36
3.5.2 Απόφαση είδους ενέργειας.....	37
3.5.3 Ενημέρωση προγραμμάτων των στοιχείων .....	38
3.5.4 Συνολικό κόστος και ρυθμός κόστους του συστήματος κατά τη διακοπή $n$ .....	42
Κεφάλαιο 4. Αριθμητική εφαρμογή στο υπό μελέτη σύστημα .....	45
4.1 Αποτελέσματα στατικών προγραμμάτων βασικής στρατηγικής .....	46
4.2 Αποτελέσματα αλγοριθμικής διαδικασίας .....	46
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων .....	92
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα .....	98
5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα της έρευνας .....	98
5.2 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις .....	100
Βιβλιογραφία .....	101

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βασίλη Κούτρα για την προθυμία του να με βοηθήσει σε οτιδήποτε χρειαζόταν καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την μητέρα μου καθώς και τον εκλιπόντα πατέρα μου που δεν κατάφερε να δει ολοκληρωμένη την εργασία μου, για την στήριξη την συμβολή και την υπομονή τους καθώς δίχως αυτούς δεν θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω τις σπουδές μου στο Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης.

*Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής διπλωματικών εργασιών του ΤΜΟΔ. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.*

## Περίληψη

Η εξάρτηση της ανθρωπότητας από τα τεχνολογικά συστήματα είναι εμφανής, με την χρήση αυτών στην βιομηχανία, στις παραγωγικές διαδικασίες και στις μεταφορές να γίνεται ολοένα και εντονότερη. Η εξέλιξη αυτή κάνει τα συστήματα πιο πολύπλοκα και ο αριθμός των μονάδων τους αυξάνεται. Επομένως, σημαντικός είναι ο σωστός σχεδιασμός ώστε να διασφαλίζεται η υψηλή αξιοπιστία και το χαμηλό λειτουργικό κόστος τους. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων σημαντικός παράγοντας είναι η σωστή συντήρηση καθώς και η χρονική στιγμή που θα εφαρμοσθεί. Καθότι έτσι μειώνονται οι βλάβες και το κόστος των λειτουργιών. Η παραπάνω ανάγκη μεταφράζεται ως ανάγκη βελτιστοποίησης του προγράμματος συντήρησης του εκάστοτε συστήματος ή και ως ανάγκη εύρεσης της βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης του συστήματος. Εκτός από τις κλασικές προσεγγίσεις συντήρησης, σε συστήματα με πληθώρα εξαρτημάτων είναι ευρέως διαδεδομένη και η ευκαιριακή συντήρηση, κατά την οποία ταυτόχρονες ενέργειες γίνονται σε παραπάνω από ένα εξάρτημα όταν το σύστημα δεν λειτουργεί για κάποια προγραμματισμένη συντήρηση ή κατά τη διάρκεια κάποια βλάβης, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους. Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι εμφανής η ανάγκη ύπαρξης βέλτιστων ευκαιριακών στρατηγικών συντήρησης που να εξισορροπούν το κόστος και την αξιοπιστία του συστήματος.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά στην μοντελοποίηση, ανάλυση και σχεδιασμό βέλτιστων στρατηγικών ευκαιριακής συντήρησης για ένα σύστημα τριών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά που υπόκεινται σε δύο στάδια υποβάθμισης, με ενέργειες συντήρησης δύο επιπέδων (συντήρηση και ανανέωση). Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του ρυθμού κόστους του συστήματος. Αρχικά η υποβάθμιση δύο σταδίων περιγράφεται με ένα μοντέλο αξιοπιστίας και με την βοήθεια της συντήρησης. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η βασική στρατηγική συντήρησης. Η βασική στρατηγική συντήρησης εφαρμόζεται στα στοιχεία, ενώ από την εφαρμογή της λαμβάνεται το στατικό πρόγραμμα συντήρησης κάθε στοιχείου, το οποίο με σκοπό την ελαχιστοποίηση του ρυθμού κόστους μέσα σε έναν κύκλο ανανέωσης δίνει τον αριθμό των συντηρήσεων καθώς και την κρίσιμη αξιοπιστία σε έναν κύκλο ανανέωσης. Στην συνέχεια δίνεται η δυναμική στρατηγική συντήρησης των στοιχείων, η μέθοδος επιλογής των ευκαιριακών αποφάσεων συντήρησης των στοιχείων με ένα όριο αναλογίας αξιοπιστίας και ο τρόπος ενημέρωσης των επερχόμενων προγραμμάτων συντήρησης των στοιχείων. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μια αλγοριθμική διαδικασία, η οποία αποφασίζει σε ποια στοιχεία θα γίνει κάποια

ενέργεια αλλά και τι είδους ενέργεια θα είναι αυτή, ενημερώνει τις καταστάσεις των στοιχείων σύμφωνα με τις ενέργειες που έγιναν στην διακοπή και προγραμματίζει την επόμενη διακοπή του συστήματος, με απώτερο σκοπό της μείωση του ρυθμού κόστους του συστήματος. Η διαδικασία αυτή εξετάζεται για τρεις τιμές διαφορετικών ορίων αναλογίας αξιοπιστίας σε πεπερασμένο ορίζοντα προγραμματισμού της συντήρησης του συστήματος για την σύγκριση αποτελεσμάτων. Η παραπάνω προσέγγιση εφαρμογής ευκαιριακής συντήρησης εφαρμόζεται σε μια μελέτη περίπτωσης και τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής.

## Abstract

Humanity's dependence on technological systems is evident, with their use in industry, production processes and transportation becoming ever more intense. This development is making systems more complex and the number of their components is increasing. It is therefore important to design them correctly to ensure high reliability and low operating costs. To achieve the above objectives, proper maintenance is an important factor as well as the timing of its implementation, as this reduces breakdowns and operational costs. The above need arises the necessity of optimizing the maintenance schedule of the system in question or even the urge of finding the optimal maintenance strategy for the system. In addition to the classical maintenance approaches, in systems with multiple components, opportunistic maintenance is widely used, where simultaneous actions are taken on more than one component when the system is not operating for a scheduled maintenance or during a failure, resulting in cost reduction. According to the above, the need for optimal opportunistic maintenance strategies that balance cost and system reliability is obvious.

This thesis deals with modelling, analysis and design of optimal opportunistic maintenance strategies for a system of three components connected in series, which are subject to two degradation stages, with two levels of maintenance actions (maintenance and renewal). The objective is to minimize the cost rate of the system. Initially the two-stage degradation is described by a reliability model and by means of maintenance. Then, the basic maintenance strategy is presented. The basic maintenance strategy is applied to the components, and by its application, the static maintenance schedule for each component is obtained, which in order to minimize the cost rate within a renewal cycle, gives the number of maintenance actions as well as the critical reliability in a renewal cycle. The dynamic component maintenance strategy is then presented. Thereafter, a method for selecting opportunistic component maintenance decisions with a reliability proportion threshold followed by the way of updating the upcoming component maintenance schedules follows. Finally, the results obtained from an algorithmic procedure which decides on which components to perform an action and what kind of action this will be, updates the states of the components according to the actions performed in the current shutdown and schedules the next system shutdown, with the ultimate objective of reducing the system cost rate, are presented. This process is tested for three values of different reliability proportion thresholds at a finite horizon of system maintenance scheduling



to compare results. The abovementioned opportunistic maintenance approach is applied in a case study. Finally, the results and conclusions of this research are presented.

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Τα τεχνολογικά συστήματα ανθίζουν αυξάνοντας την λειτουργικότητα και την πολυπλοκότητα τους, με αποτέλεσμα η ανάγκη συντήρησης αυτών να γίνεται ολοένα πιο περίπλοκη και απαιτητική. Η μοντελοποίηση της υποβάθμισης των συστημάτων πλέον δεν περιορίζεται στο ένα στάδιο, ενώ αποτελούνται από πολλές μονάδες οι οποίες είναι όμοιες ή και ανόμοιες μεταξύ τους, και η δομή του συστήματος διαφέρει από σειριακή, σε παράλληλη και  $k$  από τα  $N$ . Η κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος συνήθως υποβαθμίζεται με τη χρήση και την πάροδο του χρόνου. Αυτή η υποβάθμιση οδηγεί αναπόφευκτα σε αστοχία, εκτός αν οι ενέργειες συντήρησης πραγματοποιούνται εγκαίρως (G. Liu et al., 2022).

Η ανάγκη για ορθά προγραμματισμένες ενέργειες συντήρησης είναι εμφανής διότι, τέτοιες ενέργειες μειώνουν το κόστος διακοπής λειτουργίας, το κόστος από περιττές ενέργειες συντήρησης καθώς και γενικά το λειτουργικό κόστος ενός συστήματος. Παράλληλα, οι ορθά προγραμματισμένες ενέργειες συντήρησης αυξάνουν την διάρκεια ζωής του συστήματος καθώς έχουν ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση ή και την εξάλειψη βλαβών, μειώνοντας έτσι τον αριθμό τους. Για ένα σύστημα του οποίου η βλάβη ισοδυναμεί με μοιραίο ατύχημα για τον άνθρωπο και ταυτόχρονα το κόστος των ενεργειών συντήρησης του να είναι υπέρογκο, απαιτείται ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα συντήρησης που να εξισορροπεί την ασφάλεια και την οικονομία.

Για τα συστήματα πολλαπλών μονάδων, η δημοφιλής ευκαιριακή συντήρηση αποσκοπεί στην εκτέλεση ενεργειών συντήρησης σε στοιχεία που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια κατάστασης (όπως το χρονικό διάστημα ή η κατάσταση υποβάθμισης) κατά τη διάρκεια των παραθύρων ευκαιρίας που προκύπτουν από τις έγκαιρες ενέργειες συντήρησης ή/και επισκευής σε άλλες μονάδες (Wang, 2002). Σε αντίθεση με τα προγράμματα προληπτικής συντήρησης για μεμονωμένα εξαρτήματα, η ευκαιριακή συντήρηση οδηγεί σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης και το συνολικό χρόνο διακοπής λειτουργίας (Olde Keizer et al., 2018; Xia et al., 2021). Ως μέθοδος συντήρησης σε επίπεδο συστήματος, η ευκαιριακή συντήρηση είναι πολύ πιο περίπλοκη από τη συντήρηση σε επίπεδο εξαρτημάτων, επειδή κάθε εξάρτημα έχει τη δική του διαδικασία υποβάθμισης και διαφορετικό βέλτιστο πρόγραμμα (Ma et al., 2021).

Ένα ακριβές μοντέλο υποβάθμισης αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βελτιστοποίηση του προγράμματος συντήρησης (Bouvard et al., 2011). Η συνολική αξιοπιστία του συστήματος υιοθετείται συχνά για την περιγραφή της διαδικασίας υποβάθμισης και τίθεται πάντα ως στόχος (Chen et al., 2014, 2013), μεταβλητή απόφασης (G. Liu et al., 2021; Zhou et al., 2007) ή περιορισμός (Y. Liu et al., 2020) στα μοντέλα βελτιστοποίησης του προγράμματος συντήρησης. Η συνάρτηση αξιοπιστίας είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση διαδικασιών υποβάθμισης ενός σταδίου και δύσκολων διαδικασιών υποβάθμισης πολλαπλών σταδίων με τη διατύπωση της σχέσης μεταξύ αστοχιών και χρόνου χρήσης ως μοντέλο πιθανότητας (Zhang, 2019; Zhou et al., 2007). Τα κατώτατα όρια αξιοπιστίας για τις ευκαιριακές αποφάσεις σχετίζονται συνήθως με το μοντέλο υποβάθμισης και καλύπτουν κυρίως τις καταστάσεις υποβάθμισης, τους κινδύνους αστοχίας και τους χρόνους λειτουργίας (Wu et al., 2020). Ένα άλλο μοντέλο που προτείνεται στη σχετική βιβλιογραφία ενσωματώνει την πρόβλεψη της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής στο όριο αξιοπιστίας για να οργανώσει τις απαραίτητες προληπτικές ενέργειες συντήρησης (Bakir et al., 2021). Η αξιοπιστία επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν όριο στην λήψη αποφάσεων που αφορούν την βελτιστοποίηση της ευκαιριακής συντήρησης για τον ακριβή προσδιορισμό των ενεργειών συντήρησης σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά υποβάθμισης των εξαρτημάτων (G. Liu et al., 2022).

Τα προγράμματα συντήρησης του κάθε συστήματος αλλά και των στοιχείων που το αποτελούν, χρειάζεται να είναι συντονισμένα, διότι κάθε στοιχείο έχει το δικό του βέλτιστο πρόγραμμα συντήρησης. Τα στατικά προγράμματα συντήρησης των στοιχείων λόγω της ευκαιριακής συντήρησης θα χρειαστεί να μεταβληθούν και άρα παύουν να είναι βέλτιστα. Έτσι δημιουργείται η απαίτηση αναδιαμόρφωσής τους. Όταν οι ενέργειες προληπτικής συντήρησης κατηγοριοποιηθούν ως ατελής συντήρηση (Stapelberg, 2009), οι επακόλουθες ενέργειες συντήρησης (ή τα διαστήματα) θα διαταραχθούν και θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν με μια μέθοδο μερικού προγραμματισμού (partial scheduling method) (Chalabi et al., 2016; Xia et al., 2012). Επομένως, για την υλοποίηση προληπτικών ενεργειών συντήρησης και όταν αυτές διαχωρίζονται σε ατελείς (Preventive Maintenance-PM) και τέλειες (Preventive Repair-PR) ή αλλιώς σε συντήρηση και ανανέωση αντίστοιχα, απαιτείται η δυναμική ενημέρωση των βέλτιστων προγραμμάτων συντήρησης των στοιχείων καθώς και των καταστάσεων στις οποίες αυτά βρίσκονται μετά την εκάστοτε διακοπή. Ο ορίζοντας προγραμματισμού αφορά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εφαρμόζεται το πρόγραμμα συντήρησης και κατά την διάρκεια του οποίου ισχύει η βελτιστοποίηση που ορίζει το εκάστοτε πρόγραμμα συντήρησης του συστήματος. Όταν ο ορίζοντας

προγραμματισμού είναι πεπερασμένος, είναι γνωστός πριν από τον υπολογισμό του προγράμματος συντήρησης του συστήματος. Να σημειωθεί ότι η βελτιστοποίηση που ορίζει το πρόγραμμα συντήρησης ενδέχεται να αναφέρεται σε πληθώρα στόχων όπως είναι η μείωση του κόστους και η αύξηση της αξιοπιστίας (G. Liu et al., 2021).

Ένα μοντέλο συντήρησης με ευκαιριακές και πολυεπίπεδες ενέργειες προληπτικής συντήρησης αποτελεί δύσκολο έργο διότι, τα στοιχεία απαιτούν διαφορετικές ενέργειες και τα διαστήματα που απαιτείται να γίνει κάποια ενέργεια είναι ετερογενή. Άρα για την βελτιστοποίηση ενός τέτοιου προγράμματος χρειάζονται ευκαιριακές αποφάσεις ενεργειών συντήρησης καθώς και δυναμικός επαναπρογραμματισμός ώστε να προσδιοριστεί το επόμενο πρόγραμμα συντήρησης (G. Liu et al., 2022).

Με αυτά τα δεδομένα, στην εν λόγω Διπλωματική Εργασία η πολιτική που ακολουθείται είναι η δημιουργία ενός μοντέλου αξιοπιστίας με υποβάθμιση πολλαπλών σταδίων για να εξεταστεί η λειτουργία των στοιχείων ενός συστήματος καθώς και η διαδικασία υποβάθμισής τους. Στην συνέχεια, σε αυτό το μοντέλο εντάσσονται οι ενέργειες συντήρησης (PMs) και ενσωματώνονται ο παράγοντας γήρανσης των στοιχείων καθώς και ο παράγοντας αύξησης του ρυθμού εμφάνισης βλάβης τους μετά την περάτωση κάποιας ενέργειας συντήρησης (PM). Με την χρήση της αντίστροφης συνάρτησης της αξιοπιστίας, βρίσκονται τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στις ενέργειες, τα οποία και χρησιμοποιούνται για την βασική στρατηγική συντήρησης των στοιχείων. Η βασική στρατηγική προγραμματίζει ενέργειες συντήρησης (PMs) όταν η αξιοπιστία φτάνει σε μια κρίσιμη τιμή, ενώ όταν ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης (PMs) φτάσει μια συγκεκριμένη προκαθορισμένη τιμή, τότε προγραμματίζει μια ενέργεια ανανέωσης (PR) ως την επόμενη ενέργεια. Η εν λόγω στρατηγική εκτείνεται σε έναν κύκλο ανανέωσης που είναι το διάστημα ανάμεσα σε δύο ενέργειες ανανέωσης (PRs). Η βασική στρατηγική δίνει ως αποτέλεσμα το βέλτιστο στατικό πρόγραμμα συντήρησης κάθε στοιχείου ενός συστήματος, και αποτελείται από τον αριθμό των ενεργειών συντήρησης (PMs) και την κρίσιμη αξιοπιστία σε έναν κύκλο ανανέωσης. Το στατικό πρόγραμμα είναι βέλτιστο ως προς τον ρυθμό κόστους του στοιχείου. Στην συνέχεια, και εφόσον το στατικά προγράμματα λόγω της ευκαιριακής συντήρησης παύουν να είναι βέλτιστα, δημιουργούνται τα ημερολόγια συντήρησης τα οποία συγκρατούν πληροφορίες σχετικές την κατάσταση των εξαρτημάτων. Τα ημερολόγια εισάγονται στο μοντέλο αξιοπιστίας που υπάρχει καθώς και στην συνάρτηση υπολογισμού των διαστημάτων ανάμεσα στις ενέργειες. Δημιουργείται έτσι η δυναμική στρατηγική κατά την οποία με την βοήθεια των ημερολόγιων συντήρησης, παίρνονται δυναμικές αποφάσεις σχετικά με το είδος της ενέργειας (PM ή PR) που θα εκτελεστεί

στο κάθε στοιχείο. Γνώμονας για την επιλογή της ενέργειας είναι ο μικρότερος ρυθμός κόστους του στοιχείου. Στην συνέχεια δημιουργείται μια αλγοριθμική διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται σε κάθε προγραμματισμένη διακοπή του συστήματος, με σκοπό τη διερεύνηση της αναγκαιότητας κάποιας ενέργειας σε κάποιο από τα στοιχεία του συστήματος. Κατά την διαδικασία αυτή, με την χρήση του κατώτατου ορίου αναλογίας αξιοπιστίας αποφασίζεται σε ποια στοιχεία θα πραγματοποιηθεί κάποια ευκαιριακή ενέργεια. Έπειτα ενσωματώνεται η δυναμική στρατηγική και με την χρήση αυτής, αποφασίζεται το τι είδους ενέργεια θα πραγματοποιηθεί σε κάθε στοιχείο για το οποίο έχει προγραμματιστεί ενέργεια. Ενημερώνονται εν συνεχεία τα προγράμματα συντήρησης των στοιχείων ανάλογα με το αν έγινε κάποια ενέργεια, καθώς και με το τι είδους ενέργεια ήταν, όπως και αν το εκάστοτε στοιχείο ήταν αυτό για το οποίο είχε προγραμματιστεί η διακοπή του συστήματος. Ενημερώνονται επίσης οι καταστάσεις των στοιχείων σύμφωνα με αν έγινε κάποια ενέργεια καθώς και τι είδους ενέργεια έγινε στο κάθε στοιχείο. Τέλος, υπολογίζεται η επόμενη προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και υπολογίζεται το κόστος της διακοπής καθώς και ο αντίστοιχος ρυθμός κόστους. Η παραπάνω διαδικασία έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του ρυθμού κόστους του συστήματος σε κάθε διακοπή.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω ανάλυση καθώς επίσης και την μοντελοποίηση της αξιοπιστίας των συστημάτων, εξετάζεται μια μελέτη περίπτωσης. Η μελέτη αφορά στη μοντελοποίηση, στην ανάλυση και στον σχεδιασμό βέλτιστων στρατηγικών ευκαιριακής συντήρησης για το *hot section* ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα αεροπλάνου (Zhu et al., 2016). Πιο συγκεκριμένα τα τρία εξαρτήματα που απαρτίζουν το σύστημα ονομάζονται High Pressure Turbine (HPT), Low Pressure Turbine (LPT) και High Pressure Compressor (HPC) (Li et al., 2023). Η διάταξη του συστήματος είναι σειριακή, πράγμα που εξυπηρετεί την μελέτη ευκαιριακών αποφάσεων. Για να ερευνηθεί η ευκαιριακή συντήρηση πρέπει στο σύστημα να υφίσταται οικονομική εξάρτηση, διότι η εξάρτηση αυτή επιτρέπει την μείωση του χρόνου διακοπής της λειτουργίας ή την μείωση του κόστους διακοπής της λειτουργίας με την ευκαιριακή συντήρηση. Η οικονομική εξάρτηση συνήθως συναντάται στα συστήματα με σειριακή διάταξη στοιχείων (G. Liu et al., 2022). Οικονομική εξάρτηση σημαίνει ότι το κόστος εκτέλεσης δύο ενεργειών συντήρησης ταυτόχρονα δεν είναι το ίδιο με το άθροισμα του κόστους εκτέλεσης των δύο ενεργειών ετεροχρονισμένα (Arts and Basten, 2018). Στην συγκεκριμένη εργασία το κόστος της διάρκειας διακοπής είναι αυτό που αναδεικνύει την οικονομική εξάρτηση, εφόσον το κόστος διάρκειας της διακοπής θα είναι μικρότερο στην περίπτωση που εκτελούνται παραπάνω από μία ενέργειες στο σύστημα ταυτόχρονα, σε σύγκριση με το να εκτελεστεί ο ίδιος αριθμός ενεργειών σε

διαφορετικούς χρόνους. Οι ενέργειες που εκτελούνται στο σύστημα αποτελούνται από την προληπτική ανανέωση (PR), η οποία επαναφέρει το εξάρτημα στην αρχική του κατάσταση, την ατελή προληπτική συντήρηση (PM) και τέλος την ελάχιστη επισκευή (MR) που χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση μιας βλάβης δίχως να βελτιώνει την διαδικασία φθοράς των εξαρτημάτων (Stapelberg, 2009). Πιο συγκεκριμένα, η διάρκεια μίας ενέργειας (MR) είναι μη αμελητέα καθώς ο χρόνος διακοπής έχει μεγάλη αξία (Wang and Pham, 2003). Από την άλλη μεριά, η επίδρασή της στην διαδικασία υποβάθμισης θεωρείται αμελητέα (G. Liu et al., 2022). Οι παραδοχές που λαμβάνονται υπ' όψη είναι πως η διαδικασία υποβάθμισης των εξαρτημάτων αποτελείται από δύο συνεχόμενα στάδια, ο χρόνος παραμονής του κάθε εξαρτήματος σε κάθε ένα εκ' των δύο σταδίων είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί εκθετική κατανομή διαφορετικής παραμέτρου. Πιο συγκεκριμένα, τα εξαρτήματα χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να φτάσουν από την αρχική κατάσταση καλής λειτουργίας (Operational) στην κατάσταση υποβαθμισμένης λειτουργίας (Defective), συγκριτικά με τον χρόνο που χρειάζεται για να βρεθούν από την κατάσταση υποβαθμισμένης λειτουργίας (Defective) σε κατάσταση βλάβης (Failed). Επίσης λαμβάνονται υπόψη δύο παράγοντες με την περάτωση των ενεργειών συντήρησης (PM). Ο παράγοντας μείωσης ηλικίας (Malik, 1979) και ο παράγοντας αύξησης του ρυθμού εμφάνισης βλάβης (Nakagawa and Mizutani, 2008), οι οποίοι ενσωματώνουν την επίπτωση των ενεργειών συντήρησης (PM) στην αξιοπιστία και την γήρανση των στοιχείων.

Η δομή των επακόλουθων κεφαλαίων της Διπλωματικής Εργασίας έχει ως εξής. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο σχετικό με την μοντελοποίηση της αξιοπιστίας συστημάτων και των κατανομών πιθανότητας. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος, γίνεται η μοντελοποίηση του και παρουσιάζεται η αλγοριθμική διαδικασία βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος που αφορά μια διακοπή. Στο επόμενο κεφάλαιο (4<sup>ο</sup>) γίνεται εφαρμογή των παραπάνω αναλύσεων στο hot section ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα αεροπλάνου και παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της αλγοριθμικής διαδικασίας. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 αναφέρονται τα συμπεράσματα της εν λόγω έρευνας και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

## Κεφάλαιο 2. Μοντελοποίηση αξιοπιστίας συστημάτων και σχετικές κατανομές πιθανότητας

Η ανάλυση της αξιοπιστίας είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια είτε για να περιγράψει τις επιδόσεις κάποιου συστήματος, είτε για να προσδιοριστεί η κατάσταση του όσο αφορά τις βλάβες και την εμφάνισή τους. Όσο αφορά στην αξιοπιστία σαν μέτρο, αυτή είναι συνάρτηση του χρόνου και άρα το πεδίο ορισμού της είναι το  $[0, \infty)$ , ενώ το σύνολο τιμών της είναι το  $[0, 1]$ . Οι πιο συχνές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της αξιοπιστίας συστημάτων είναι τα δέντρα σφαλμάτων, τα μπλοκ διαγραμμάτων αξιοπιστίας και οι αλυσίδες Markov.

### 2.1 Εισαγωγή στον ορισμό της αξιοπιστίας και του ρυθμού εμφάνισης βλάβης

Η αξιοπιστία σε επίπεδο εξαρτήματος ορίζεται ως η πιθανότητα να επιβιώσει το εξάρτημα μέχρι κάποιο χρόνο  $t$  (Trivedi, 2016) και συμβολίζεται ως  $R(t)$ . Έστω μια τυχαία μεταβλητή  $X$  που συμβολίζει το χρόνο ζωής ή το χρόνο έως την εμφάνιση βλάβης ενός εξαρτήματος. Τότε, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό ισχύει ότι  $R(t) = P(X > t) = 1 - F(t)$ , όπου  $F(t)$  είναι η συνάρτηση κατανομής της της τυχαίας μεταβλητής  $X$ . Η αξιοπιστία είναι μια μονότονα φθίνουσα συνάρτηση ως προς το χρόνο, καθώς διαφορετικά το εξάρτημα θα λειτουργούσε για πάντα δίχως βλάβες. Για να θεωρηθεί μία συνάρτηση ως συνάρτηση αξιοπιστίας θα πρέπει:

- Στην αρχή της λειτουργίας του εξαρτήματος, στο χρόνο δηλαδή  $t = 0$ , ισχύει  $R(0) = 1$
- $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$

Εφόσον μπορεί να καθοριστεί η εξίσωση αξιοπιστίας ενός εξαρτήματος, είναι δυνατό να βρεθεί και η συνάρτηση του ρυθμού εμφάνισης βλάβης του, η οποία συμβολίζεται ως  $\lambda(t)$ . Ο ορισμός του ρυθμού εμφάνισης βλάβης είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα ένα εξάρτημα το οποίο έχει επιβιώσει έως την χρονική στιγμή  $t$  να παρουσιάσει βλάβη στο διάστημα  $(t, t + \Delta t]$  (Trivedi, 2016), όπου  $\Delta t$  είναι ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Υπολογίζεται από τον τύπο  $\lambda(t) = f(t)/R(t)$ , με  $f(t)$  να είναι

η πιθανότητα το εξάρτημα να εμφανίσει βλάβη στο  $(t, t + \Delta t]$  ή αλλιώς η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου ζωής του εξαρτήματος. Πιο απλά, ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης είναι η πιθανότητα να εμφανιστεί βλάβη στο  $(t, t + \Delta t]$  δεδομένου ότι δεν έχει εμφανιστεί βλάβη έως το  $t$ . Μονάδα μέτρησης του ρυθμού βλάβης είναι ο αριθμός των βλαβών στην μονάδα του χρόνου.

Ο τρόπος υπολογισμού της αξιοπιστίας στα συστήματα αλλάζει ανάλογα με την διάταξη των εξαρτημάτων του εκάστοτε συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από αυτές τις διατάξεις.

## 2.2 Συστήματα σειριακής διάταξης

Σειριακή διάταξη εμφανίζουν τα συστήματα των οποίων τα επιμέρους στοιχεία, είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε αστοχία ή ανάγκη για διακοπή λειτουργίας σε κάποιο στοιχείο μεταφέρεται σε ολόκληρο το σύστημα. Η αξιοπιστία ενός σειριακού συστήματος ( $R_s$ ) υπολογίζεται ως το γινόμενο της αξιοπιστίας των επιμέρους στοιχείων του ( $R_i$ ). Σε αυτήν την περίπτωση, είναι πιθανό η αύξηση του αριθμού εξαρτημάτων ( $n$ ) να μειώνει την αξιοπιστία του συστήματος.

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

## 2.3 Συστήματα παράλληλης διάταξης

Στα συστήματα με παράλληλη διάταξη, ή διαφορετικά σε συστήματα στα οποία τα εξαρτήματα που τα απαρτίζουν είναι συνδεδεμένα παράλληλα, για να αποτύχει το σύστημα θα πρέπει να αποτύχουν όλα τα επιμέρους στοιχεία, υπό το πρίσμα ότι οι αποτυχίες των στοιχείων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η αξιοπιστία του συστήματος ( $R_p$ ) σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται αν από την μονάδα αφαιρεθεί η αναξιοπιστία του συστήματος.

$$R_p = 1 - F_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2)$$



Στην παράλληλη διάταξη, όσο περισσότερα εξαρτήματα είναι συνδεδεμένα τόσο μεγαλύτερη είναι η αξιοπιστία του συστήματος. Εδώ ισχύει ο νόμος της φθίνουσας απόδοσης κατά τον οποίο ρυθμός αύξησης της αξιοπιστίας με κάθε πρόσθετο εξάρτημα μειώνεται ραγδαία καθώς αυξάνεται ο αριθμός των εξαρτημάτων (Trivedi, 2016).

## 2.4 Συστήματα k-out-of-N

Η διάταξη k-out-of-N (kooN) αποτελεί μια περίπτωση συνδυασμού των παραπάνω διατάξεων. Στη συγκεκριμένη διάταξη, ένα σύστημα που αποτελείται από  $N$  στοιχεία και είναι λειτουργικό αν  $k$  ( $\leq N$ ) στοιχεία λειτουργούν χωρίς βλάβη. Αν  $k = N$  τότε το σύστημα είναι σειριακής διάταξης, ενώ αν  $k = 1$  τότε είναι παράλληλης διάταξης (Trivedi, 2016).

$$R_{k|N} = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} R^i (1-R)^{N-i} \quad (3)$$

Ο χρόνος ζωής ενός στοιχείου ή το πλήθος των στοιχείων που λειτουργούν σε ένα τεχνολογικό σύστημα είναι τυχαίες μεταβλητές που περιγράφονται με την χρήση γνωστών κατανομών πιθανότητας. Στην συνέχεια ακολουθούν ο ορισμός της τυχαίας μεταβλητής. Γίνεται ένας διαχωρισμός ανάμεσα σε διακριτή και συνεχής τυχαία μεταβλητή, ορίζονται οι συναρτήσεις μάζας και πυκνότητας πιθανότητας τους (PMF, PDF), καθώς επίσης και οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής τους (CDF). Έπειτα παρουσιάζονται μερικές γνώστες κατανομές πιθανότητας για τις διακριτές και τις συνεχείς μεταβλητές.

## 2.5 Τυχαία μεταβλητή

Είναι μια συνάρτηση  $X$  με πεδίο ορισμού τον δειγματικό χώρο  $\Omega$ . Το σύνολο των τιμών που παίρνει η τυχαία μεταβλητή  $X$  ονομάζεται εικόνα της  $X$  και θα είναι ένα υποσύνολο του συνόλου όλων των πραγματικών αριθμών  $\mathbb{R}$ . Άρα μια τυχαία μεταβλητή  $X$  σε έναν δειγματικό χώρο  $\Omega$ , είναι μία συνάρτηση  $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  που αντιστοιχεί έναν πραγματικό αριθμό  $X(\omega) \forall \omega \in \Omega$ . Με απλούστερα λόγια κάθε απεικόνιση από τον δειγματικό χώρο  $\Omega$ , σε κάποιο υποσύνολο των πραγματικών αριθμών είναι τυχαία

μεταβλητή (απεικονίζει κάθε στοιχείο  $\omega$  του  $\Omega$  στο  $X(\omega) \in \mathbb{R}$ ). Οι τυχαίες μεταβλητές χωρίζονται σε διακριτές, συνεχείς και μικτές. Με τις μικτές να αποτελούν έναν συνδυασμό των διακριτών και των συνεχών. Στην συνέχεια γίνεται λόγος για τους δύο τύπους μεταβλητών που αναφέρθηκαν (διακριτές, συνεχείς).

## 2.6 Διακριτή τυχαία μεταβλητή

Η τυχαία μεταβλητή που θα μπορούσε να πάρει τιμές από ένα σύνολο διακριτών αριθμών και, ως εκ τούτου, η εικόνα της τυχαίας μεταβλητής είναι είτε πεπερασμένη είτε μετρήσιμη. Πιο απλά μια τυχαία μεταβλητή λέγεται διακριτή εάν το σύνολο των τιμών της είναι πεπερασμένο ή το πολύ (απείρως) αριθμήσιμο.

### 2.6.1 Συνάρτηση πυκνότητας (μάζας) πιθανότητας (PMF)

Ορίζεται το ενδεχόμενο  $A_x$  ως το σύνολο των σημείων  $\{\omega | X(\omega) = x\}$  ή αλλιώς  $\{X = x\}$ . Η παρακάτω σχέση (4) υπολογίζει την πιθανότητα  $P(X = x) \forall x \in \mathbb{R}$ . Έτσι, έχει οριστεί μια συνάρτηση με πεδίο ορισμού το χώρο των ενδεχόμενων της τυχαίας μεταβλητής  $X$  και με το εύρος της το διάστημα  $[0, 1]$ .

$$P(A_x) = P([X = x]) = P(\{\omega | X(\omega) = x\}) = \sum_{X(\omega)=x} P(\omega) \quad (4)$$

Η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι η συνάρτηση μάζας πιθανότητας (probability mass function-PMF) και συμβολίζεται ως  $f(x)$ . Άρα η συνάρτηση μάζας πιθανότητας παρουσιάζει την πιθανότητα η τιμή της τυχαίας μεταβλητής  $X$  κατά την εκτέλεση του πειράματος να είναι ίση με  $x$  ή αλλιώς την πιθανότητα  $X = x$ . Άρα ισχύει:

$$f(x) = P(X = x) = \sum_{X(\omega)=x} P(\omega) \quad (5)$$

Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- $0 \leq f(x) \leq 1 \forall x \in \mathbb{R}$ . Εφόσον η συνάρτηση μάζας πιθανότητας είναι πιθανότητα

- Εφόσον η τυχαία μεταβλητή αποδίδει κάποια τιμή  $x \in \mathbb{R}$  σε κάθε σημείο  $\omega \in \Omega$ . Ισχύει  $\sum_{x \in \mathbb{R}} f(x) = 1$ . Ενώ για τα σημεία που δεν ανήκουν στο σύνολο τιμών της τυχαίας μεταβλητής ισχύει  $f(x) = 0$
- Για διακριτή τυχαία μεταβλητή, το σύνολο  $\{x | f(x) \neq 0\}$  είναι ένα πεπερασμένο ή μετρήσιμα άπειρο υποσύνολο των πραγματικών αριθμών και ορίζεται ως η εικόνα της τυχαίας μεταβλητής

## 2.6.2 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (CDF)

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative probability function-CDF) συμβολίζεται ως  $F(x)$  και χρησιμοποιείται για να βρεθεί η πιθανότητα ενός συνόλου και όχι ενός σημείου. Δηλαδή για να βρεθεί η πιθανότητα του συνόλου  $\{\omega | X(\omega) \in A\}$  ή αλλιώς  $[X \in A]$  για κάποιο  $A \subseteq \mathbb{R}$ .

$$\{\omega | X(\omega) \in A\} = \bigcup_{x_i \in A} \{\omega | X(\omega) = x_i\} \quad (6)$$

$$P(X \in A) = \sum_{x_i \in A} f(x_i) \quad (7)$$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής είναι η συνάρτηση  $F(x): \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$  ώστε  $F(x) = P(X \leq x) = P(X \in (-\infty, x])$  με  $x \in \mathbb{R}$ . Πιο απλά η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δίνει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή να πάρει οποιαδήποτε τιμή μικρότερη ή ίση της  $x$ .

$$F(x) = P(-\infty < X \leq x) = P(X \leq x) = \sum_{X \leq x} f(X) \quad (8)$$

Είναι εμφανές από την σχέση (9) ότι γίνεται να προσδιοριστεί η αθροιστική συνάρτηση κατανομής από την συνάρτηση μάζας πιθανότητας καθώς και το και αντίστροφο. Μια τυχαία μεταβλητή είναι καλά ορισμένη όταν είναι γνωστές οι τιμές που παίρνει καθώς και οι πιθανότητες που αντιστοιχούν σε αυτές (Vasileiou, 2000). Δηλαδή όταν είναι γνωστή η συνάρτηση μάζας πιθανότητας ή αντίστοιχα η αθροιστική συνάρτηση κατανομής.

$$P(X = x) = f(x) = F(x) - F(x - 1) \quad (9)$$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- $0 \leq F(x) \leq 1 \quad \forall x \in \mathbb{R}$ . Εφόσον αθροιστική συνάρτηση κατανομής είναι πιθανότητα
- Δεξιά συνεχής
- Μονότονα αύξουσα συνάρτηση του  $x$
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$  και  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$
- Αυξάνεται μόνο με θετικό άλμα ίσο με  $f(x_i)$  για  $i \geq 1$  και στο διάστημα  $[x_i, x_{i+1})$  έχει σταθερή τιμή

Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες από τις πιο γνωστές και διαδεδομένες στην μελέτη αξιοπιστίας συστημάτων διακριτές κατανομές πιθανότητας.

### 2.6.3 Κατανομή Bernoulli

Μια τυχαία μεταβλητή  $X$  ακολουθεί κατανομή Bernoulli παραμέτρου  $p$  με  $0 < p < 1$  και συμβολίζεται  $X \sim B(p)$ . Οι τιμές της τυχαίας μεταβλητής είναι 0 ή 1 με  $P(X = 1) = p$  και  $P(X = 0) = 1 - p = q$ . Το ενδεχόμενο  $[X = 1]$  ονομάζεται επιτυχία ενώ το ενδεχόμενο  $[X = 0]$  αποτυχία. Οι πιθανότητες που αντιστοιχούν σε αυτά τα ενδεχόμενα λέγονται πιθανότητα επιτυχίας  $p$  και αποτυχίας  $q$  αντίστοιχα. Ένα τέτοιο πείραμα ονομάζεται μια δοκιμή Bernoulli. Τέτοιου είδους μεταβλητή θα μπορούσε να αποτελεί το αποτέλεσμα της ρίψης ενός νομίσματος με το ενδεχόμενο επιτυχίας να είναι γράμματα ή κορώνα. Οι συναρτήσεις της μάζας πιθανότητας (10,11) και της αθροιστικής κατανομής (12) δίνονται παρακάτω.

$$f(0) = P(X = 0) = q \quad (10)$$

$$f(1) = P(X = 1) = p \quad (11)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ q, & 0 \leq x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

## 2.6.4 Διωνυμική κατανομή

Αποτελείται από μια ακολουθία  $n$  ανεξάρτητων πειραμάτων Bernoulli και η πιθανότητα επιτυχίας  $p$  είναι σταθερή σε κάθε πείραμα. Η κατανομή αυτή δίνει την πιθανότητα  $k$  επιτυχιών σε  $n$  αριθμό πειραμάτων Bernoulli με πιθανότητα επιτυχίας  $p$  και πιθανότητα αποτυχίας  $1 - p = q$  σε κάθε πείραμα. Τέτοιου είδους διακριτή τυχαία μεταβλητή θα μπορούσε να είναι το σύνολο των λειτουργικών εξαρτημάτων ενός τεχνολογικού συστήματος. Έστω  $Y_n$  ο αριθμός των επιτυχιών σε  $n$  δοκιμές Bernoulli. Το πεδίο ορισμού της τυχαίας μεταβλητής είναι όλα τα  $n$  σύνολα των 0 και 1. Ενώ η εικόνα της θα είναι  $\{0, 1, \dots, n\}$ . Η τιμή που αντιστοιχεί σε ένα σημείο από την τυχαία μεταβλητή είναι ουσιαστικά το πλήθος των επιτυχιών έως και το  $n$  πείραμα. Η τυχαία μεταβλητή  $Y_n$  ακολουθεί διωνυμική κατανομή παραμέτρων  $n$ ,  $p$  και συμβολίζεται ως  $Y_n \sim B(k; n, p)$ . Στις σχέσεις (13) και (14) δίνονται η συνάρτηση μάζας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής αντίστοιχα της τυχαίας μεταβλητής που ακολουθεί διωνυμική κατανομή. Ενώ η μέση τιμή και η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής παρουσιάζονται στις σχέσεις (15) και (16).

$$f(k) = P(Y_n = k) = \begin{cases} \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}, & 0 \leq k \leq n \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (13)$$

$$F(k) = \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (14)$$

$$E[Y_n] = np \quad (15)$$

$$Var[Y_n] = \sigma^2 = np(1-p) \quad (16)$$

Οι προϋποθέσεις ώστε μια τυχαία διακριτή μεταβλητή να ακολουθεί διωνυμική κατανομή είναι οι εξής:

- Κάθε πείραμα έχει ακριβώς δύο αμοιβαία αποκλειώμενα ενδεχόμενα
- Η πιθανότητα επιτυχίας σε κάθε πείραμα είναι σταθερή
- Τα αποτελέσματα διαδοχικών πειραμάτων είναι αμοιβαία ανεξάρτητα

## 2.6.5 Κατανομή Poisson

Χρησιμοποιείται για να βρεθεί η πιθανότητα με την οποία ένα απομονωμένο ενδεχόμενο συμβαίνει όσες φορές έχει αυτό καθοριστεί, όταν ο ρυθμός που συμβαίνουν τα ενδεχόμενα είναι σταθερός. Μετράει μόνο τα ενδεχόμενα που συμβαίνουν και όχι αυτά που δεν συμβαίνουν. Δηλαδή υπολογίζει την πιθανότητα  $k$  ενδεχομένων στο χρονικό διάστημα διάρκειας  $t$ . Μια διακριτή τυχαία μεταβλητή που θα μπορούσε να ακολουθεί κατανομή Poisson είναι ο αριθμός των εξαρτημάτων ενός συστήματος που θα παρουσιάσουν βλάβη εντός ενός χρονικού διαστήματος. Μια διακριτή τυχαία μεταβλητή  $X$  ακολουθεί κατανομή Poisson παραμέτρου  $\lambda \in \mathbb{R}_+$ , συμβολίζεται  $X \sim P(\lambda)$ . Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής δίνεται στην σχέση (17), ενώ η μέση τιμή και η διασπορά της στις σχέσεις (18) και (19) αντίστοιχα.

$$f(k) = P(X = k) = f(k; \lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

$$E[X] = \lambda \quad (18)$$

$$Var[X] = \sigma^2 = \lambda \quad (19)$$

## 2.7 Συνεχής τυχαία μεταβλητή

Η τυχαία μεταβλητή είναι μια συνάρτηση που δίνει πραγματικές τιμές στον δειγματικό χώρο  $\Omega$ . Όταν ο δειγματικός χώρος είναι μη αριθμήσιμος τότε δεν είναι κάθε υποσύνολο του δειγματικού χώρου ένα ενδεχόμενο στο οποίο μπορεί να αποδοθεί κάποια πιθανότητα. Ορίζεται  $F$  η κλάση των μετρήσιμων υποσυνόλων του δειγματικού χώρου. Έστω  $X$  μια τυχαία μεταβλητή είναι απαραίτητο η πιθανότητα  $P(X \leq x)$  να είναι καλά ορισμένη για κάθε πραγματικό αριθμό  $x$ . Αν η τυχαία μεταβλητή είναι ορισμένη στο χώρο  $(\Omega, F, P)$  χρειάζεται το  $\{\omega | X(\omega) \leq x\}$  να είναι ενδεχόμενο και να ανήκει στο  $F$ . Με πιο απλά λόγια μια συνεχής τυχαία μεταβλητή  $X$  σε έναν χώρο  $(\Omega, F, P)$  είναι μια συνάρτηση  $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ . Η συνεχής τυχαία μεταβλητή αντιστοιχεί έναν πραγματικό αριθμό  $X(\omega) \forall \omega \in \Omega$ , τέτοιο ώστε για κάθε πραγματικό  $x$ , το σύνολο των σημείων  $\{\omega | X(\omega) \leq x\}$  να είναι ένα ενδεχόμενο, δηλαδή μέλος της  $F$ . Ακόμη εάν  $P(X = x) = 0$  για κάθε τιμή  $x$  που παίρνει η τυχαία μεταβλητή τότε η τυχαία μεταβλητή είναι συνεχής.

### 2.7.1 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (CDF)

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής σε αντίθεση με αυτήν μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής, δεν έχει άλματα αλλά αυξάνεται συνεχώς. Άρα μια συνεχής τυχαία μεταβλητή χαρακτηρίζεται από μία αθροιστική συνάρτηση κατανομής που συμβολίζεται  $F(x)$ , είναι συνεχής συνάρτηση του  $x$  για  $x \in \mathbb{R}$  και δίνει την πιθανότητα  $P(X \leq x)$ . Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής γίνεται να βρεθεί από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Έστω λοιπόν,  $f(x)$  μια μη αρνητική συνάρτηση με πεδίο ορισμού το πεδίο τιμών της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $X$  ισχύει η σχέση (20).

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(y) dy, x \in \mathbb{R} \quad (20)$$

Η CDF έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- $0 \leq F(x) \leq 1 \forall x \in \mathbb{R}$
- Μονότονα αύξουσα συνάρτηση του  $x$
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$  και  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$
- Συνεχής δεξιά

Αναφέρθηκε παραπάνω πως η CDF μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής δεν κάνει άλματα. Αυτό σημαίνει ότι  $P\{\omega | X(\omega) = c\} = P[X = c] = 0$ . Άλλα αυτό δεν σημαίνει πως το εν λόγω ενδεχόμενο είναι κενό παρά μόνο πως η πιθανότητα που αποδίδεται σε αυτό το σύνολο είναι μηδενική.

### 2.7.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)

Όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής προκύπτουν η μία γνωρίζοντας την άλλη. Άρα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μίας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής προκύπτει ως  $f(x) = dF(x)/dx$ . Σε αντίθεση με την συνάρτηση μάζας πιθανότητας, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δεν είναι πιθανότητα οπότε είναι αποδεκτό  $f(x) > 1$  σε κάποιο σημείο  $x$ .

Οι ιδιότητες της PDF είναι οι παρακάτω:

- $f(x) \geq 0 \forall x$

- $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες από τις πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες στην μελέτης αξιοπιστίας συστημάτων συνεχείς κατανομές πιθανότητας.

### 2.7.3 Εκθετική κατανομή

Μια συνεχής τυχαία μεταβλητή  $X$  ακολουθεί εκθετική κατανομή παραμέτρου  $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$ . Συμβολίζεται ως  $X \sim E(\lambda)$ . Σχετίζεται με την κατανομή Poisson εφόσον ο χρόνος ανάμεσα σε δυο διαδοχικές αφίξεις Poisson είναι μια συνεχής τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί εκθετική κατανομή. Μια άλλη τυχαία μεταβλητή που θα μπορούσε να ακολουθεί εκθετική κατανομή είναι ο χρόνος ζωής ενός εξαρτήματος σε ένα τεχνολογικό σύστημα. Η συγκεκριμένη κατανομή έχει το χαρακτηριστικό της έλλειψης μνήμης. Δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης ενδεχομένου σε κάθε χρονικό διάστημα είναι ανεξάρτητη της προηγούμενης κατάστασης και εξαρτάται μόνο από την διάρκεια της θεωρούμενης περιόδου (Trivedi, 2016). Εναλλακτικά για τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος μιας νέας άφιξης είναι στατιστικά ανεξάρτητος από τον χρόνο που αναμένεται για αυτήν. Ενώ στο παράδειγμα του εξαρτήματος η ιδιότητα αυτή εκφράζει πως το εξάρτημα δεν «γερνάει» και η βλάβη που ενδέχεται να βιώσει είναι αποτέλεσμα κάποιας ξαφνικής εμφάνισης και όχι σταδιακής φθοράς. Στις εξισώσεις (21) και (22) δίνονται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής αντίστοιχα. Ενώ η μέση τιμή και η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής εμφανίζονται στις σχέσεις (23) και (24).

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (21)$$

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & 0 \leq x < \infty \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (22)$$

$$E[X] = 1/\lambda \quad (23)$$

$$Var[X] = 1/\lambda^2 \quad (24)$$



## 2.7.4 Κατανομή Weibull

Μια συνεχής τυχαία μεταβλητή  $X$  ακολουθεί κατανομή Weibull με παράμετρο σχήματος κατανομής  $\alpha > 0$  και παράμετρο κλίμακος κατανομής  $\lambda > 0$ . Συμβολίζεται ως  $X \sim W(\alpha, \lambda)$ . Είναι ευρέως διαδεδομένη για την περιγραφή αστοχιών σε συστήματα εφόσον με την αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων είναι ικανή να περιγράψει το σύστημα σε κάθε κατάσταση του (early life, useful life, wear out phase) (Trivedi, 2016). Συγκεκριμένα, με την αλλαγή της τιμής της  $\alpha$ , ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης είτε είναι σταθερός και η κατανομή γίνεται εκθετική, είτε αυξάνεται και γίνεται λόγος για μια κατανομή (IFR), δηλαδή το σύστημα γερνάει και αυξάνεται ο κίνδυνος εμφάνισης βλάβης με τον χρόνο. Είτε ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης μειώνεται, η κατανομή θεωρείται (DFR) και άρα με το πέρασμα του χρόνου ευεργετεί το σύστημα μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης βλάβης. Άρα δεν έχει μια μοναδική χαρακτηριστική μορφή και η μορφή της μπορεί να μεταβληθεί για να παραστήσει διαφορετικές κατανομές ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων της. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστικής συνάρτηση κατανομής δίνονται από τις σχέσεις (25) και (26) αντίστοιχα. Η μέση τιμή και η διασπορά της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής δίνονται από τις σχέσεις (27) και (28).

$$f(x) = \lambda \alpha x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}, x \geq 0 \quad (25)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x^\alpha} \quad (26)$$

$$E[X] = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (27)$$

$$Var[X] = \lambda^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right)^2 \right] \quad (28)$$

## 2.7.5 Κανονική κατανομή

Μια συνεχής τυχαία μεταβλητή  $X$  ακολουθεί κανονική κατανομή παραμέτρων  $\mu \in \mathbb{R}_+$  και  $\sigma \in \mathbb{R}_+$  συμβολίζεται  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συγκεκριμένης κατανομής είναι συμμετρική με κέντρο συμμετρίας την μέση τιμή. Πιο συγκεκριμένα το 68% των τιμών που παίρνει η τυχαία μεταβλητή θα βρίσκεται εντός  $\sigma$  (μίας τυπικής απόκλισης) από την μέση τιμή  $\mu$ , το 95% των σημείων θα εμπίπτει εντός  $2\sigma$  (δύο τυπικών αποκλίσεων) από την μέση τιμή και το 99.7% των

σημείων βρίσκεται εντός  $3\sigma$  (τριών τυπικών αποκλίσεων) από την μέση τιμή. Η συγκεκριμένη κατανομή χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διάρκεια του χρόνου ζωής συστημάτων κατά την wear out phase τους (Trivedi, 2016). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας παρουσιάζεται στην σχέση (29), ωστόσο επειδή η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δεν έχει κλειστή μορφή άρα δεν μπορεί να εκφραστεί σε απλή μορφή είναι απαραίτητο να βρεθεί πρώτα η τυποποιημένη κανονική κατανομή  $Z \sim N(0,1)$ . Στην σχέση (30) δίνεται ο μετασχηματισμός που υπολογίζει την ανεξάρτητη μεταβλητή  $z$ , με την βοήθεια αυτής και των κατάλληλων πινάκων τυπικής κατανομής βρίσκεται η πιθανότητα που αναζητείται. Στις σχέσεις (31) και (32) ακολουθούν η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της ανεξάρτητης μεταβλητής  $z$  που ακολουθεί την τυποποιημένη κανονική κατανομή. Ενώ οι σχέσεις (33) και (34) παρουσιάζουν την μέση τιμή και την διακύμανση της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $x$ .

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], x \in \mathbb{R} \quad (29)$$

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (30)$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (31)$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dx \quad (32)$$

$$E[X] = \mu \quad (33)$$

$$Var[X] = \sigma^2 \quad (34)$$

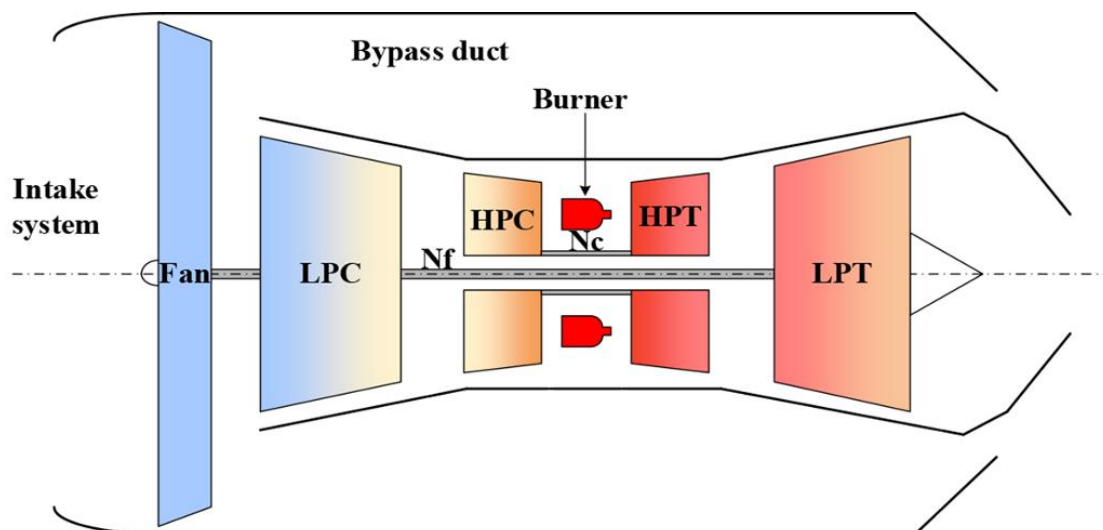
## **Κεφάλαιο 3. Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος με στοιχεία που υπόκεινται σε υποβάθμιση και ενέργειες συντήρησης**

Σύμφωνα με την έκθεση της IATA (International Air Transport Association) για την ασφάλεια των αερομεταφορών, 23 ατυχήματα προκλήθηκαν από προβλήματα σχεδιασμού ή κακή συντήρηση το 2020 (J. Liu et al., 2022). Ο κινητήρας αποτελεί σημαντικό και βασικό στοιχείο του αεροσκάφους. Η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του κινητήρα έχει ύψιστη σημασία στην αποφυγή ατυχημάτων. Οι κινητήρες αεροσκαφών είναι σχεδόν πάντα είτε ελαφροί εμβολοφόροι κινητήρες είτε αεριοστρόβιλοι (García Nieto et al., 2015). Ο αεριοστρόβιλος κινητήρας είναι ένας θερμικός κινητήρας που χρησιμοποιεί τον αέρα για την παροχή ώθησης. Για να μπορέσει να το κάνει αυτό, ο αέρας που διέρχεται από τον κινητήρα πρέπει να επιταχυνθεί. Για να επιτευχθεί αυτή η αύξηση της ταχύτητας του αέρα, αυξάνεται πρώτα η ενέργεια πίεσης, ακολουθεί η προσθήκη θερμικής ενέργειας, πριν από την τελική μετατροπή πίσω σε κινητική ενέργεια με τη μορφή εκροής πίδακα υψηλής ταχύτητας (El-Sayed, 2017; Wild and Sterkenburg, 2008). Ο αεριοστρόβιλος είναι μια περιστροφική μηχανική διάταξη που αντλεί ενέργεια από μια ροή ρευστού και τη μετατρέπει σε χρήσιμο έργο (García Nieto et al., 2015).

### **3.1 Γενική περιγραφή του συστήματος και των στοιχείων που το αποτελούν**

Ένας αεριοστρόβιλος κινητήρας αποτελείται από τον ανεμιστήρα (fan), τους συμπιεστές χαμηλής και υψηλής πίεσης (LPC, HPC), τις τουρμπίνες χαμηλής και υψηλής πίεσης (LPT, HPT) καθώς και τον καυστήρα (burner). Ο αέρας του περιβάλλοντος εισέρχεται στον ανεμιστήρα μέσω του συστήματος εισαγωγής (Intake system). Στη συνέχεια, συμπιέζεται σε αέριο υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης πρώτα στον συμπιεστή χαμηλής και έπειτα στον συμπιεστή υψηλής πίεσης που απαιτεί περαιτέρω συμπίεση του αέρα. Τα καυσαέρια από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης εισέρχονται στον καυστήρα και αναμειγνύονται με το καύσιμο για να καούν. Το αέριο υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης από τον καυστήρα διαστέλλεται στις τουρμπίνες υψηλής και χαμηλής πίεσης για να εκτελέσει έργο, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια του αερίου σε μηχανική ενέργεια. Η τουρμπίνα είναι η μονάδα

εργασίας ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ο ανεμιστήρας, ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης και η τουρμπίνα χαμηλής πίεσης συνδέονται μέσω του ρότορα του ανεμιστήρα (Nf). Ο συμπιεστής υψηλής πίεσης και η τουρμπίνα χαμηλής πίεσης συνδέονται μέσω του ρότορα του πυρήνα (Nc). Το αέριο υψηλής θερμοκρασίας του στροβίλου εκτελεί εξωτερικό έργο και εξάγεται στην ατμόσφαιρα (Li et al., 2023). Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου κινητήρα απαιτεί υψηλές αναλογίες ώθησης προς βάρος και χαμηλό κόστος, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η αξιοπιστία της πτήσης. Αυτό σημαίνει ότι θα δημιουργηθούν υψηλότερες καταπονήσεις και θερμοκρασίες στα στοιχεία του *hot section*, τα οποία είναι κρίσιμα εξαρτήματα του κινητήρα και διατρέχουν έντονο κίνδυνο βλάβης (Zhu et al., 2016). Η μελέτη περίπτωσης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι το *hot section* ενός τέτοιου κινητήρα, δηλαδή ο συμπιεστής υψηλής πίεσης, η τουρμπίνα υψηλής πίεσης και η τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Ο κύριος τρόπος αστοχίας των στοιχείων του *hot section* είναι οι υψηλές θερμοκρασίες, ο οποίος είναι μια αλληλεπίδραση κόπωσης, ερπυσμού και περιβαλλοντικής διάβρωσης και οξείδωσης. Οι συνθήκες εργασίας τους σε υψηλές θερμοκρασίες συχνά μειώνουν την αντοχή των υλικών (Zhu et al., 2016). Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία τα στάδια της υποβάθμισης του κάθε στοιχείου είναι δύο. Η χρονική διάρκεια του κάθε σταδίου ή αλλιώς ο χρόνος που το εξάρτημα βρίσκεται στο κάθε στάδιο υποβάθμισης είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί με κάποια από τις κατανομές του **Κεφαλαίου 2**.



Σχήμα 1: Αεριοστροβίλος κινητήρα (Πηγή: (Li et al., 2023))

### 3.2 Ενέργειες συντήρησης

Η προληπτική συντήρηση αποτελεί στοιχείο σε κάθε ολοκληρωμένο σύστημα συντήρησης, όπως ένας κινητήρας αεροσκάφους ή ένας αεριοστρόβιλος (García Nieto et al., 2015). Η προληπτική συντήρηση μειώνει τον κίνδυνο ατυχημάτων. Όταν στην προληπτική συντήρηση προστίθεται και η ευκαιριακή συντήρηση πέρα από τα οφέλη της ασφάλειας που παρέχονται υπάρχει και εξοικονόμηση. Στην παρούσα εργασία οι προληπτικές ενέργειες χωρίζονται σε συντήρηση και ανανέωση και μέσα από αυτές τις δύο επιλέγεται ο τύπος της ευκαιριακής ενέργειας. Μια ενέργεια συντήρησης (PM) βελτιώνει την κατάσταση του στοιχείου ωστόσο δεν το επαναφέρει την αρχική του κατάσταση. Σε αντίθεση μία ενέργεια ανανέωσης (PR) φέρνει το στοιχείο στην αρχική του κατάσταση. Μια τρίτη ενέργεια που ονομάζεται ελάχιστη επισκευή (MR) μπορεί να εφαρμοστεί και επαναφέρει το στοιχείο στην κατάσταση που βρισκόταν πριν την βλάβη χωρίς να βελτιώνει την διαδικασία της φθοράς του (Stapelberg, 2009). Ενώ η διάρκεια της ελάχιστης επισκευής έχει σημασία λόγω κόστους διακοπής λειτουργίας (Zhou and Shi, 2019), έχει αμελητέα επίδραση στην διαδικασία υποβάθμισης του εξαρτήματος (Yang et al., 2019).

### 3.3 Μοντελοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος

Για να μοντελοποιηθεί η αξιοπιστία ενός συστήματος χρειάζεται πρώτα να είναι γνωστή η διάταξη των στοιχείων που το αποτελούν καθώς όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 2**, ο υπολογισμός της αξιοπιστίας ενός συστήματος διαφέρει ανάλογα με την διάταξη που παρουσιάζουν τα επιμέρους στοιχεία του. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η διάταξη που θα έχουν τα στοιχεία του συστήματος είναι η σειριακή και για αυτό επιτρέπονται οι ευκαιριακές ενέργειες συντήρησης. Άρα η σχέση που δίνει την αξιοπιστία του συστήματος που μελετάται είναι η σχέση (1). Για να βρεθεί η αξιοπιστία του συστήματος πρέπει να είναι γνωστή και η αξιοπιστία των στοιχείων που το αποτελούν. Ένα στοιχείο μπορούσε να βρεθεί σε δύο καταστάσεις, στην κατάσταση που θεωρείται καινούργιο και σε αυτήν στην οποία βρίσκεται σε βλάβη. Πλέον η υποβάθμιση του στοιχείου αποκτάει περισσότερα στάδια και αυτό επηρεάζει την μοντελοποίηση της αξιοπιστίας του.

### 3.3.1 Μοντελοποίηση της αξιοπιστίας ενός στοιχείου με δύο συνεχόμενα στάδια υποβάθμισης

Τα στάδια υποβάθμισης ενός στοιχείου είναι συνεχόμενα, δηλαδή όταν τελειώσει το ένα ξεκινάει το επόμενο. Ένα στοιχείο παρουσιάζει διαφορετικό ρυθμό υποβάθμισης ακόμη και διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (G. Liu et al., 2022). Τα στάδια υποβάθμισης που ορίζονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι δύο. Αυτό σημαίνει ότι το κάθε στοιχείο μπορεί να βρίσκεται σε μία εκ των τριών καταστάσεων, οι οποίες είναι : Η αρχική κατάσταση καλής λειτουργίας, η κατάσταση υποβαθμισμένης λειτουργίας και η κατάσταση βλάβης. Η διάρκεια του κάθε σταδίου υποβάθμισης περιγράφεται από μια συνεχή τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κάποια κατανομή πιθανότητας. Οι κατανομές πιθανότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή τέτοιων τυχαίων μεταβλητών είναι η εκθετική και η Weibull (Arts and Basten, 2018; Chen et al., 2020; Qiu and Cui, 2018). Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία οι διάρκειες των σταδίων υποβάθμισης θεωρείται ότι ακολουθούν εκθετική κατανομή. Άρα  $u_{sk} \sim E(\lambda_{sk})$ , όπου  $u_{sk}$  συμβολίζεται η διάρκεια του σταδίου υποβάθμισης  $s$  για το στοιχείο  $k$  και η παράμετρος  $\lambda_{sk}$  είναι η παράμετρος της αντίστοιχης εκθετικής κατανομής που μοντελοποιεί το χρόνο παραμονής του στοιχείου  $k$  στο στάδιο υποβάθμισης  $s$ . Λόγω της ιδιότητας έλλειψης μνήμης της εκθετικής κατανομής η διάρκεια του ενός σταδίου είναι ανεξάρτητη από την διάρκεια του άλλου (Trivedi, 2016). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της διάρκειας  $u_{sk}$  συμβολίζονται ως  $f_{sk}(u_{sk})$  και  $F_{sk}(u_{sk})$  αντίστοιχα. Στην σχέση (35) δίνεται η αξιοπιστία  $R_k(t)$  ενός στοιχείου με δύο συνεχόμενα στάδια υποβάθμισης (G. Liu et al., 2022). Ως  $F_k(t)$  συμβολίζεται η πιθανότητα ο χρόνος ζωής του στοιχείου  $k$  να είναι μικρότερος ή ίσος από  $t$ .

$$R_k(t) = 1 - F_k(t) = 1 - \int_0^t \lambda_{1k} f_{1k}(u_{1k}) F_{2k}(t - u_{1k}) du_{1k} = \frac{(\lambda_{1k} e^{\lambda_{1k}t} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k}t}) e^{-t(\lambda_{1k} + \lambda_{2k})}}{\lambda_{1k} - \lambda_{2k}} \quad (35)$$

Ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης για την διαδικασία υποβάθμισης δύο σταδίων ενός στοιχείου  $k$ , συμβολίζεται ως  $h_k(t)$  και δίνεται από την σχέση (36).

$$h_k(t) = \frac{f_k(t)}{R_k(t)} = \frac{\int_0^t \lambda_{1k} e^{-\lambda_{1k}u_{1k}} \lambda_{2k} e^{-\lambda_{2k}(t-u_{1k})} du_{1k}}{(\lambda_{1k} e^{\lambda_{1k}t} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k}t}) e^{-t(\lambda_{1k} + \lambda_{2k})}} = \frac{\lambda_{1k} \lambda_{2k} [e^{(\lambda_{1k}t)} - e^{(\lambda_{2k}t)}] e^{-t(\lambda_{1k} + \lambda_{2k})}}{(\lambda_{1k} e^{\lambda_{1k}t} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k}t}) e^{-t(\lambda_{1k} + \lambda_{2k})}} \frac{\lambda_{1k} - \lambda_{2k}}{\lambda_{1k} - \lambda_{2k}} \quad (36)$$

Η διαδικασία υποβάθμισης μεταβάλλεται μετά από κάποια ενέργεια συντήρησης (PM), διότι με την πραγμάτωση μιας ενέργειας συντήρησης ενσωματώνονται οι παράγοντες μείωσης της ηλικίας  $a_k$  και αύξησης του ρυθμού εμφάνισης βλάβης  $b_k$  (G. Liu et al., 2022). Ως  $h_{ik}(t)$  ορίζεται ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης του στοιχείου  $k$  μετά την περάτωση της ενέργειας συντήρησης  $i$ . Ως  $T_{(i-1)k}$  ορίζεται το διάστημα ανάμεσα σε δύο συνεχόμενες ενέργειες. Δηλαδή το διάστημα από την χρονική στιγμή που τελειώσει η ενέργεια  $i - 1$  έως την χρονική στιγμή που ξεκινάει η ενέργεια  $i$ . Σε περίπτωση που  $i = 1$  τότε  $T_{(i-1)k}$  είναι το διάστημα που εκτείνεται από την αρχή της λειτουργίας του στοιχείου έως την χρονική στιγμή της ενέργειας  $i = 1$ . Στην σχέση (37) δίνεται ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης του στοιχείου  $k$  μετά την περάτωση της ενέργειας συντήρησης  $i$ .

$$h_{ik}(t) = b_k h_{(i-1)k}(t + a_k T_{(i-1)k}) \quad \forall t \geq 0, i \geq 1 \quad (37)$$

Όπως φαίνεται για να είναι δυνατό να υπολογιστεί ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης  $h_{ik}(t)$  πρέπει να είναι γνωστός ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης  $h_{(i-1)k}(t + a_k T_{(i-1)k})$ . Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού, η οποία είναι χρονοβόρα. Η σχέση (38) είναι ένα μέσο υπολογισμού του ρυθμού εμφάνισης βλάβης  $h_{ik}(t)$  που δεν απαιτεί την χρήση κάποιας επαναληπτικής διαδικασίας.

$$h_{ik}(t) = b_k^i h_k \left( t + a_k \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk} \right) \quad \forall t \geq 0, i \geq 1 \quad (38)$$

Η αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  μετά την  $i$  ενέργεια συντήρησης (PM) συμβολίζεται ως  $R_{ik}(t)$  και υπολογίζεται από την σχέση (39)  $\forall t \geq 0, i \geq 1$ .

$$R_{ik}(t) = R_k(t | i, \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk}) = \left[ \frac{\left( \lambda_{1k} e^{\lambda_{1k}(t + a_k \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk})} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k}(t + a_k \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk})} \right) e^{-t(\lambda_{1k} + \lambda_{2k})}}{\lambda_{1k} e^{\lambda_{1k} a_k \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk}} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k} a_k \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk}}} \right] b_k^i \quad (39)$$

### 3.4 Ανάπτυξη μοντέλου συντήρησης

Το συγκεκριμένο μοντέλο συντήρησης αποτελείται από δύο στρατηγικές, τη βασική και τη δυναμική. Οι δύο αυτές στρατηγικές εφαρμόζονται σε επίπεδο στοιχείου και αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του ρυθμού κόστους. Η βασική στρατηγική δίνει

ένα στατικό πρόγραμμα συντήρησης το οποίο αποτελείται από τον αριθμό των ενεργειών συντήρησης που θα εκτελεστούν σε έναν κύκλο ανανέωσης  $N_k$  και την κρίσιμη αξιοπιστία  $R_{ck}$  στο τέλος του κύκλου ανανέωσης. Όταν η αξιοπιστία από την τελευταία ενέργεια ή αλλιώς η τρέχουσα αξιοπιστία γίνει ίση με την τιμή της κρίσιμης αξιοπιστίας τότε το σύστημα σταματάει την λειτουργία του για την περάτωση κάποιας ενέργειας στο στοιχείο  $k$ . Ως κύκλος ανανέωσης ορίζεται το χρονικό διάστημα από την χρονική στιγμή που τελείωσε μία ενέργεια ανανέωσης και ξεκίνησε το εξάρτημα να λειτουργεί ξανά έως το τέλος της επόμενης ενέργειας ανανέωσης. Η βασική στρατηγική θα ήταν ιδανική στην περίπτωση κατά την οποία το σύστημα αποτελείται από μονάχα ένα στοιχείο. Διότι παρέχει το στατικό πρόγραμμα το οποίο είναι βέλτιστο όμως δεν εφαρμόζει τυχόν διαταραχές όπως πχ. Η περάτωση μίας ενέργειας νωρίτερα ή αργότερα από ότι έχει προκαθοριστεί. Φαινόμενο που συμβαίνει λόγω της ευκαιριακής συντήρησης. Επομένως η δυναμική στρατηγική χρησιμοποιείται για να διαχειριστεί διαταραχές στα στατικά προγράμματα της βασικής στρατηγικής διότι η ευκαιριακή συντήρηση απαιτεί τα προγράμματα των στοιχείων να μεταβάλλονται και επομένως τα στατικά προγράμματα που πηγάζουν από την βασική στρατηγική να μην είναι πλέον βέλτιστα

### 3.4.1 Βασική στρατηγική

Η βασική στρατηγική απαντάει στο ερώτημα ποια κρίσιμη αξιοπιστία και ποιος αριθμός ενεργειών συντήρησης σε έναν κύκλο ανανέωσης δίνουν τον ελάχιστο ρυθμό κόστους του στοιχείου  $k$ . Από την βασική στρατηγική λαμβάνεται το στατικό πρόγραμμα του στοιχείου το οποίο έχει πληροφορίες σχετικά με την κρίσιμη αξιοπιστία, τον αριθμό των ενεργειών συντήρησης, τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στις ενέργειες καθώς και τον κύκλο ανανέωσής. Η λογική που επιτάσσει η βασική στρατηγική είναι πως θα γίνεται ενέργεια συντήρησης όταν η αξιοπιστία του εξαρτήματος γίνει ίση με την κρίσιμη αξιοπιστία  $R_{ck}$ . Ενώ μια ενέργεια ανανέωσης θα εφαρμοσθεί όταν ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης που έχουν προηγηθεί είναι  $N_k$ . Μια ελάχιστη επισκευή εφαρμόζεται όταν προκύψει βλάβη.

Η διάρκεια του διαστήματος ανάμεσα στην ενέργεια  $i$  και  $i + 1$  του στοιχείου  $k$  συμβολίζεται ως  $T_{ik}$  και είναι η αντίστροφη συνάρτηση της αξιοπιστίας του στοιχείου  $k$ , όταν η αξιοπιστία φτάσει την τιμή της κρίσιμης αξιοπιστίας  $R_{ck}$  δεδομένου ότι έχουν εκτελεστεί  $i$  ενέργειες συντήρησης και το σύνολο της διάρκειας των διαστημάτων έως την ενέργεια  $i$  είναι  $\sum_{j=0}^{i-1} T_{jk}$ . Η σχέση (40) παρουσιάζει τον τρόπο υπολογισμού του



διαστήματος  $T_{ik}$  (G. Liu et al., 2022). Η σχέση της αξιοπιστίας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του διαστήματος της σχέσης (40) δεν είναι πάντα η ίδια. Αν δεν έχει προηγηθεί κάποια ενέργεια συντήρησης ή η προηγούμενη ενέργεια είναι μία ενέργεια ανανέωσης ( $i = 0$ ) τότε ως εξίσωση αξιοπιστίας χρησιμοποιείται η σχέση (35). Αν έχει προηγηθεί κάποια ενέργεια συντήρησης ( $i \neq 0$ ) τότε η εξίσωση που δίνει την σχέση της αξιοπιστίας είναι η σχέση (39).

$$T_{ik} = R_{ik}^{-1}(R_{ck}|i, \sum_{j=0}^{i-1} T_{jk}) \quad \forall i = 0, \dots, N_k \quad (40)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου βασικής στρατηγικής δίνεται στην σχέση (41) και σκοπός της είναι η ελαχιστοποίηση του ρυθμού κόστους του στοιχείου  $k$ . Η ελαχιστοποίηση αυτή λαμβάνει υπόψη το κόστος της ενέργειας συντήρησης  $c_{pk}$ , το κόστος της ενέργειας ανανέωσης  $c_{rk}$ , το κόστος της ελάχιστης επισκευής  $c_{fk}$  καθώς και το χρονικό διάστημα που απαιτεί η κάθε μια από τις παραπάνω ενέργειες  $\tau_{pk}$ ,  $\tau_{rk}$ ,  $\tau_{fk}$  αντίστοιχα για την περάτωσή της. Τα διαστήματα αυτά πολλαπλασιάζονται με το κόστος διάρκειας διακοπής  $c_d$  έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί πόσο κοστίζει η διάρκεια της κάθε ενέργειας. Ο όρος  $-\ln R_{ck}$  δηλώνει τον αναμενόμενο αριθμό βλαβών εντός του χρονικού διαστήματος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ενέργειες (G. Liu et al., 2022). Οι σχέσεις (42) έως και (44) αποτελούν τους περιορισμούς του μοντέλου. Αναλυτικότερα, η σχέση (42) αποτρέπει την μικρότερη αξιοπιστία, δηλαδή την κρίσιμη αξιοπιστία  $R_{ck}$  να είναι μικρότερη της ελάχιστης επιτρεπόμενης αξιοπιστίας  $R_{mk}$ . Η σχέση (43) οριοθετεί το άνω και κάτω όριο της κρίσιμης αξιοπιστίας  $R_{ck}$ . Ενώ η σχέση (44) φροντίζει ώστε ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης σε έναν κύκλο ανανέωσης  $N_k$  να είναι ένας ακέραιος θετικός αριθμός. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί πως η κρίσιμη αξιοπιστία  $R_{ck}$  δεν μεταβάλλεται μετά την περάτωση μιας ενέργειας συντήρησης. Η κρίσιμη αξιοπιστία  $R_{ck}$  και ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης σε έναν κύκλο ανανέωσης  $N_k$  υπολογίζονται με την εφαρμογή της ενέργειας ανανέωσης.

$$\min \text{costrate}_k(R_{ck}, N_k) = \frac{N_k(c_{pk} + \tau_{pk}c_d) + (N_k + 1)(-\ln R_{ck})(c_{fk} + \tau_{fk}c_d) + c_{rk} + \tau_{rk}c_d}{\sum_{i=0}^{N_k} T_{ik}} \quad (41)$$

$$R_{ck} \geq R_{mk} \quad (42)$$

$$R_{mk} \leq R_{ck} < 1 \quad (43)$$

$$N_k \in \mathbb{N}^+ \quad (44)$$

Ο κύκλος ανανέωσής υπολογίζεται ως  $N_k \tau_{pk} + \tau_{rk} + \sum_{i=0}^{N_k} T_{ik}$ . Το γινόμενο στον πρώτο όρο υπολογίζει την διάρκεια όλων των ενεργειών συντήρησης μέσα σε έναν κύκλο ανανέωσης για το στοιχείο  $k$ , ο δεύτερος όρος είναι η διάρκεια της ενέργειας ανανέωσης που υφίσταται το στοιχείο  $k$  στο τέλος του κύκλου ανανέωσης. Το σύνολο στον τρίτο όρο υπολογίζει τον χρόνο που λειτουργεί το στοιχείο  $k$ , δηλαδή τα διαστήματα ανάμεσα στις ενέργειες εντός ενός κύκλου ανανέωσής.

### 3.4.2 Δυναμική στρατηγική

Το μοντέλο της βασική στρατηγικής δίνει ένα στατικό πρόγραμμα με τον μικρότερο ρυθμό κόστους για το στοιχείο  $k$ . Η στατικότητα του προγράμματος αναφέρεται στο ότι καθορίζει συγκεκριμένες ενέργειες συντήρησης σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Το στατικό πρόγραμμα δηλαδή δημιουργείται μία φορά και παραμένει ίδιο δεν υφίσταται καμία δυναμική ενημέρωση δηλαδή υπολογίζεται μία φορά και οι τιμές που εμπεριέχονται σε αυτό δεν μεταβάλλονται. Στην περίπτωση όμως της ευκαιριακής απόφασης για κάποια ενέργεια στο στοιχείο  $k$ , τότε το στατικό πρόγραμμα παύει να είναι βέλτιστο εφόσον οι ενέργειες στο στοιχείο  $k$  δεν γίνονται ακριβώς τις χρονικές στιγμές ή ακόμη και το είδος των ενεργειών (συντήρηση ή ανανέωση) δεν είναι αυτά που επιτάσσει το στατικό πρόγραμμα και η βασική στρατηγική. Η δυναμική στρατηγική υιοθετείται για να επαναπροσδιορίζει το πρόγραμμα συντήρησης μετά από τέτοιου είδους διαταραχές όπως αυτές που βιώνουν τα στατικά προγράμματα λόγω της ευκαιριακής απόφασης ενέργειας.

Αρχικά ορίζεται το ημερολόγιο συντήρησης, το οποίο έχει την μορφή διανύσματος  $[Tacc_{kj}, Nacc_{kj}, Cacc_{kj}, Racc_{kj}]$ . Όπου  $j$  συμβολίζεται ο τρέχον αριθμός των ενεργειών. Ως  $Tacc_{kj}$  συμβολίζεται ο συσσωρευμένος χρόνος λειτουργίας του στοιχείου  $k$  πριν από την ενέργεια  $j$ . Ως  $Nacc_{kj}$  συμβολίζεται ο συσσωρευμένος αριθμός ενεργειών συντήρησης στο στοιχείο  $k$  πριν από την ενέργεια  $j$ . Ως  $Cacc_{kj}$  συμβολίζεται το συσσωρευμένο κόστος του στοιχείου  $k$  πριν από την ενέργεια  $j$ . Ως  $Racc_{kj}$  συμβολίζεται η συσσωρευμένη αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  πριν από την ενέργεια  $j$ . Ουσιαστικά το ημερολόγιο συντήρησης κρατάει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των ενεργειών, τα διαστήματα λειτουργίας και την κατάσταση των στοιχείων πριν την διαταραχή.

Η εξίσωση αξιοπιστίας του στοιχείου  $k$  αλλάζει μορφή ενσωματώνοντας το ημερολόγιο συντήρησης. Η νέα εξίσωση της αξιοπιστίας σύμφωνα με το ημερολόγιο δίνεται από την σχέση (45)  $\forall i = 0, \dots, N_{kj}$ .

$$R_k(t|i, \sum_{m=0}^{i-1} T_{mk}) = \left[ \frac{\left( \lambda_{1k} e^{\lambda_{1k}(t+a_k(\sum_{m=0}^{i-1} T_{mk}+Tacc_{kj}))} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k}(t+a_k(\sum_{m=0}^{i-1} T_{mk}+Tacc_{kj}))} \right) e^{-t(\lambda_{1k}+\lambda_{2k})}}{\lambda_{1k} e^{\lambda_{1k} a_k(\sum_{m=0}^{i-1} T_{mk}+Tacc_{kj})} - \lambda_{2k} e^{\lambda_{2k} a_k(\sum_{m=0}^{i-1} T_{mk}+Tacc_{kj})}} \right]^{b_k^{i+1}+Nacc_{kj}} \quad (45)$$

Η εξίσωση που υπολογίζει το διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ενέργειες θα αλλάξει ενσωματώνοντας το ημερολόγιο συντήρησης. Η νέα μορφή της δίνεται από την σχέση (46)  $\forall i = 0, \dots, N_{kj}$ . Ως  $R_{ckj}$  συμβολίζεται η κρίσιμη αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  μετά την ενέργεια  $j$ .

$$T_{ik} = R_{ik}^{-1}(R_{ckj}|i + 1 + Nacc_{kj}, \sum_{m=0}^{i-1} T_{mk} + Racc_{kj}) \quad (46)$$

Το μοντέλο της δυναμικής στρατηγικής αποτελείται από τις σχέσεις (47) έως και (52). Η σχέση (47) είναι η αντικειμενική συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιεί τον ρυθμό κόστους του στοιχείου  $k$  λαμβάνοντας υπόψη το ημερολόγιο συντήρησης. Η σχέση (47) επεκτείνεται στις σχέσεις (48) και (49). Η σχέση (48) υπολογίζει τον ρυθμό κόστους εάν η ενέργεια που θα εκτελεστεί είναι ενέργεια ανανέωσης. Η σχέση (49) υπολογίζει τον ελάχιστο ρυθμό κόστους εάν η ενέργεια που εκτελεστεί είναι ενέργεια συντήρησης, ο ρυθμός κόστους που υπολογίζεται στην σχέση (49) καλύπτει το διάστημα που ξεκινάει με την εκτέλεση της τρέχουσας ενέργειας συντήρησης και εκτείνεται έως και την ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή ο ρυθμός κόστους της σχέσης (49) περιλαμβάνει τις ενέργειες συντήρησης από την τρέχουσα έως και το τέλος του κύκλου ανανέωσής. Ως  $D_{kj}$  συμβολίζεται ο τύπος της ενέργειας που θα προγραμματίζεται ως ενέργεια  $j$ , ( $D_{kj} = 1$  για ενέργεια συντήρησης,  $D_{kj} = 2$  για ενέργεια ανανέωσης). Με την εκτέλεση μίας ενέργειας συντήρησης το επόμενο πρόγραμμα συντήρησης υπολογίζεται με την βοήθεια των μεταβλητών απόφασης της σχέσης (49),  $R_{ckj}$  και  $N_{kj}$ . Ως  $R_{ckj}$  συμβολίζεται η κρίσιμη αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  μετά την ενέργεια  $j$ . Ως  $N_{kj}$  συμβολίζεται ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης μετά την ενέργεια  $j$  έως την ενέργεια ανανέωσης για το στοιχείο  $k$ . Η δυναμική στρατηγική βελτιστοποιεί τον ρυθμό κόστους υπολογίζοντας και συγκρίνοντας τους επιμέρους ρυθμούς κόστους από τις σχέσεις (48) και (49) και αποφασίζει τι ενέργεια θα είναι η ενέργεια  $j$  άρα και την τιμή της μεταβλητής  $D_{kj}$ . Οι σχέσεις (50) έως και (52) είναι οι περιορισμοί του μοντέλου. Η

σχέση (50) εξασφαλίζει ότι η χαμηλότερη αξιοπιστία δεν είναι χαμηλότερη της ελάχιστης επιτρεπόμενης. Η σχέση (51) οριοθετεί το άνω και κάτω άκρο της μεταβλητής απόφασης  $R_{ckj}$ . Η σχέση (52) ορίζει πως η μεταβλητή απόφασης  $N_{kj}$  είναι ένας ακέραιος αριθμός. Η κρίσιμη αξιοπιστία μετά την ενέργεια  $j$ ,  $R_{ckj}$ , μεταβάλλεται με την εφαρμογή μιας ενέργεια συντήρησης, το ίδιο συμβαίνει και με τον αριθμό των ενεργειών συντήρησης μετά την ενέργεια  $j$  έως την ενέργεια ανανέωσής  $N_{kj}$ .

$$\min \text{costrate}_k(D_{kj}, R_{ckj}, N_{kj} | T_{acc_{kj}}, N_{acc_{kj}}, C_{acc_{kj}}, R_{acc_{kj}}) \quad (47)$$

$$\text{costrate}(D_{kj} = 2) = \frac{C_{acc_{kj}} + c_{rk} + \tau_{rk}c_d}{T_{acc_{kj}}} \quad (48)$$

$$\text{costrate}(D_{kj} = 1) = \min \text{costrate}_k(D_{kj} = 1, R_{ckj}, N_{kj}) = \frac{C_{acc_{kj}} + (N_{kj} + 1)(c_{pk} + \tau_{pk}c_d) + (N_{kj} + 1)(-\ln R_{ckj})(c_{fk} + \tau_{fk}c_d) + c_{rk} + \tau_{rk}c_d}{T_{acc_{kj}} + \sum_{i=0}^{N_{kj}} T_{ik}} \quad (49)$$

$$R_{acc_{kj}}R_{ckj} \geq R_{mk} \quad (50)$$

$$\frac{R_{mk}}{R_{acc_{kj}}} \leq R_{ckj} < 1 \quad (51)$$

$$N_{kj} \in \mathbb{N} \quad (52)$$

### 3.5 Αλγοριθμική διαδικασία επιλογής ενεργειών κατά τις προγραμματισμένες διακοπές

Η διαδικασία αυτή συντονίζει τα προγράμματα συντήρησης των στοιχείων ενός συστήματος με στόχο τον ελάχιστο ρυθμό κόστους του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα προγραμματίζει τις διακοπές λειτουργίας του συστήματος. Σε κάθε προγραμματισμένη διακοπή κανονίζει εάν θα γίνει κάποια ενέργεια σε κάθε στοιχείο του συστήματος καθώς και τι είδους ενέργεια θα είναι αυτή. Ακόμη ενημερώνει τα προγράμματα συντήρησης των στοιχείων καθώς και τις καταστάσεις του και υπολογίζει τον ρυθμό κόστους για την προγραμματισμένη διακοπή.

### 3.5.1 Ευκαιριακή απόφαση συντήρησης

Για την προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας  $n$  του συστήματος, υπολογίζεται η αξιοπιστία του στοιχείου  $k$ . Αυτό γίνεται για κάθε στοιχείο του συστήματος. Η αξιοπιστία αυτή υπολογίζεται από την σχέση (53). Ως  $R_{1k}(t_n)$  συμβολίζεται η αξιοπιστία στο στοιχείο  $k$  μετά την τελευταία ενέργεια. Ως  $t_n$  συμβολίζεται η χρονική στιγμή της έναρξης της διακοπής  $n$ . Ως  $T_{uk(n-1)} / T_{mk(n-1)}$  συμβολίζονται ο συσσωρευμένος χρόνος λειτουργίας του στοιχείου  $k$  μετά/πριν την τελευταία ενέργεια συντήρησης μετά την διακοπή  $n - 1$ . Ως  $t_{d(n-1)}$  συμβολίζεται η διάρκεια της διακοπής  $n - 1$  και ως  $I_{k(t_n)}$  ο συσσωρευμένος αριθμός των ενεργειών συντήρησης στο στοιχείο  $k$  μετά την διακοπή  $n - 1$ . Ως  $k_1$  συμβολίζεται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$ , δηλαδή η διακοπή  $n$  προγραμματίστηκε για την περάτωση κάποια ενέργειας στο στοιχείο  $k_1$ . Ως  $R_{ck(n-1)}$  συμβολίζεται η κρίσιμη αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  στο πρόγραμμα συντήρησης του μετά την διακοπή  $n - 1$ . Η χρονική στιγμή έναρξης της προγραμματισμένης διακοπής  $t_1$  είναι γνωστή από το στατικό πρόγραμμα καθώς επίσης και για ποιο στοιχείο ισχύει  $k = k_1$  δηλαδή για ποιο στοιχείο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$ .

$$R_{1k}(t_n) = \begin{cases} R_k(T_{uk(n-1)} + t_n - t_{n-1} - t_{d(n-1)} | I_{k(t_n)}, T_{mk(n-1)}) & k \neq k_1 \\ R_{ck(n-1)} & k = k_1 \end{cases} \quad (53)$$

Η συνάρτηση της αξιοπιστίας που υπολογίζει τη σχέση (53) αλλάζει για κάθε  $k \neq k_1$ . Εάν  $n = 1$  τότε η εξίσωση που υπολογίζει την σχέση (53) είναι αυτή της σχέσης (35), το ίδιο ισχύει και αν η ενέργεια που εφαρμόστηκε στο στοιχείο στην διακοπή  $n - 1$  είναι μια ενέργεια ανανέωσης. Εάν στην διακοπή  $n - 1$  εφαρμόστηκε μια ενέργεια συντήρησης τότε η εξίσωση που χρησιμοποιείται για να βρεθεί η αξιοπιστία της σχέσης (53) είναι αυτή της σχέσης (39). Στην περίπτωση για την οποία στην διακοπή  $n - 1$  δεν εφαρμόστηκε καμία ενέργεια τότε ισχύει μια από τις παραπάνω δύο περιπτώσεις ανάλογα το είδος της τελευταίας ενέργειας που πραγματοποιήθηκε στο στοιχείο και επιλέγεται ανάμεσα στην σχέση (35) και σχέση (39).

Η ευκαιριακή απόφαση συνεχίζεται για κάθε  $k \neq k_1$ . Εφόσον η διακοπή  $n$  προγραμματίστηκε για κάποια ενέργεια στο στοιχείο  $k = k_1$  είναι βέβαιο πως θα πραγματοποιηθεί κάποια ενέργεια στο εν λόγω στοιχείο. Σε αυτή την φάση αποφασίζεται εάν θα εφαρμοσθεί κάποια ευκαιριακή ενέργεια στα στοιχεία για τα οποία δεν προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$ , δηλαδή για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία εκτός του  $k = k_1$ . Εφόσον αποφασιστεί εάν θα γίνει κάποια ευκαιριακή ενέργεια στην

διακοπή  $n$  για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία εκτός του στοιχείου για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$ , τα στοιχεία χωρίζονται σε δύο σύνολα. Το σύνολο  $K_{1n}$  το οποίο περιλαμβάνει κάθε στοιχείο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί κάποια ενέργεια στην διακοπή  $n$  και τα στοιχεία του οποίου απαιτούν περαιτέρω αποφάσεις στο τι είδους ενέργεια θα είναι αυτή που θα πραγματοποιηθεί στην διακοπή  $n$ . Σε αυτό το σύνολο συμπεριλαμβάνεται και το στοιχείο  $k = k_1$ . Το σύνολο  $K_{2n}$  το οποίο περιλαμβάνει κάθε στοιχείο για στο οποίο δεν θα πραγματοποιηθεί κάποια ενέργεια στην διακοπή  $n$ . Η σχέση (54) πραγματοποιεί αυτόν τον διαχωρισμό με την βοήθεια της αξιοπιστίας από την σχέση (53) και του κατώτατου ορίου αναλογίας αξιοπιστίας  $\Delta P_k$ .

$$\begin{cases} R_{1k}(t_n) \leq R_{ck(n-1)} + (1 - R_{ck(n-1)})\Delta P_k & k \in K_{1n} \\ R_{1k}(t_n) > R_{ck(n-1)} + (1 - R_{ck(n-1)})\Delta P_k & k \in K_{2n} \end{cases} \quad (54)$$

Οι τιμές που παίρνει το κατώτατο όριο αναλογίας αξιοπιστίας βρίσκονται στο  $[0,1]$ . Η λειτουργία του συμβάλλει στην μείωση ή αύξηση της ελαστικότητας της ευκαιριακής απόφασης. Δηλαδή για  $\Delta P_k = 0$  και δεδομένες την αξιοπιστία  $R_{1k}(t_n)$  και την κρίσιμη αξιοπιστία  $R_{ck(n-1)}$  η σχέση (54) επιτρέπει δυσκολότερα την ευκαιριακή ενέργεια συγκριτικά με την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$ .

### 3.5.2 Απόφαση είδους ενέργειας

Η απόφαση είδους ενέργειας εφαρμόζεται για κάθε στοιχείο  $k$  του συνόλου  $K_{1n}$  και αποφασίζει τι είδους ενέργεια θα πραγματοποιηθεί στην διακοπή  $n$ . Ουσιαστικά εδώ εφαρμόζεται το μοντέλο της δυναμικής στρατηγικής. Τέλος υπολογίζει την διάρκεια  $t_{dn}$  της διακοπής.

Αρχικά δημιουργείται το ημερολόγιο συντήρησης του στοιχείου  $k$ . Το ημερολόγιο συντήρησης εκτείνεται από την σχέση (55) έως και την σχέση (59). Ως  $j$  συμβολίζεται ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης συμπεριλαμβανομένης και της ενέργειας στην τρέχουσα διακοπή  $n$  στο στοιχείο  $k$ . Ως  $C_{mk(n-1)}$  συμβολίζεται το συσσωρευμένο κόστος στο στοιχείο  $k$  μετά την διακοπή  $n - 1$ . Ως  $R_{mk(n-1)}$  συμβολίζεται η αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  μετά την διακοπή  $n - 1$ .

$$j = I_{k(t_n)} + 1 \quad (55)$$

$$C_{acc_{kj}} = -\ln R_{1k}(t_n)(c_{fk} + c_d \tau_{fk}) + C_{mk(n-1)} \quad (56)$$

$$Tacc_{kj} = t_n - t_{n-1} - t_{d(n-1)} + T_{uk(n-1)} + T_{mk(n-1)} \quad (57)$$

$$Nacc_{kj} = I_k(t_n) \quad (58)$$

$$Racc_{kj} = R_{mk(n-1)}R_{1k}(t_n) \quad (59)$$

Έπειτα μέσω της σχέσης (60) εφαρμόζεται η δυναμική στρατηγική, επιλέγεται ανάμεσα στην ενέργεια συντήρησης και στην ενέργεια ανανέωσης, το είδος της ενέργειας που θα εφαρμοσθεί στο στοιχείο  $k$  κατά την διακοπή  $n$ , με την βοήθεια πάντα του ημερολόγιου συντήρησης. Στόχος της σχέσης (60) είναι να επιλεγεί η ενέργεια που αποδίδει τον ελάχιστο ρυθμό κόστους. Ως  $M_{kn}$  συμβολίζεται ο τύπος ενέργειας που θα εφαρμοσθεί στο στοιχείο  $k$  κατά την διακοπή  $n$ . Αν  $M_{kn} = 0$  τότε δεν εφαρμόζεται καμία ενέργεια στο στοιχείο  $k$  κατά την διακοπή  $n$ . Αν  $M_{kn} = 1$  τότε εφαρμόζεται μία ενέργεια συντήρησης στο στοιχείο  $k$  κατά την διακοπή  $n$ . Αν  $M_{kn} = 2$  τότε εφαρμόζεται μία ενέργεια ανανέωσης στο στοιχείο  $k$  κατά την διακοπή  $n$ . Ως  $N_{kn}$  συμβολίζεται ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης έως την ενέργεια ανανέωσης στο στοιχείο  $k$  κατά την διακοπή  $n$ .

$$[M_{kn}, R_{ckn}, N_{kn}] = \arg \min \text{costrate}_k (D_{kj}, R_{ckj}, N_{kj} | Tacc_{kj}, Nacc_{kj}, Cacc_{kj}, Racc_{kj}) \quad (60)$$

Στην συνέχεια, εφόσον έχει αποφασιστεί τι ενέργεια θα πραγματοποιηθεί σε κάθε στοιχείο  $k$  του συνόλου  $K_{1n}$ , υπολογίζεται από την σχέση (61) η διάρκεια της διακοπής, η οποία είναι ίση με την διάρκεια της ενέργειας που θα διαρκέσει περισσότερο. Αν  $M_{kn} = 1$  τότε υπάρχει  $\tau_{pkn} = \tau_{pk}$ , διαφορετικά αν  $M_{kn} = 2$  τότε υπάρχει  $\tau_{rkn} = \tau_{rk}$ .

$$t_{dn} = \max_{k \in K_{1n}} (\tau_{pkn}, \tau_{rkn}) \quad (61)$$

### 3.5.3 Ενημέρωση προγραμμάτων των στοιχείων

Τα προγράμματα συντήρησης των στοιχείων ενημερώνονται σύμφωνα με το σύνολο στο οποίο ανήκουν, με το τι είδους ενέργεια πραγματοποιήθηκε καθώς με το ποιο στοιχείο είναι το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$ . Στον **Πίνακα 1** παρουσιάζεται ο τρόπος που ενημερώνονται τα προγράμματα συντήρησης των στοιχείων αναλόγως την κάθε περίπτωση από τις παραπάνω που προκύπτουν.

**Πίνακας 1: Προγράμματα συντήρησης μετά από διακοπή συστήματος**

$M_{kn}$	<b>0</b> ( $k \in K_{2n}$ )	<b>1</b> ( $k \in K_{1n}, k \neq k_1$ )	<b>2</b> ( $k \in K_{1n}, k \neq k_1$ )	<b>1</b> ( $k = k_1$ )	<b>2</b> ( $k = k_1$ )
$R_{ckn}$	$R_{ck(n-1)}$	$R_{ckj}$	$R_{ck}$	$R_{ck(n-1)}$	$R_{ck}$
$N_{kn}$	$N_{k(n-1)}$	$N_{kj}$	$N_k$	$N_{k(n-1)} - 1$	$N_k$
<b>Περίπτωση</b>	1	2	3	4	5

Η Περίπτωση 1 παρουσιάζει το πρόγραμμα συντήρησης ενός στοιχείου  $k$  στο οποίο δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στην διακοπή  $n$  του συστήματος, δηλαδή ισχύει ( $M_{kn} = 0, k \in K_{2n}$ ). Το πρόγραμμα συντήρησης δεν αλλάζει εφόσον δεν εφαρμόστηκε καμία ενέργεια.

Η Περίπτωση 2 παρουσιάζει το πρόγραμμα συντήρησης ενός στοιχείου  $k$  στο οποίο εφαρμόζεται μια ευκαιριακή ενέργεια συντήρησης στην διακοπή  $n$ . Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που θα εφαρμοσθεί θα είναι μια ενέργεια συντήρησης και πως το στοιχείο  $k$  δεν είναι αυτό για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$  του συστήματος ( $M_{kn} = 1, k \neq k_1$ ). Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα συντήρησης μετά την διακοπή  $n$  ενημερώνεται από την σχέση (60) δηλαδή από την εφαρμογή της δυναμικής στρατηγικής εφόσον είναι αυτή που καλύπτει τις ευκαιριακές ενέργειες συντήρησης και παρέχει τις μεταβλητές απόφασης ( $R_{ckj}, N_{kj}$ ) σύμφωνα με το ημερολόγιο συντήρησης.

Η Περίπτωση 3 παρουσιάζει το πρόγραμμα συντήρησης ενός στοιχείου  $k$  στο οποίο εφαρμόζεται μια ευκαιριακή ενέργεια ανανέωσης στην διακοπή  $n$  του συστήματος. Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που θα εφαρμοσθεί θα είναι μια ενέργεια ανανέωσης και πως το στοιχείο  $k$  δεν είναι αυτό για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$  του συστήματος ( $M_{kn} = 2, k \neq k_1$ ). Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα συντήρησης μετά την διακοπή  $n$  ενημερώνεται απευθείας από το στατικό πρόγραμμα της βασικής στρατηγικής ( $R_{ck}, N_k$ ) δηλαδή από την σχέση (41). Αυτό συμβαίνει διότι η κρίσιμη αξιοπιστία μετά την περάτωση μιας ενέργειας ανανέωσης έχει μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία έχει ήδη υπολογιστεί από την βασική στρατηγική και



δεν εξαρτάται από το εάν η ενέργεια ανανέωσης ήταν ευκαιριακή ή όχι. Άρα η εφαρμογή μιας ενέργειας ανανέωσης επαναφέρει αυτή την τιμή της κρίσιμης αξιοπιστίας. Αντίστοιχα αυτό συμβαίνει και με τον αριθμό των ενεργειών συντήρησης μετά την εφαρμογή μιας ενέργειας ανανέωσης.

Η Περίπτωση 4 παρουσιάζει το πρόγραμμα συντήρησης ενός στοιχείου  $k$  στο οποίο εφαρμόζεται μια ενέργεια συντήρησης στην διακοπή  $n$  του συστήματος. Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που θα εφαρμοσθεί θα είναι μια ενέργεια συντήρησης και πως το στοιχείο  $k$  είναι αυτό για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$  του συστήματος ( $M_{kn} = 1, k = k_1$ ). Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα συντήρησης μετά την διακοπή  $n$  ενημερώνεται σύμφωνα με τα στοιχεία που υπάρχουν από την διακοπή  $n - 1$ . Πιο συγκεκριμένα, η κρίσιμη αξιοπιστία παραμένει ίδια με αυτή της προηγούμενης διακοπής. Ενώ ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης μετά την διακοπή είναι ο ίδιος με αυτόν της προηγούμενης μειωμένος κατά μία μονάδα. Αυτό συμβαίνει διότι εφόσον ισχύει  $k = k_1$  το πρόγραμμα συντήρησης του συστήματος για την διακοπή  $n$  είναι εναρμονισμένο με αυτό του στοιχείου  $k$  άρα μέσα στον κύκλο ανανέωσης του στοιχείου  $k$ . Εφόσον μέσα στον κύκλο ανανέωσης δεν αλλάζει η κρίσιμη αξιοπιστία με την περάτωση μιας ενέργειας συντήρησης τότε η κρίσιμη αξιοπιστία παραμένει σταθερή. Ενώ ο αριθμός των συντηρήσεων μειώνεται κατά μία μονάδα διότι με την περάτωση της ενέργειας συντήρησης στην διακοπή  $n$ , το στοιχείο βρίσκεται κατά μία ενέργεια συντήρησης πιο κοντά σε μία ανανέωση και άρα και στο τέλος του κύκλου ανανέωσης. Η περίπτωση 4 αποτελεί κόμματι της λογικής της βασικής στρατηγικής.

Η Περίπτωση 5 παρουσιάζει το πρόγραμμα συντήρησης ενός στοιχείου  $k$  στο οποίο εφαρμόζεται μια ενέργεια ανανέωσης στην διακοπή  $n$  του συστήματος. Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια που θα εφαρμοσθεί θα είναι μια ενέργεια ανανέωσης και πως το στοιχείο  $k$  είναι αυτό για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n$  του συστήματος ( $M_{kn} = 2, k = k_1$ ). Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα συντήρησης μετά την διακοπή  $n$  ενημερώνεται απευθείας από το στατικό πρόγραμμα της βασικής στρατηγικής ( $R_{ck}, N_k$ ) δηλαδή από την σχέση (41). Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση 3, αυτό συμβαίνει διότι η κρίσιμη αξιοπιστία μετά την περάτωση μιας ενέργειας ανανέωσης έχει μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία έχει ήδη υπολογιστεί από την βασική στρατηγική και δεν εξαρτάται από το εάν η ενέργεια ανανέωσης ήταν ευκαιριακή ή όχι. Άρα η εφαρμογή μιας ενέργειας ανανέωσης επαναφέρει αυτή την τιμή της κρίσιμης αξιοπιστίας. Αντίστοιχα αυτό συμβαίνει και με τον αριθμό των ενεργειών συντήρησης μετά την εφαρμογή μιας ενέργειας ανανέωσης.

Εφόσον έχουν ενημερωθεί τα προγράμματα συντήρησης των στοιχείων, ακολουθεί η ενημέρωση των καταστάσεων τους ανάλογα με εάν έγινε κάποια ενέργεια σε αυτά κατά την διακοπή  $n$  καθώς και τι είδους ενέργεια ήταν αυτή. Ο Πίνακας 2 δείχνει τον τρόπο κατά τον οποίο ενημερώνονται τα στοιχεία. Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις διακοπές  $n - 1$  και  $n$  υπολογίζεται ως  $t_n - t_{n-1} - t_{d(n-1)}$ . Το κόστος από την τρέχουσα ενέργεια συντήρησης υπολογίζεται ως  $c_{pk} + \tau_{pk}c_d$ . Το κόστος εξαιτίας των βλαβών από την τελευταία ενέργεια υπολογίζεται ως  $-\ln R_{1k}(t_n)(c_{fk} + \tau_{fk}c_d)$ .

**Πίνακας 2: Μεταβολή των καταστάσεων μετά από την διακοπή  $n$**

Κατάσταση	$M_{kn} = 0$	$M_{kn} = 1$	$M_{kn} = 2$
$I_{k(t_{n+1})}$	$I_{k(t_n)}$	$I_{k(t_n)} + 1$	0
$T_{ukn}$	$T_{uk(n-1)} + t_n - t_{n-1} - t_{d(n-1)}$	0	0
$T_{mkn}$	$T_{mk(n-1)}$	$T_{mk(n-1)} + T_{uk(n-1)} + t_n - t_{n-1} - t_{d(n-1)}$	0
$C_{mkn}$	$C_{mk(n-1)}$	$-\ln R_{1k}(t_n)(c_{fk} + \tau_{fk}c_d) + (c_{pk} + \tau_{pk}c_d) + C_{mk(n-1)}$	0
$R_{mkn}$	$R_{mk(n-1)}$	$R_{mk(n-1)}R_{1k}(t_n)$	1

Εφόσον έχουν ενημερωθεί τα προγράμματα και οι καταστάσεις των στοιχείων τώρα πρέπει να καθοριστεί η επόμενη προγραμματισμένη διακοπή του συστήματος. Για να γίνει αυτό υπολογίζεται η χρονική στιγμή που απαιτεί ενέργεια το κάθε στοιχείο και επιλέγεται η πλησιέστερη ως χρονική στιγμή της έναρξης της προγραμματισμένης διακοπής  $n + 1$ .

Για τα στοιχεία του συνόλου  $K_{2n}$ , δηλαδή για τα στοιχεία που δεν προγραμματίστηκε κάποια ενέργεια στην διακοπή  $n$ , η χρονική στιγμή που απαιτείται κάποια ενέργεια υπολογίζεται απευθείας από την σχέση (62). Ως  $t_{kn}$  συμβολίζεται η χρονική στιγμή που ξεκινάει η ενέργεια στο στοιχείο  $k$  μετά την διακοπή  $n - 1$ .

$$t_{k(n+1)} = t_{kn} + t_{dn} \quad \forall k \in K_{2n} \quad (62)$$

Για τα στοιχεία του συνόλου  $K_{1n}$ , δηλαδή για τα στοιχεία που προγραμματίστηκε κάποια ενέργεια στην διακοπή  $n$ , για να υπολογιστεί η χρονική στιγμή που απαιτείται κάποια ενέργεια πρέπει πρωτίστως να βρεθεί το χρονικό διάστημα που θα περάσει έως την επόμενη ενέργεια. Αυτό το διάστημα υπολογίζεται

στην σχέση (63). Δηλαδή η σχέση (63) υπολογίζει σε πόσο χρόνο η αξιοπιστία θα είναι ίση με την κρίσιμη αξιοπιστία του στοιχείου  $k$  μετά την διακοπή  $n$ , δεδομένου πως ο συσσωρευμένος αριθμός των ενεργειών συντήρησης στο στοιχείο  $k$  μετά την διακοπή  $n$  είναι  $I_k(t_{n+1})$  ενώ ο συσσωρευμένος χρόνος λειτουργίας του στοιχείου  $k$  πριν την τελευταία ενέργεια συντήρησης μετά την διακοπή  $n$  είναι  $T_{mkn}$ . Η εξίσωση που υπολογίζει την αξιοπιστία όπως και στην σχέση (53) δεν είναι πάντα η ίδια. Έτσι, για την διακοπή  $n$  στο στοιχείο  $k$ , προγραμματίστηκε μια ενέργεια ανανέωσης δηλαδή αν  $M_{kn} = 2$  ή αλλιώς αν  $I_k(t_{n+1}) = 0$  τότε η αντίστροφη της συνάρτησης της αξιοπιστίας της σχέσης (35) είναι αυτή που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το διάστημα έως την επόμενη ενέργεια για το στοιχείο  $k$ . Διαφορετικά, εάν για την διακοπή  $n$  στο στοιχείο  $k$ , προγραμματίστηκε μια ενέργεια συντήρησης δηλαδή αν  $M_{kn} = 1$  ή αλλιώς αν  $I_k(t_{n+1}) > 0$  τότε η αντίστροφη της συνάρτησης της αξιοπιστίας της σχέσης (39) είναι αυτή που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το διάστημα έως την επόμενη ενέργεια για το στοιχείο  $k$ .

$$\Delta_{tk} = R_{1k}^{-1}(R_{ckn}|I_k(t_{n+1}), T_{mkn}) \forall k \in K_{1n} \quad (63)$$

Εφόσον βρέθηκε το διάστημα που θα περάσει έως την απαίτηση για κάποια ενέργεια  $\forall k \in K_{1n}$ . Η χρονική στιγμή που απαιτεί την επόμενη ενέργεια  $\forall k \in K_{1n}$  υπολογίζεται από την σχέση (64).

$$t_{k(n+1)} = t_n + t_{dn} + \Delta_{tk} \forall k \in K_{1n} \quad (64)$$

Πλέον είναι δυνατό να υπολογιστεί η χρονική στιγμή της έναρξης της επόμενης προγραμματισμένης διακοπής  $n + 1$ . Η σχέση (65) δίνει την χρονική στιγμή αυτή συγκρίνοντας τις χρονικές στιγμές που απαιτείται η επόμενη ενέργεια  $\forall k$ . Η πλησιέστερη χρονική στιγμή από αυτές θα είναι και η χρονική στιγμή της έναρξης της επόμενης διακοπής.

$$t_{(n+1)} = \min_{k=1, \dots, K} t_{k(n+1)} \quad (65)$$

### 3.5.4 Συνολικό κόστος και ρυθμός κόστους του συστήματος κατά τη διακοπή $n$

Το συνολικό κόστος της διακοπής  $n$  για το σύστημα συμβολίζεται ως  $C_n$  και υπολογίζεται από την σχέση (66). Όπου ως  $\sum_{k \in K_{1n}} C_{pkn}$  συμβολίζεται το συνολικό κόστος από τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν στα στοιχεία του συνόλου  $K_{1n}$  κατά την διάρκεια της διακοπής  $n$ . Εάν  $M_{kn} = 2$  τότε  $C_{pkn} = c_{rk}$ . Εάν  $M_{kn} = 1$  τότε  $C_{pkn} = c_{pk}$ . Ως  $c_d t_{dn}$  συμβολίζεται το κόστος διακοπής  $n$  σύμφωνα με την διάρκεια της. Ως  $\sum_{k \in K_{1n}} -\ln R_{1k}(t_n)(c_{fk} + \tau_{fk} c_d)$  συμβολίζεται το συνολικό κόστος από τις βλάβες στα στοιχεία του συνόλου  $K_{1n}$  το οποίο κόστος συσσωρεύεται όσο το στοιχείο συντηρείται. Δηλαδή είναι το συνολικό κόστος από τις βλάβες από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή.

$$C_n = C_{(n-1)} + \sum_{k \in K_{1n}} C_{pkn} + c_d t_{dn} + \sum_{k \in K_{1n}} -\ln R_{1k}(t_n)(c_{fk} + \tau_{fk} c_d) \quad (66)$$

Ο ρυθμός κόστους του συστήματος για την διακοπή  $n$ , συμβολίζεται ως  $Costratesys_n$  και υπολογίζεται από την σχέση (67).

$$Costratesys_n = \frac{C_n}{t_n + t_{dn}} \quad (67)$$

Η παραπάνω αλγοριθμική διαδικασία σε συνδυασμό με την βασική και την δυναμική στρατηγική είναι δυνατό να εφαρμοσθούν σε οποιοδήποτε σύστημα του οποίου τα στοιχεία έχουν σειριακή διάταξη και η διαδικασία υποβάθμισης τους αποτελείται από πολλαπλά στάδια. Με την εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων βελτιστοποιείται το πρόγραμμα συντήρησης των στοιχείων και άρα κατ' επέκτασης και το πρόγραμμα συντήρησης του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω της ελαχιστοποίησης του ρυθμού κόστους των στοιχείων, χάρη στην αλγοριθμική διαδικασία και τις στρατηγικές που έχουν αναφερθεί, ελαχιστοποιείται και ο ρυθμός κόστους του συστήματος.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η εφαρμογή αυτών των προτάσεων θα γίνει σε ένα σύστημα που αποτελείται από τρία στοιχεία με σειριακή διάταξη. Η υποβάθμιση κάθε στοιχείου αποτελείται από δύο συνεχόμενα στάδια. Το σύστημα ονομάζεται *hot section* ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα. Τα στοιχεία που το αποτελούν ονομάζονται: Τουρμπίνα υψηλής πίεσης (HPT), Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης (LPT) και Συμπιεστής υψηλής πίεσης (HPC).



## Κεφάλαιο 4. Αριθμητική εφαρμογή στο υπό μελέτη σύστημα

Σε αυτό το κεφάλαιο εφαρμόζονται πειραματικά δεδομένα, τα οποία δεν προέρχονται από κάποιο πραγματικό σύστημα *hot section*, εκμειεύονται τα αποτελέσματα της βασικής στρατηγικής δηλαδή το στατικό πρόγραμμα καθώς και τα αποτελέσματα από την αλγοριθμική διαδικασία που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.5. Εφόσον υπολογιστούν τα παραπάνω αποτελέσματα θα αναλυθούν περαιτέρω.

Τα δεδομένα που εισάγονται δίνονται στον **Πίνακα 3**. Ως  $c_{pk}$ ,  $c_{rk}$ ,  $c_{fk}$  συμβολίζεται το κόστος για την περάτωση μιας ενέργειας συντήρησης, μίας ενέργειας ανανέωσης και μίας ελάχιστης επισκευής στο στοιχείο  $k$  αντίστοιχα. Η διάρκεια που αντιστοιχεί σε μία ενέργεια συντήρησης, μία ενέργεια ανανέωσης και μια ελάχιστη επισκευή για το στοιχείο  $k$  συμβολίζονται ως  $\tau_{pk}$ ,  $\tau_{rk}$ ,  $\tau_{fk}$  αντίστοιχα. Το κόστος διακοπής του συστήματος ανά μονάδα χρόνου συμβολίζεται ως  $c_d$ . Η ελάχιστη επιτρεπόμενη αξιοπιστία για το στοιχείο  $k$  συμβολίζεται ως  $R_{mk}$ . Ως  $\lambda_{sk}$  συμβολίζεται η παράμετρος εκθετικής κατανομής που μοντελοποιεί το χρόνο παραμονής του στοιχείου  $k$  στο στάδιο υποβάθμισης  $s$ . Ως  $a_k$  συμβολίζεται η παράμετρος μείωσης της ηλικίας του στοιχείου  $k$ , ενώ ως  $b_k$  συμβολίζεται η παράμετρος αύξησης του ρυθμού εμφάνισης βλάβης του στοιχείου  $k$ . Οι μονάδες κόστους μετριούνται σε \$ (USD). Οι μονάδες χρόνου μετριούνται σε ώρες πτήσεως, ωστόσο από εδώ και πέρα θα αναφέρονται ως ώρες  $h$  (hours). Οι στήλες αντιστοιχούν στα δεδομένα για το κάθε στοιχείο του *hot section*.

**Πίνακας 3: Δεδομένα και παράμετροι εισαγωγής**

$k$	1(HPT)	2(LPT)	3(HPC)
$c_d$ (\$)	10,000	10,000	10,000
$c_{pk}$ (\$)	26,000	22,000	26,000
$\tau_{pk}$ (h)	7.2	5.4	6.15
$c_{rk}$ (\$)	27,000	28,000	31,000
$\tau_{rk}$ (h)	30.21	25.33	18.34
$c_{fk}$ (\$)	37.000	25.000	39.000
$\tau_{fk}$ (h)	20.33	18.54	18.50
$R_{mk}$	0.99	0.99	0.99
$\lambda_{1k}$ ( $h^{-1}$ )	0.000418	2.6 E-05	0.000159
$\lambda_{2k}$ ( $h^{-1}$ )	0.001918	0.000176	0.001659
$b_k$	1.1	1.1	1.1
$a_k$	0.1	0.1	0.1

## 4.1 Αποτελέσματα στατικών προγραμμάτων βασικής στρατηγικής

Στον **Πίνακα 4** δίνονται τα αποτελέσματα και οι πληροφορίες που αντλούνται από την βασική στρατηγική, δηλαδή το στατικό πρόγραμμα. Ως  $R_{ck}$  συμβολίζεται η κρίσιμη αξιοπιστία στο τέλος ενός κύκλου ανανέωσης για το στοιχείο  $k$ . Ως  $N_k$  συμβολίζεται ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης εντός ενός κύκλου ανανέωσης για το στοιχείο  $k$ . Ως  $\min costarate_k$  συμβολίζεται ο ελάχιστος ρυθμός κόστους του στοιχείου  $k$  όπως υπολογίζεται από την βασική στρατηγική δηλαδή από την σχέση (41). Ως  $ren\ cycle_k$  συμβολίζεται ο κύκλος ανανέωσης για το στοιχείο  $k$ . Ως  $T_{ik}$  συμβολίζεται το διάστημα ανάμεσα στην ενέργεια  $i$  και την ενέργεια  $i + 1$ .

**Πίνακας 4: Στατικό πρόγραμμα**

$k$	1(HPT)	2(LPT)	3(HPC)
$\min costarate_k$ (\$/h)	1144.4200	69.6187	498.976
$R_{ck}$	0.99	0.99	0.99
$N_k$	4	4	3
$ren\ cycle_k$ (h)	699.662	8606.028	1010.594
$T_{0k}$ (h)	168.449	2250.967	300.690
$T_{1k}$ (h)	144.341	1928.165	257.442
$T_{2k}$ (h)	124.665	1665.212	222.314
$T_{3k}$ (h)	108.399	1448.090	193.358
$T_{4k}$ (h)	94.7990	1266.664	-

## 4.2 Αποτελέσματα αλγοριθμικής διαδικασίας

Η αλγοριθμική διαδικασία εξετάζεται για τρεις διαφορετικές τιμές κατώτατου ορίου αναλογίας αξιοπιστίας  $\Delta P_k$ . Στον **Πίνακα 5** δίνονται οι συμβολισμοί των μεταβλητών. Στον **Πίνακα 6** δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της αλγοριθμικής διαδικασίας που μελετήθηκε. Ωστόσο δεν είναι εφικτό να συγκριθούν τα

αποτελέσματα των τριών διαφορετικών κατώτατων ορίων αξιοπιστίας διότι δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων στο ίδιο χρονικό διάστημα εφόσον το εργαλείο υπολογισμού κατάφερε για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  να φτάνει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Δηλαδή ενώ στόχος ήταν η βελτιστοποίηση να γίνει για ορίζοντα προγραμματισμού το χρονικό διάστημα ενός χρόνου (8766.1526 h), σταματούσε πολύ νωρίτερα για ορισμένες τιμές  $\Delta P_k$ . Για αυτό τον λόγο στον **Πίνακα 7** υπολογίζεται η βελτιστοποίηση έως μια χρονική στιγμή (1522.460 h) ικανή να αγγιχτεί και από τις τρεις περιπτώσεις  $\Delta P_k$ .<sup>1</sup> Στον **Πίνακα 6** ο ορίζοντας προγραμματισμού είναι διαφορετικός αναλόγως την τιμή του  $\Delta P_k$ . Ως  $t_{lastn}$  συμβολίζεται η χρονική στιγμή που ξεκινάει η τελευταία διακοπή για την οποία προγραμματίζεται κάποια απόφαση ενέργειας σύμφωνα με την αλγοριθμική διαδικασία και τις στρατηγικές.

**Πίνακας 5: Δείκτες και παράμετροι**

$n$	Σύνολο των διακοπών που προγραμματίζονται κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ wtime_s$	Μέσος χρόνος λειτουργίας του συστήματος ανάμεσα στις διακοπές κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ cost_s$	Μέσο κόστος ανά διακοπή συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ cost\ rate_s$	Μέσος ρυθμός κόστους διακοπής του συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ stime_s$	Μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής του συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ PM_s$	Μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης στο σύστημα σε κάθε διακοπή κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ PR_s$	Μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης στο σύστημα σε κάθε διακοπή κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ M_s$	Μέσος αριθμός ενεργειών στο σύστημα σε κάθε διακοπή κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$sum\ opp_s$	Σύνολο των ευκαιριακών ενεργειών κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$avg\ opp_s$	Μέσος αριθμός των ευκαιριακών ενεργειών στο σύστημα ανά διακοπή κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού

<sup>1</sup> Η διακοπή που ξεκινάει μετά την χρονική στιγμή  $t = 1522.460\ h$  δεν υπολογίζεται από την αλγοριθμική διαδικασία. Σε περίπτωση που η διακοπή έχει ξεκινήσει πριν την στιγμή  $t = 1522.460\ h$  και ολοκληρώνεται μετά από αυτήν τότε η διακοπή υπολογίζεται κανονικά από την αλγοριθμική διαδικασία και ο ορίζοντας προγραμματισμού τελειώνει με την ολοκλήρωση της εν λόγω διακοπής.



$sum M_s$	Σύνολο των ενεργειών στο σύστημα κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum no opp_s$	Σύνολο των μη ευκαιριακών ενεργειών στο σύστημα κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$n_{HPT}$	Σύνολο των διακοπών που προγραμματίστηκαν κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού για την τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum M_{HPT}$	Σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum PM_{HPT}$	Σύνολο των ενεργειών συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum PR_{HPT}$	Σύνολο των ενεργειών ανανέωσης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum noM_{HPT}$	Σύνολο των διακοπών για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$n_{LPT}$	Σύνολο των διακοπών που προγραμματίστηκαν κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού για την τουρμπίνα χαμηλής πίεσης
$sum M_{LPT}$	Σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum PM_{LPT}$	Σύνολο των ενεργειών συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum PR_{LPT}$	Σύνολο των ενεργειών ανανέωσης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum noM_{LPT}$	Σύνολο των διακοπών για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$n_{HPC}$	Σύνολο των διακοπών που προγραμματίστηκαν κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού για τον συμπιεστή υψηλής πίεσης
$sum M_{HPC}$	Σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού
$sum PM_{HPC}$	Σύνολο των ενεργειών συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στον συμπιεστή

	υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$sum PR_{HPC}$	Σύνολο των ενεργειών ανανέωσης που πραγματοποιήθηκαν στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού
$sum noM_{HPC}$	Σύνολο των διακοπών για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού

Στον **Πίνακα 6** για  $\Delta P_k = 1$ , σε ορίζοντα προγραμματισμού που ολοκληρώνεται με την λήξη της τελευταίας διακοπής η οποία ξεκινάει την χρονική στιγμή 1515.538 h, παρατηρούνται 182 προγραμματισμένες διακοπές, μέσος χρόνος λειτουργίας ανάμεσα στις διακοπές 0.974h, μέσο κόστος διακοπής 587803366.5142 \$ ενώ ο μέσος ρυθμός κόστους διακοπής είναι 555900.3728 \$/h. Ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής είναι 7.388 h. Ο μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης ανά διακοπή στο σύστημα είναι 2.989 ενώ ο μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης ανά διακοπή στο σύστημα είναι 0.011. Σε κάθε διακοπή συνολικά οι ενέργειες που εκτελούνται στο σύστημα είναι 3. Το άθροισμα των ευκαιριακών ενεργειών στο σύστημα ανέρχεται στις 364 ενέργειες ενώ ο αριθμός των ευκαιριακών ενεργειών στο σύστημα ανά διακοπή είναι 2. Συνολικά στο σύστημα εκτελούνται 546 ενέργειες και οι 182 από αυτές είναι μη ευκαιριακές. Όσο αφορά τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα, 16 διακοπές προγραμματίζονται για περάτωση κάποιας ενέργειας στο στοιχείο Τουρμπίνα υψηλής πίεσης. Οι ενέργειες που εκτελούνται στο συγκεκριμένο στοιχείο ανέρχονται στις 182, μάλιστα οι 181 από αυτές είναι ενέργειες συντήρησης, άρα μόνο 1 ενέργεια ανανέωσης εκτελείται στο στοιχείο. Φαίνεται πως σε κάθε διακοπή του συστήματος θα πραγματοποιηθεί κάποια ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο. Για την Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης, προγραμματίζονται 18 διακοπές για περάτωση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν 182 ενέργειες στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης και όλες είναι ενέργειες συντήρησης. Σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται και μια ενέργεια συντήρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο. Για τον Συμπιεστή υψηλής πίεσης, προγραμματίζονται 148 διακοπές για την περάτωση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο. Το σύνολο των ενεργειών που προγραμματίζονται στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης ανέρχεται στις 182 ενέργειες, οι 181 από τις οποίες είναι ενέργειες συντήρησης ενώ μόνο 1 είναι ενέργειας ανανέωσης. Σε κάθε διακοπή εκτελείται κάποια ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο. Στον **Πίνακα 6** για  $\Delta P_k = 0.5$ , σε ορίζοντα προγραμματισμού που ολοκληρώνεται με την λήξη της τελευταίας διακοπής η οποία ξεκινάει την χρονική στιγμή 8764.038 h, παρατηρούνται 945

προγραμματισμένες διακοπές, μέσος χρόνος λειτουργίας ανάμεσα στις διακοπές 2.110 h, μέσο κόστος διακοπής  $1.58336E+10$  \$ ενώ ο μέσος ρυθμός κόστους διακοπής είναι 2559456.9237 \$/h. Ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής είναι 7.169 h. Ο μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης ανά διακοπή στο σύστημα είναι 0.992 ενώ ο μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης ανά διακοπή στο σύστημα είναι 0.021. Ο μέσος αριθμός ενεργειών που προγραμματίζονται στο σύστημα σε κάθε διακοπή είναι 1.013, ενώ το σύνολο των ευκαιριακών ενεργειών που εκτελούνται στο σύστημα είναι 11. Ο μέσος αριθμός των ευκαιριακών ενεργειών που προγραμματίζονται σε κάθε διακοπή στο σύστημα είναι 0.012. Το σύνολο των ενεργειών που εκτελούνται στο σύστημα ανέρχεται στις 957 ενέργειες, από αυτές οι 946 είναι μη ευκαιριακές. Όσο αφορά τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα, 652 διακοπές προγραμματίζονται για περάτωση κάποιας ενέργειας στο στοιχείο Τουρμπίνα υψηλής πίεσης. Οι ενέργειες που εκτελούνται στο συγκεκριμένο στοιχείο ανέρχονται στις 658, εκ των οποίων ενέργειες συντήρησης είναι οι 646 ενώ οι υπόλοιπες 12 είναι ενέργειες ανανέωσης. Σε 287 διακοπές δεν πραγματοποιείται κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης. Για την Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης, προγραμματίζονται 137 διακοπές για περάτωση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν 142 ενέργειες στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης, εκ των οποίων οι 141 είναι ενέργειες συντήρησης ενώ μόνο 1 είναι η ενέργεια ανανέωσης. Σε 803 διακοπές δεν πραγματοποιείται κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Για τον Συμπιεστή υψηλής πίεσης, προγραμματίζονται 156 διακοπές για την περάτωση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο. Στο συγκεκριμένο στοιχείο προγραμματίζονται συνολικά 157 ενέργειες, εκ των οποίων οι 150 είναι ενέργειες συντήρησης και οι 7 ενέργειες ανανέωσης. Σε 788 διακοπές δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο. Στον **Πίνακα 6** για  $\Delta P_k = 0$ , σε ορίζοντα προγραμματισμού που ολοκληρώνεται με την λήξη της τελευταίας διακοπής η οποία ξεκινάει την χρονική στιγμή 7542.377 h, παρατηρούνται 356 προγραμματισμένες διακοπές, μέσος χρόνος λειτουργίας ανάμεσα στις διακοπές 12.640 h, μέσο κόστος διακοπής  $6.9194E+09$  \$ ενώ ο μέσος ρυθμός κόστους διακοπής είναι 1175759.2810 \$/h. Ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής είναι 8.529 h. Ο μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης ανά διακοπή στο σύστημα είναι 0.885 ενώ ο μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης ανά διακοπή στο σύστημα είναι 0.121. Ο μέσος αριθμός ενεργειών που προγραμματίζονται στο σύστημα σε κάθε διακοπή είναι 1.006, ενώ το σύνολο των ευκαιριακών ενεργειών που εκτελούνται στο σύστημα είναι 2. Ο μέσος αριθμός των ευκαιριακών ενεργειών που προγραμματίζονται σε κάθε διακοπή στο σύστημα είναι 0.006. Το σύνολο των ενεργειών που εκτελούνται στο σύστημα ανέρχεται στις 358 ενέργειες, από αυτές οι 356 είναι μη ευκαιριακές. Όσο αφορά τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα, 26

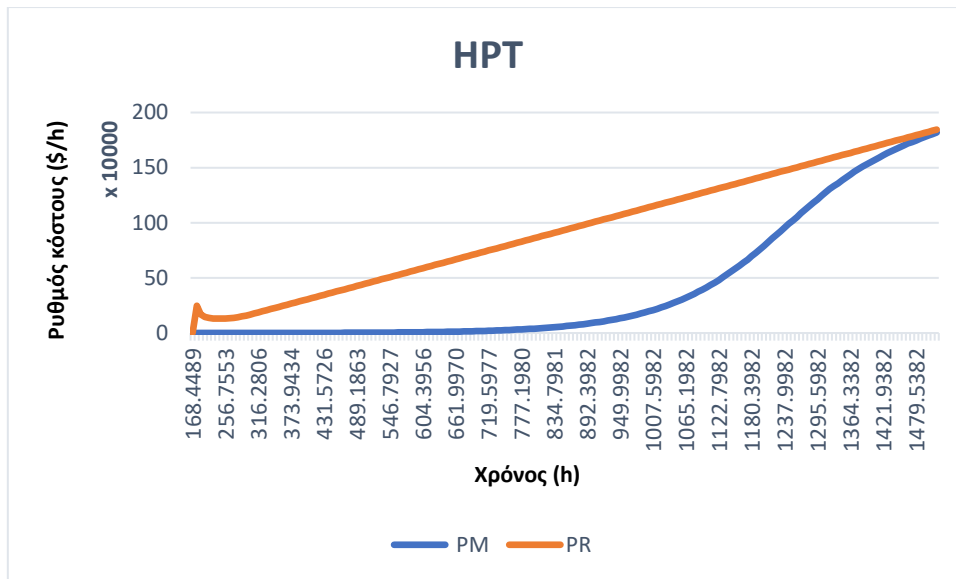
διακοπές προγραμματίζονται για περάτωση κάποιας ενέργειας στο στοιχείο Τουρμπίνα υψηλής πίεσης. Οι ενέργειες που εκτελούνται στο συγκεκριμένο στοιχείο ανέρχονται στις 26 και όλες είναι ενέργειες ανανέωσης. Σε 330 διακοπές δεν πραγματοποιείται κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης. Για την Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης, προγραμματίζονται 2 διακοπές για περάτωση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν 2 ενέργειες στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης και οι 2 είναι ενέργειες ανανέωσης. Σε 354 διακοπές δεν πραγματοποιείται κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Για τον Συμπιεστή υψηλής πίεσης, προγραμματίζονται 328 διακοπές για την περάτωση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο. Στο συγκεκριμένο στοιχείο προγραμματίζονται συνολικά 330 ενέργειες, εκ των οποίων οι 315 είναι ενέργειες συντήρησης και οι 15 ενέργειες ανανέωσης. Σε 26 διακοπές δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο.

**Πίνακας 6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγοριθμικής διαδικασίας**

$\Delta P_k$	1	0.5	0
$t_{lastn} (h)$	1515.538	8764.038	7542.377
$n$	182	945	356
$avg\ wtime_s (h)$	0.974	2.110	12.640
$avg\ cost_s (\$)$	587803366.5142	1.58336E+10	6.9194E+09
$avg\ cost\ rate_s (\$/h)$	555900.3728	2559156.9237	1175759.2810
$avg\ stime_s (h)$	7.388	7.169	8.529
$avg\ PM_s$	2.989	0.992	0.885
$avg\ PR_s$	0.011	0.021	0.121
$avg\ M_s$	3	1.013	1.006
$sum\ opp_s$	364	11	2
$avg\ opp_s$	2	0.012	0.006
$sum\ M_s$	546	957	358
$sum\ no\ opp_s$	182	946	356
$n_{HPT}$	16	652	26
$sum\ M_{HPT}$	182	658	26
$sum\ PM_{HPT}$	181	646	0
$sum\ PR_{HPT}$	1	12	26
$sum\ noM_{HPT}$	0	287	330
$n_{LPT}$	18	137	2
$sum\ M_{LPT}$	182	142	2
$sum\ PM_{LPT}$	182	141	0
$sum\ PR_{LPT}$	0	1	2
$sum\ noM_{LPT}$	0	803	354
$n_{HPC}$	148	156	328
$sum\ M_{HPC}$	182	157	330
$sum\ PM_{HPC}$	181	150	315
$sum\ PR_{HPC}$	1	7	15
$sum\ noM_{HPC}$	0	788	26

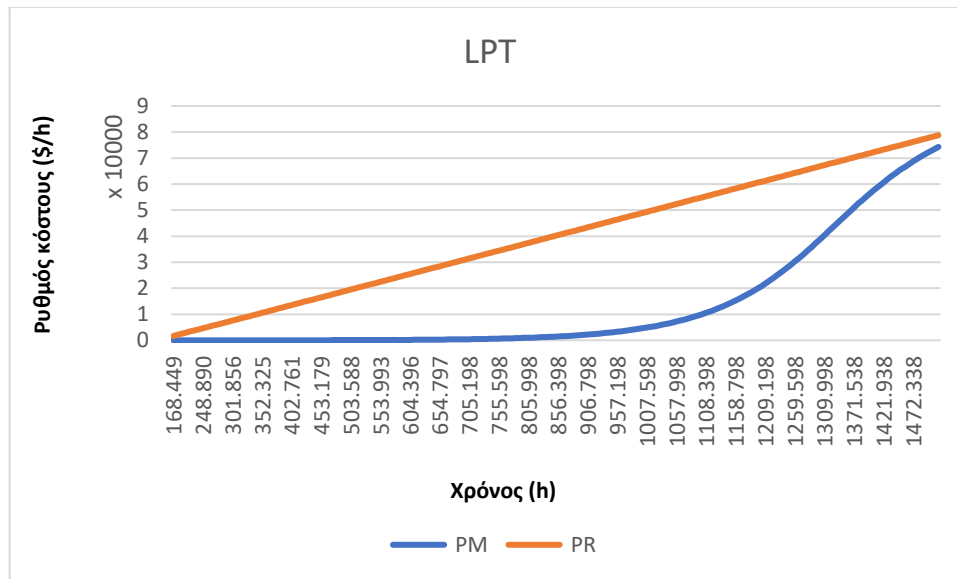
Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση  $\Delta P_k = 1$ . Ο αριθμός ενεργειών ανά διακοπή είναι ακριβής τιμή και όχι μέση, το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των ευκαιριακών ενεργειών αφού σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται μία ενέργεια σε κάθε στοιχείο. Το 66.67% των ενεργειών που υφίστανται τα στοιχεία στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  είναι ευκαιριακές ενέργειες. Το 1.15% των ενεργειών που υφίστανται τα στοιχεία στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  είναι ευκαιριακές ενέργειες. Το 0.56% των ενεργειών που υφίστανται τα στοιχεία στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  είναι ευκαιριακές ενέργειες. Σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των αποτελεσμάτων παίζουν και οι τιμές των παραμέτρων των εκθετικών κατανομών που περιγράφουν την υποβάθμιση κάθε στοιχείου και αυτό ενδεχομένως να εξηγεί για ποιο λόγο σε ορισμένες περιπτώσεις ισχύει  $avg\ wtime_s < avg\ stime_s$ .

Το **Σχήμα 2** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης (HPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Στην πρώτη κιάλας διακοπή για την χρονική στιγμή  $t_1 = 168.4489\ h$ , προγραμματίζεται μία ενέργεια ανανέωσης (PR), ενώ οι επόμενες ενέργειες που προγραμματίζονται είναι ενέργειες συντήρησης (PM), έως ότου ο ρυθμός κόστους που αντιστοιχεί στην ενέργεια ανανέωσης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο για μια ενέργεια συντήρησης. Άρα ο ρυθμός κόστους των ενεργειών συντήρησης εφόσον έχει μειωθεί λόγω της ενέργειας ανανέωσης ξεκινάει και πάλι να αυξάνεται έως ότου γίνει μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των ενεργειών ανανέωσης και την χρονική στιγμή της διακοπής που θα γίνει αυτό προγραμματίζεται μία ενέργεια ανανέωσης.



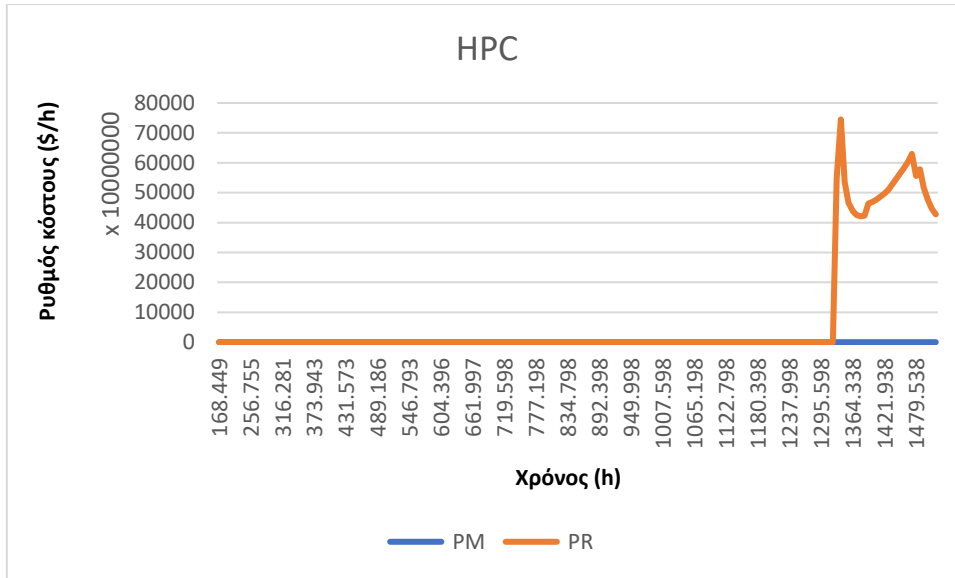
Σχήμα 2: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 1$

Το Σχήμα 3 αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  και παρουσιάζει την σύγκρισή ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης (LPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$ . Για το συγκεκριμένο στοιχείο κάθε ενέργεια που προγραμματίζεται είναι ενέργεια συντήρησης εφόσον ο ρυθμός που αντιστοιχεί σε μία ενέργεια συντήρησης είναι συνέχεια μικρότερος από τον αντίστοιχο μίας ενέργειας ανανέωσης. Ωστόσο πιθανό είναι για μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού να ξεπεράσει κάποια στιγμή ο ρυθμός κόστους μιας ενέργειας συντήρησης τον αντίστοιχο μίας ενέργειας ανανέωσης και τότε να προγραμματιστεί μία ανανέωση, διότι ο ρυθμός κόστους συντήρησης αυξάνεται γρηγορότερα από ότι ο ρυθμός κόστους ανανέωσης.

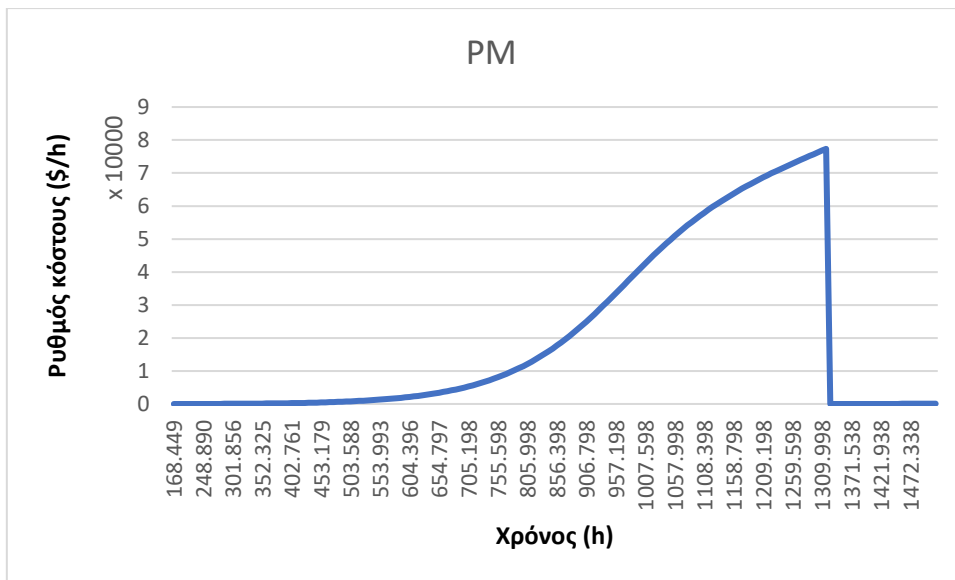


Σχήμα 3: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας χαμηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 1$

Το **Σχήμα 4** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Η μοναδική ενέργεια ανανέωσης που θα συμβεί στο εν λόγω στοιχείο κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού, συμβαίνει στην διακοπή  $n = 156$  για την χρονική στιγμή  $t_{156} = 1317.1982 h$ . Στην συνέχεια ο ρυθμός κόστους των ενεργειών συντήρησης εφόσον έχει μειωθεί λόγω της ενέργειας ανανέωσης ξεκινάει και πάλι να αυξάνεται έως ότου γίνει μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των ενεργειών ανανέωσης. Λόγω της μεγάλης διαφοράς μεταξύ του ρυθμού κόστους που αντιστοιχεί στις ενέργειες συντήρησης και στις ενέργειες ανανέωσης τα **Σχήμα 5** και **Σχήμα 6** δίνονται ώστε να διακρίνονται ευκολότερα οι ρυθμοί των ενεργειών συντήρησης και ανανέωσης αντίστοιχα. Το **Σχήμα 5** παρουσιάζει τον ρυθμό κόστους των ενεργειών συντήρησης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού για τις χρονικές στιγμές των προγραμματισμένων διακοπών όπου επιλέγεται μια ενέργεια συντήρησης. Το **Σχήμα 6** παρουσιάζει τον ρυθμό κόστους των ενεργειών ανανέωσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού για τις χρονικές στιγμές των προγραμματισμένων διακοπών όπου επιλέγεται μια ενέργεια ανανέωσης.

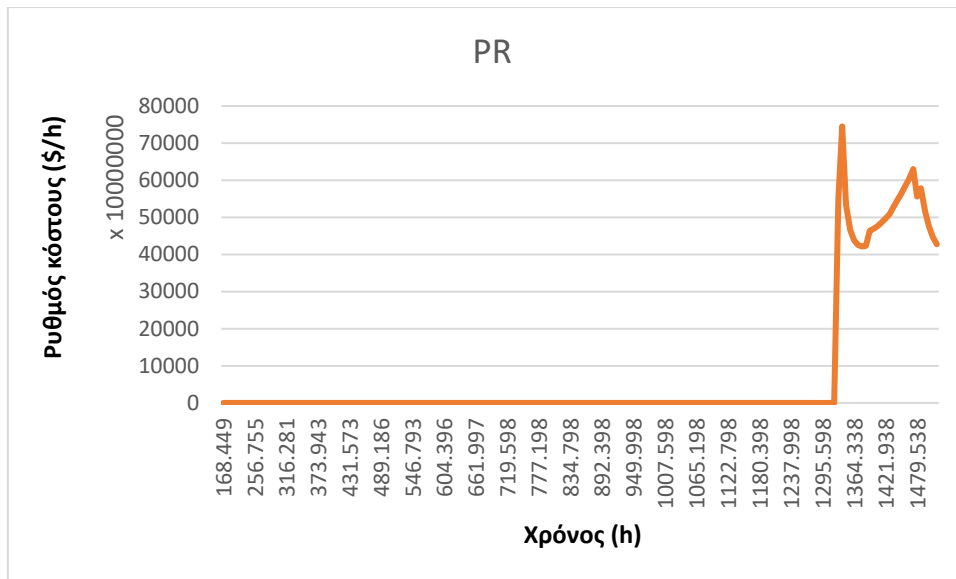


Σχήμα 4: Ρυθμός κόστους Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 1$



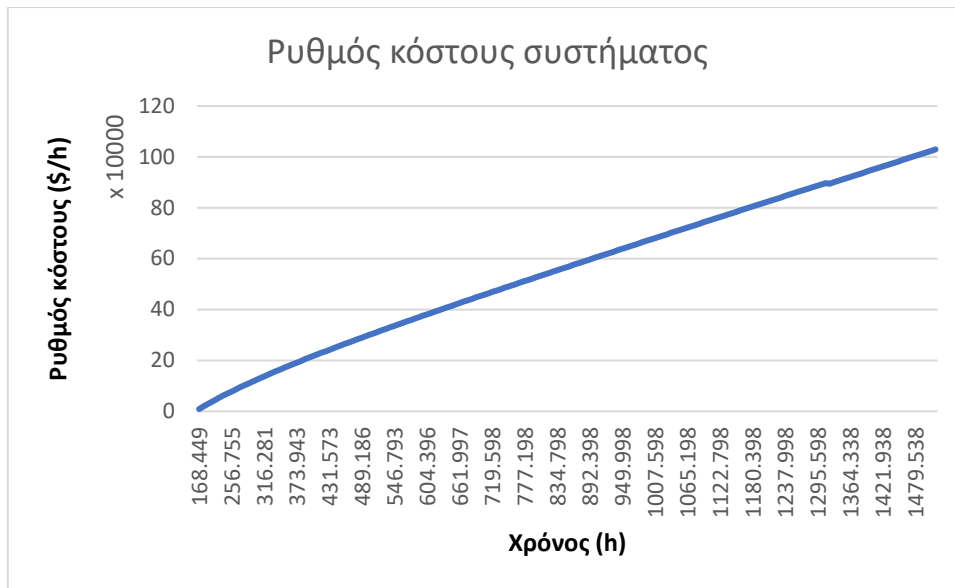
Σχήμα 5: Ρυθμός κόστους ενεργειών συντήρησης Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 1$





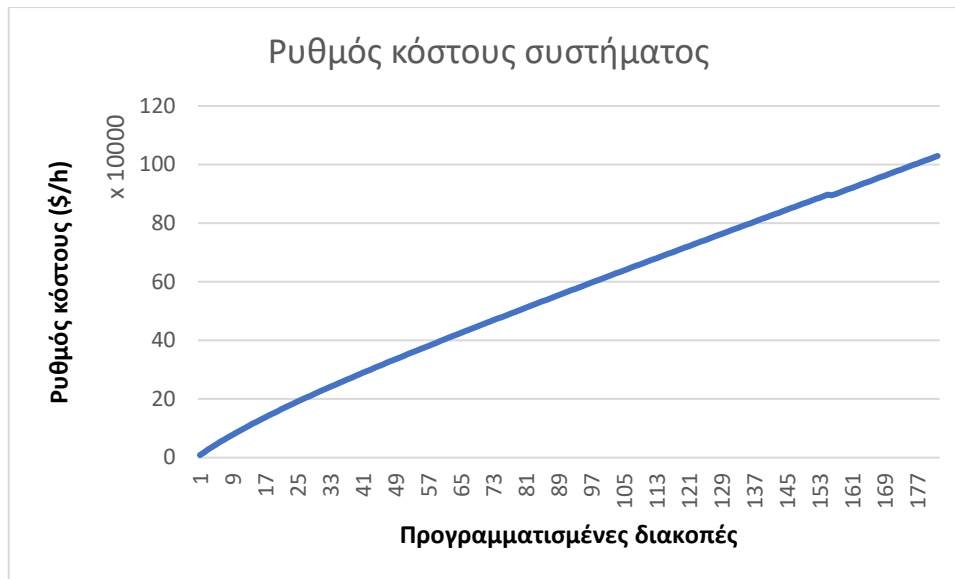
**Σχήμα 6: Ρυθμός κόστους ενεργειών ανανέωσης Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 1$**

Το **Σχήμα 7** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του χρόνου που διαρκεί ο ορίζοντας προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 1$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή του χρόνου. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε διακοπή την χρονική στιγμή  $t_{156}$  είναι ενέργεια ανανέωσης.



**Σχήμα 7: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει του χρόνου για  $\Delta P_k = 1$**

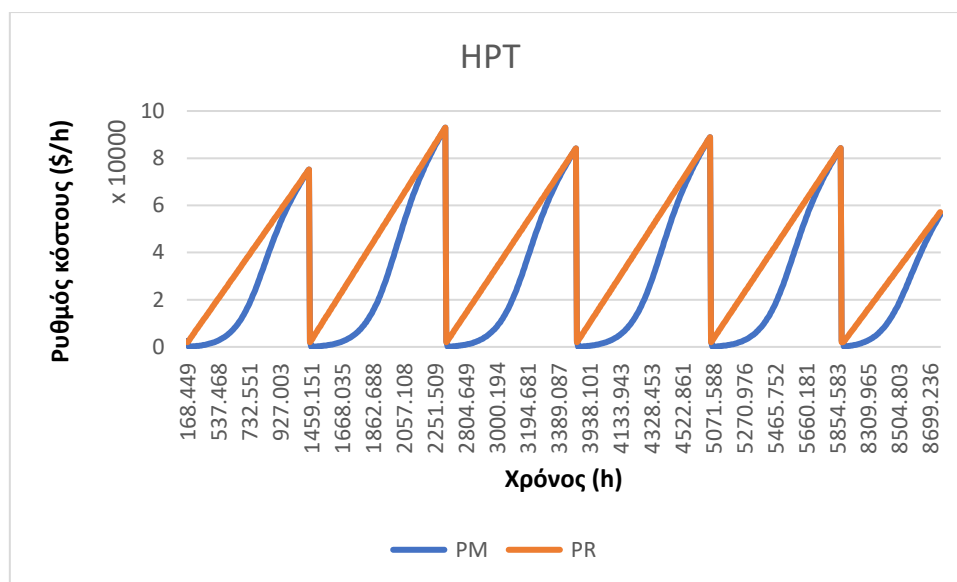
Το **Σχήμα 8** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των προγραμματισμένων διακοπών εντός οριζοντα προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 1$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των προγραμματισμένων διακοπών εντός του οριζοντα προγραμματισμού. Είναι αναμενόμενο εφόσον σε μεγαλύτερο οριζοντα προγραμματισμού προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές και όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 8** μεγαλύτερος οριζοντα προγραμματισμού σημαίνει και μεγαλύτερος ρυθμός κόστους συστήματος. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή των προγραμματισμένων διακοπών. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον αριθμό των προγραμματισμένων διακοπών εντός του οριζοντα προγραμματισμού και άρα με την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού. Σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή  $n = 156$  είναι ενέργεια ανανέωσης.



**Σχήμα 8: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει αριθμού των προγραμματισμένων διακοπών για  $\Delta P_k = 1$**

Το **Σχήμα 9** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης (HPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Οι ενέργειες ανανέωσης που προγραμματίζονται για το συγκεκριμένο στοιχείο στον ορίζοντα προγραμματισμού είναι 12. Οι χρονικές στιγμές των ανανεώσεων αυτών είναι :  $t_1, t_{107}, t_{108}, t_{226}, t_{227}, t_{340}, t_{341}, t_{457}, t_{458}, t_{571}, t_{572}, t_{806}$ . Ορισμένες από αυτές τις ενέργειες ανανέωσης είναι διαδοχικές. Δηλαδή η αμέσως επόμενη ενέργεια που προγραμματίζεται στο στοιχείο είναι και αυτή μια ενέργεια ανανέωσης. Οι χρονικές στιγμές με τέτοιες διαδοχικές ενέργειες είναι:  $(t_{107}, t_{108}), (t_{226}, t_{227}), (t_{340}, t_{341}), (t_{457}, t_{458}), (t_{571}, t_{572}, t_{806})$ . Ανάμεσα στις ενέργειες ανανέωσης που δεν είναι διαδοχικές προγραμματίζονται είτε ενέργειες συντήρησης είτε δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_1, t_{107}$  προγραμματίζονται 105 ενέργειες συντήρησης σε 106 διακοπές. Άρα επομένως σε μία προγραμματισμένη διακοπή δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_{108}, t_{226}$  προγραμματίζονται 117 ενέργειες συντήρησης σε 118 διακοπές. Άρα επομένως σε μία προγραμματισμένη διακοπή δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_{227}, t_{340}$  προγραμματίζονται 112

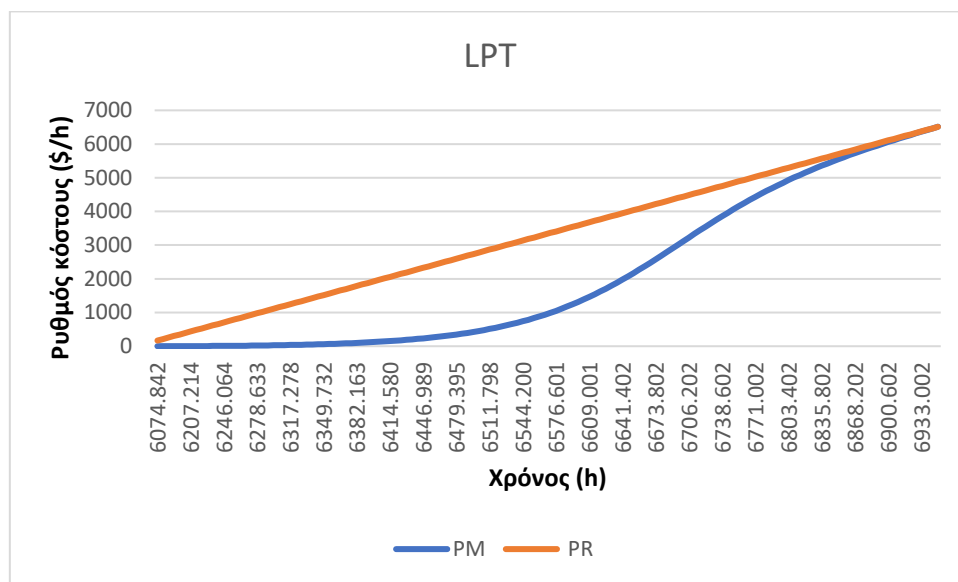
ενέργειες συντήρησης σε 113 διακοπές. Άρα επομένως σε μία προγραμματισμένη διακοπή δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_{341}, t_{457}$  προγραμματίζονται 115 ενέργειες συντήρησης σε 116 διακοπές. Άρα επομένως σε μία προγραμματισμένη διακοπή δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_{458}, t_{571}$  προγραμματίζονται 112 ενέργειες συντήρησης σε 113 διακοπές. Άρα, σε μία προγραμματισμένη διακοπή δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια. Ανάμεσα στις χρονικές στιγμές  $t_{572}, t_{860}$  βρίσκονται 288 διακοπές στις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στο στοιχείο. Αρχικά παρατηρείται η περάτωση μίας ενέργειας ανανέωσης για την χρονική στιγμή  $t_1$ , αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός κόστους για μία ανανέωση είναι μικρότερος από το αντίστοιχο για μία συντήρηση. Η ενέργεια ανανέωσης μειώνει τον ρυθμό κόστους για μία συντήρηση καθώς και για μία ανανέωση, στην συνέχεια ο ρυθμός κόστους για μία συντήρηση είναι μικρότερος και έτσι προγραμματίζεται μία συντήρηση την χρονική στιγμή της διακοπής όπου θα χρειαστεί κάποια ενέργεια το συγκεκριμένο στοιχείο. Ο ρυθμός κόστους μιας ενέργειας συντήρησης αυξάνεται καθώς περνάει ο χρόνος και προγραμματίζονται συντηρήσεις στο στοιχείο το ίδιο ισχύει και για τον ρυθμό κόστους μίας ανανέωσης. Ο ρυθμός κόστους μίας συντήρησης αυξάνεται γρηγορότερα από αυτόν μίας ανανέωσης και όταν ο ρυθμός κόστους της συντήρησης ξεπεράσει αυτόν της ανανέωσης τότε προγραμματίζεται πάλι κάποια ενέργεια ανανέωσης.



**Σχήμα 9: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0.5$**

Το **Σχήμα 10** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  και παρουσιάζει την σύγκριση του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσης

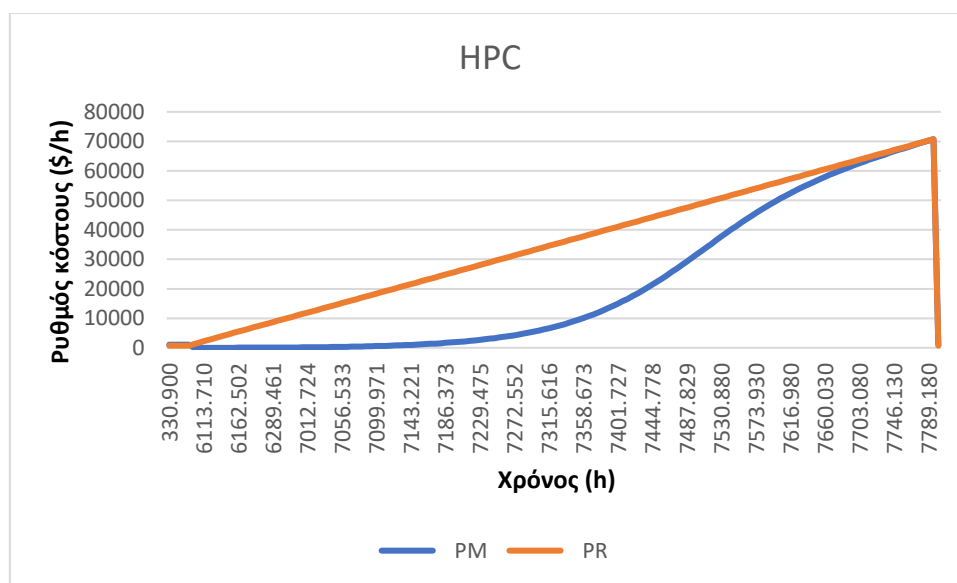
(PR) στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης (LPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Η μοναδική ενέργεια ανανέωσης προγραμματίζεται στην χρονική στιγμή  $t_{725}$ , έχουν προγραμματιστεί προηγουμένως 141 ενέργειες συντήρησης και 584 διακοπές κατά τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στο στοιχείο. Αυτό που παρατηρείται και στο **Σχήμα 10** είναι πως προγραμματίζονται ενέργειες συντήρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο (όταν χρειάζεται κάποια ενέργεια) διότι ο ρυθμός κόστους για την περάτωση μίας συντήρησης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο μίας ανανέωσης. Ενώ αυξάνονται και οι δύο ρυθμοί κόστους των ενεργειών συντήρησης και ανανέωσης, στην χρονική στιγμή  $t_{725}$  ο ρυθμός κόστους της συντήρησης θα ξεπεράσει τον ρυθμό κόστους της ανανέωσης και τότε θα προγραμματιστεί μία ανανέωση.



**Σχήμα 10: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας χαμηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0.5$**

Το **Σχήμα 11** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Ο αριθμός των ενεργειών ανανέωσης εντός του ορίζοντα προγραμματισμού είναι 7. Διαδοχικές ενέργειες ανανέωσης προγραμματίζονται στις χρονικές στιγμές  $(t_2, t_{109}, t_{228}, t_{342}, t_{459})$  και  $(t_{859}, t_{861})$ . Ανάμεσα στις ενέργειες

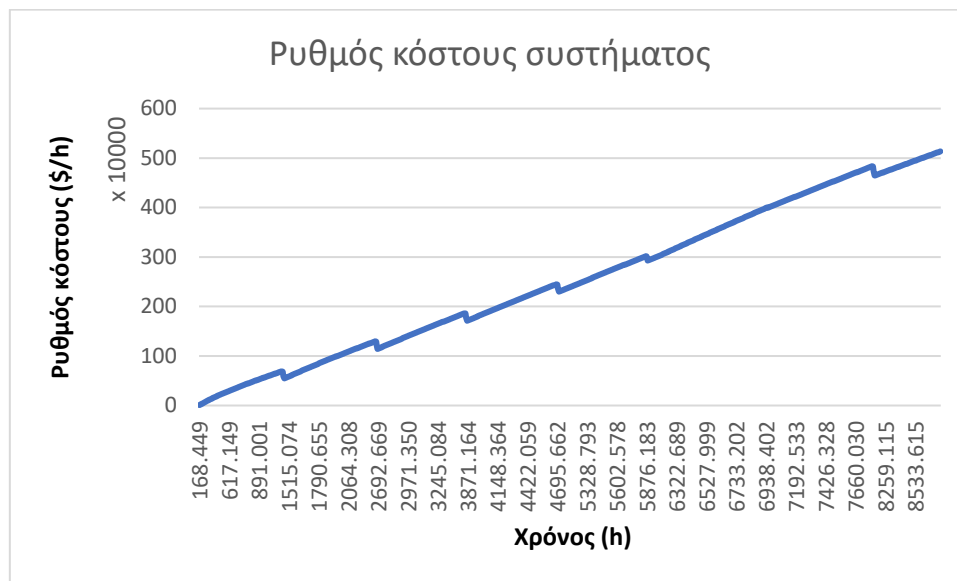
ανανέωσης που έχουν προγραμματιστεί τις χρονικές στιγμές  $t_{459}$  και  $t_{859}$ , προγραμματίζονται 150 ενέργειες συντήρησης και δεν προγραμματίζονται ενέργειες για 250 διακοπές. Αυτό που παρατηρείται στο **Σχήμα 11** είναι πως αρχικά ο ρυθμός κόστους μίας ανανέωσης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο μία συντήρησης. Για αυτό τον λόγο προγραμματίζονται ενέργειες ανανέωσης, μειώνεται ο ρυθμός κόστους μίας συντήρησης και προγραμματίζονται συντηρήσεις μέχρι ότου ο ρυθμός κόστους συντήρησης γίνει μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της ανανέωσης. Στο τέλος του ορίζοντα προγραμματισμού προγραμματίζονται δύο ενέργειες ανανέωσης που μειώνουν τον ρυθμό κόστους ανανέωσης και συντήρησης.



**Σχήμα 11: Ρυθμός κόστους Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0.5$**

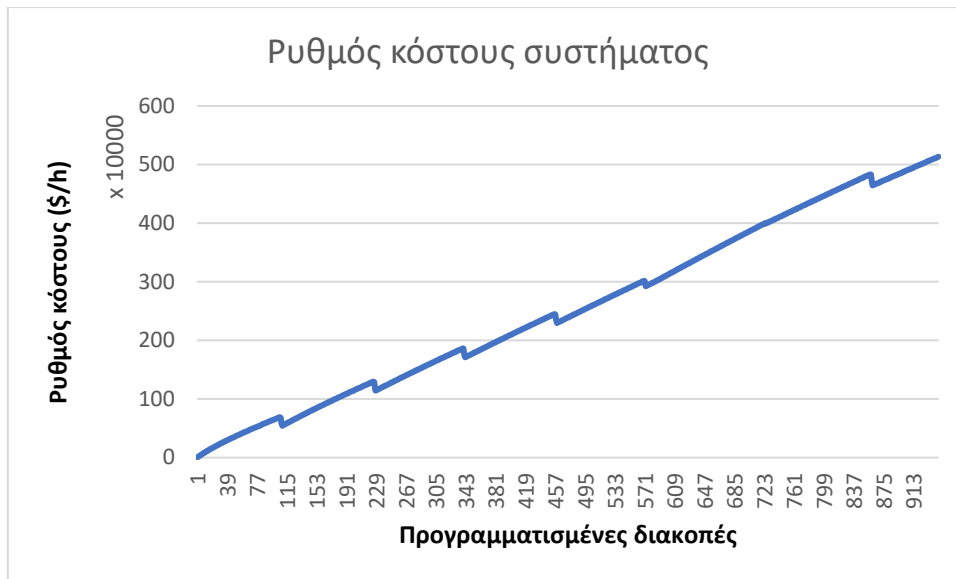
Το **Σχήμα 12** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του χρόνου που διαρκεί ο ορίζοντας προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0.5$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή του χρόνου. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε διακοπή τις χρονικές στιγμές

$t_{107}, t_{108}, t_{109}, t_{226}, t_{227}, t_{228}, t_{340}, t_{341}, t_{342}, t_{457}, t_{458}, t_{459}, t_{571}, t_{572}, t_{725}, t_{859}, t_{860}, t_{861}$  είναι ενέργεια ανανέωσης.



**Σχήμα 12:** Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει του χρόνου για  $\Delta P_k = 0.5$

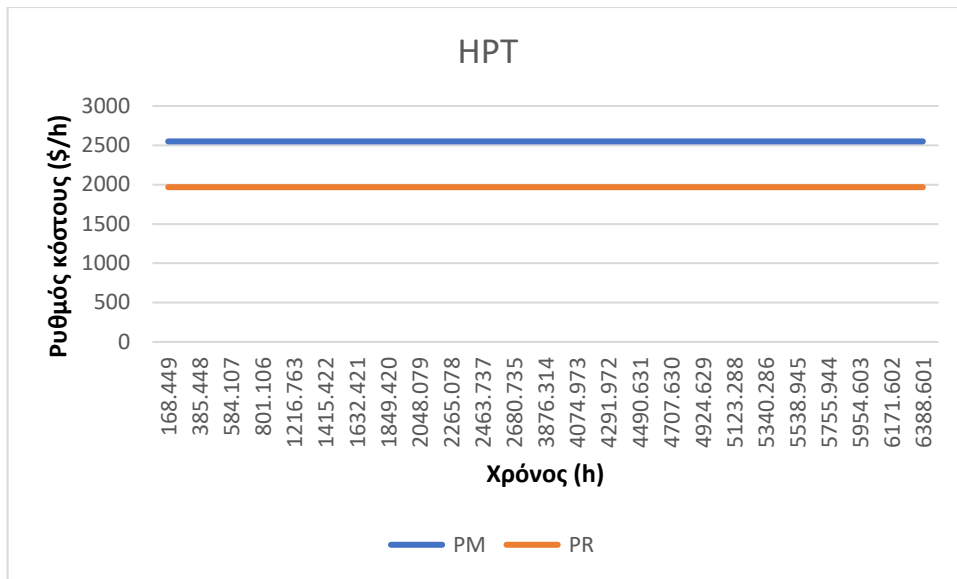
Το **Σχήμα 13** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των προγραμματισμένων διακοπών εντός ορίζοντα προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0.5$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των προγραμματισμένων διακοπών εντός του ορίζοντα προγραμματισμού. Είναι αναμενόμενο εφόσον σε μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές και όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 12** μεγαλύτερος ορίζοντας προγραμματισμού σημαίνει και μεγαλύτερος ρυθμός κόστους συστήματος. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή των προγραμματισμένων διακοπών. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον αριθμό των προγραμματισμένων διακοπών εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και άρα με την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού, σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκαν οι διακοπές  $n = 107, 108, 109, 226, 227, 228, 340, 341, 342, 457, 458, 459, 571, 572, 725, 859, 860, 861$  είναι ενέργειες ανανέωσης.



**Σχήμα 13: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει αριθμού των προγραμματισμένων διακοπών για  $\Delta P_k = 0.5$**

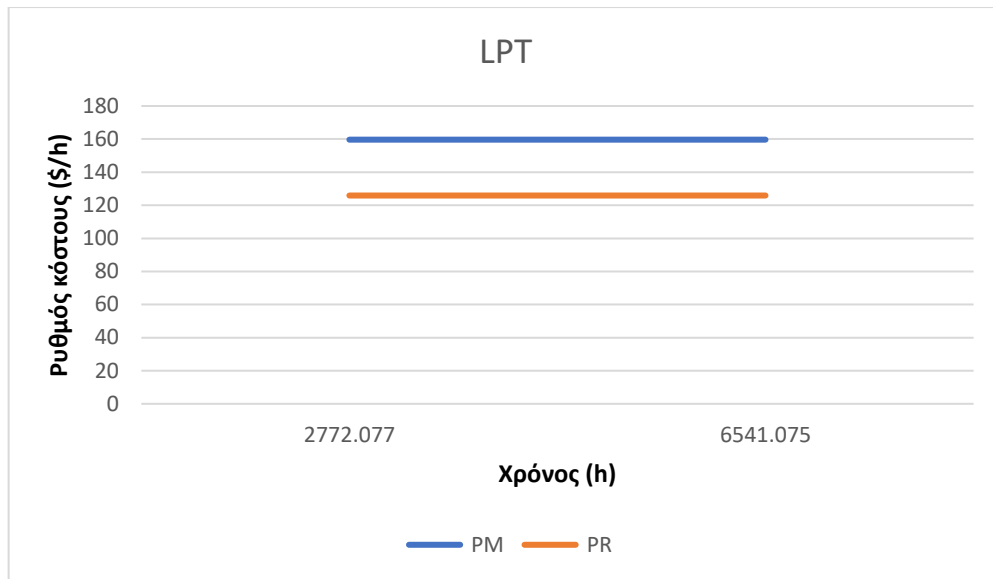
Το **Σχήμα 14** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης (HPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Κάθε μία από τις 26 ενέργειες που προγραμματίζονται στο στοιχείο είναι ενέργεια ανανέωσης. Αυτό φαίνεται διότι ο ρυθμός κόστους ανανέωσης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της συντήρησης. Ενδέχεται για μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού ο ρυθμός κόστους ανανέωσης να ξεπεράσει αυτόν της συντήρησης και έτσι να προγραμματιστεί κάποια συντήρηση.





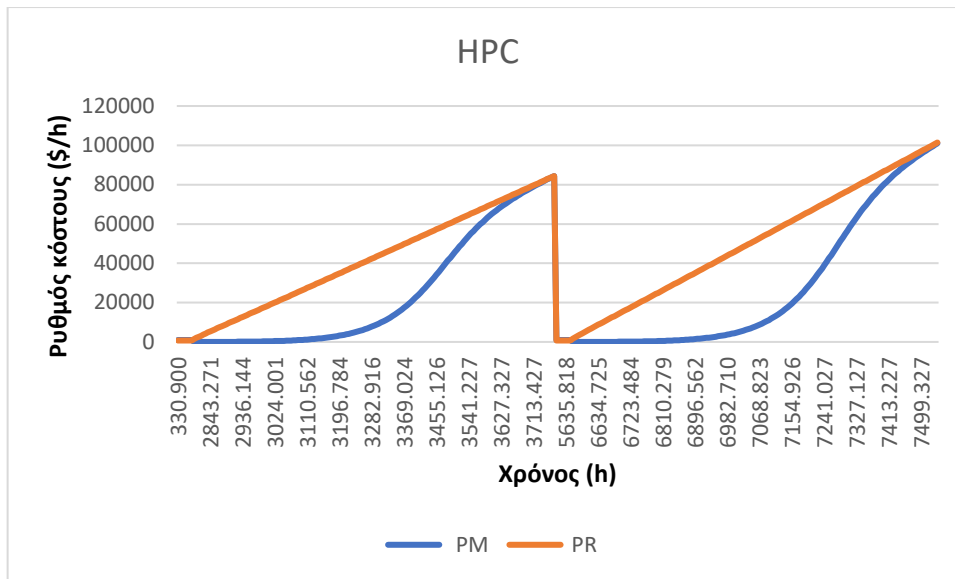
Σχήμα 14: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0$

Το **Σχήμα 15** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης (LPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Οι 2 ενέργειες που προγραμματίζονται εντός του ορίζοντα προγραμματισμού είναι ενέργειες ανανέωσης και προγραμματίζονται στις χρονικές στιγμές  $t_{21}, t_{198}$ . Αυτό φαίνεται διότι ο ρυθμός κόστους ανανέωσης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της συντήρησης. Ενδέχεται για μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού ο ρυθμός κόστους ανανέωσης να ξεπεράσει αυτόν της συντήρησης και έτσι να προγραμματιστεί κάποια συντήρηση.



**Σχήμα 15: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας χαμηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0$**

Το **Σχήμα 16** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC) σε κάθε χρονική στιγμή οπού συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Προκύπτουν δύο σύνολα διαδοχικών ενεργειών ανανέωσης. Το σύνολο με τις χρονικές στιγμές ( $t_2, t_5, t_8, t_{11}, t_{13}, t_{16}, t_{19}$ ) και το σύνολο των χρονικών στιγμών ( $t_{177}, t_{180}, t_{183}, t_{185}, t_{188}, t_{191}, t_{194}, t_{196}$ ). Ανάμεσα στις ενέργειες ανανέωσης που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές  $t_{19}$  και  $t_{196}$  προγραμματίζονται 156 ενέργειες συντήρησης και σε 2 διακοπές δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια. Αυτό που παρατηρείται στο **Σχήμα 16** είναι πως αρχικά ο ρυθμός κόστους μίας ανανέωσης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο μία συντήρησης. Για αυτό τον λόγο προγραμματίζονται ενέργειες ανανέωσης, μειώνεται ο ρυθμός κόστους μίας συντήρησης και προγραμματίζονται συντηρήσεις μέχρι όπου ο ρυθμός κόστους συντήρησης γίνει μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της ανανέωσης. Ταυτόχρονα ο ρυθμός κόστους ανανέωσης αυξάνεται ωστόσο ο ρυθμός κόστους μίας συντήρησης αυξάνεται γρηγορότερα καθώς εφαρμόζονται συντηρήσεις και περνάει ο χρόνος. Στην συνέχεια όταν ο ρυθμός κόστους συντήρησης ξεπεράσει τον αντίστοιχο της ανανέωσης τότε προγραμματίζονται πάλι ανανεώσεις, μειώνονται οι ρυθμοί κόστους ανανέωσης και συντήρησης και η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή.



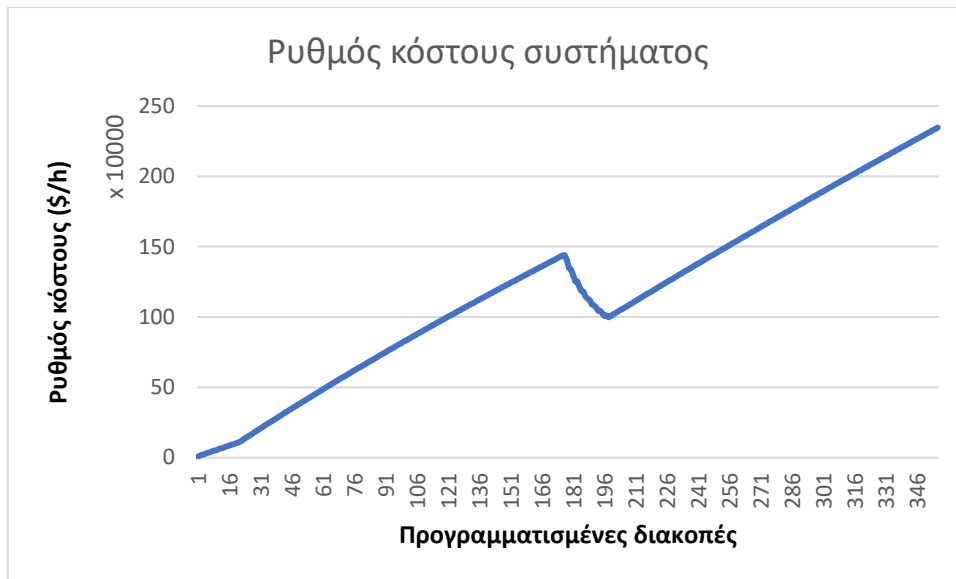
**Σχήμα 16: Ρυθμός κόστους Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0$**

Το **Σχήμα 17** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του χρόνου που διαρκεί ο ορίζοντας προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή του χρόνου. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή για την χρονική στιγμή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή τις χρονικές στιγμές  $t_{179}, t_{180}, t_{181}, t_{182}, t_{183}, t_{184}, t_{185}, t_{186}, t_{187}, t_{188}, t_{189}, t_{190}, t_{191}, t_{192}, t_{193}, t_{194}, t_{195}, t_{196}, t_{197}$  προγραμματίζονται ενέργειες ανανέωσης στο στοιχείο για το οποίο και συνέβη η προγραμματισμένη διακοπή.



**Σχήμα 17: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει του χρόνου για  $\Delta P_k = 0$**

Το **Σχήμα 18** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των προγραμματισμένων διακοπών εντός οριζόντα προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των προγραμματισμένων διακοπών εντός του οριζόντα προγραμματισμού. Είναι αναμενόμενο εφόσον σε μεγαλύτερο οριζόντα προγραμματισμού προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές και όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 17** μεγαλύτερος οριζόντας προγραμματισμού σημαίνει και μεγαλύτερος ρυθμός κόστους συστήματος. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή των προγραμματισμένων διακοπών. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον αριθμό των προγραμματισμένων διακοπών εντός του οριζόντα προγραμματισμού και άρα με την διάρκεια του οριζόντα προγραμματισμού, σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκαν οι διακοπές  $n = 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197$  είναι ενέργεια ανανέωσης.



**Σχήμα 18: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει αριθμού των προγραμματισμένων διακοπών για  $\Delta P_k = 0$**

Στον **Πίνακα 7**, δίνονται τα αποτελέσματα από την αλγοριθμική διαδικασία και τις στρατηγικές για τις διάφορες τιμές του  $\Delta P_k$  στον χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού (1522.7382 h), όπως προαναφέρθηκε. Η αλγοριθμική διαδικασία βελτιστοποιεί το πρόγραμμα συντήρησης του συστήματος, προγραμματίζοντας διακοπές και ενέργειες στα στοιχεία του συστήματος με στόχο την μείωση του ρυθμού κόστους του κάθε στοιχείου. Ο **Πίνακας 7** δίνει την δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και άντλησης συμπερασμάτων μεταξύ των διαφορετικών τιμών του  $\Delta P_k$ . Στις περιπτώσεις όπου  $\Delta P_k = 1$  και  $\Delta P_k = 0$ , ο αριθμός ενεργειών ανά διακοπή είναι ακριβής τιμή και όχι μέση, το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των ευκαιριακών ενεργειών. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$ , ο αριθμός ενεργειών συντήρησης και ο αριθμός ενεργειών ανανέωσης είναι ακριβής τιμή και όχι μέση. Το 66.67% των ενεργειών που υφίστανται τα στοιχεία στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  είναι ευκαιριακές ενέργειες. Το 1.69% των ενεργειών που υφίστανται τα στοιχεία στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  είναι ευκαιριακές ενέργειες. Το 100% των ενεργειών που υφίστανται τα στοιχεία στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  είναι μη ευκαιριακές ενέργειες. Σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των αποτελεσμάτων παίζουν και οι τιμές των παραμέτρων των εκθετικών κατανομών που περιγράφουν την υποβάθμιση κάθε στοιχείου και αυτό ενδεχομένως να εξηγεί για ποιο λόγο σε ορισμένες περιπτώσεις ισχύει  $avg\ wtime_s < avg\ stime_s$ .

**Πίνακας 7: Αποτελέσματα αλγοριθμικής διαδικασίας**

$\Delta P_k$	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>0</b>
$t_{lastn} (h)$	1515.538	1522.460	1469.251
$n$	182	116	11
$avg\ wtime_s (h)$	0.979	5.157	112.299
$avg\ cost_s (\$)$	587803366.5142	362625245.0803	36903544.9610
$avg\ cost\ rate_s (\frac{\$}{h})$	555900.3728	394553.7390	35067.7780
$avg\ stime_s (h)$	7.388	7.987	25.894
$avg\ PM_s$	2.989	0.974	0
$avg\ PR_s$	0.011	0.043	1
$avg\ M_s$	3	1.017	1
$sum\ opp_s$	364	2	0
$avg\ opp_s$	2	0.017	0
$sum\ M_s$	546	118	11
$sum\ no\ opp_s$	182	116	11
$n_{HPT}$	16	114	7
$sum\ M_{HPT}$	182	116	7
$sum\ PM_{HPT}$	181	113	0
$sum\ PR_{HPT}$	1	3	7
$sum\ noM_{HPT}$	0	0	4
$n_{LPT}$	18	0	0
$sum\ M_{LPT}$	182	0	0
$sum\ PM_{LPT}$	182	0	0
$sum\ PR_{LPT}$	0	0	0
$sum\ noM_{LPT}$	0	116	11
$n_{HPC}$	148	2	4
$sum\ M_{HPC}$	182	2	4
$sum\ PM_{HPC}$	181	0	0
$sum\ PR_{HPC}$	1	2	4
$sum\ noM_{HPC}$	0	114	7

**Σύνολο των διακοπών που προγραμματίζονται κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού ( $n$ )**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται πολύ λιγότερες διακοπές από τις αντίστοιχες περιπτώσεις των υπολοίπων  $\Delta P_k$ . Αντίστοιχα για  $\Delta P_k = 0.5$  προγραμματίζονται λιγότερες διακοπές από ότι για  $\Delta P_k = 1$ . Αυτό δεν είναι αναμενόμενο καθώς η λογική θα έλεγε πως λιγότερες ενέργειες ανά διακοπή οδηγούν σε περισσότερες διακοπές στον ορίζοντα προγραμματισμού. Η αναλυτική εξήγηση του συγκεκριμένου φαινομένου δίνεται στην παράγραφο 4.3.

**Μέσος χρόνος λειτουργίας του συστήματος ανάμεσα στις διακοπές κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού ( $avg\ wtime_s$ )**

Ο μέσος χρόνος λειτουργίας για  $\Delta P_k = 0$  είναι κατά πολύ μεγαλύτερος, εφόσον προγραμματίζει λιγότερες διακοπές. Αντίστοιχα και για  $\Delta P_k = 0.5$  ο μέσος χρόνος λειτουργίας είναι μεγαλύτερος από το αντίστοιχο για  $\Delta P_k = 1$ .

### **Μέσο κόστος ανά διακοπή του συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (*avg cost<sub>s</sub>*)**

Το μέσο κόστος ανά διακοπή του συστήματος στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$ , είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα κόστη των υπολοίπων  $\Delta P_k$ . Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και περισσότερες ενέργειες ανά διακοπή. Αντίστοιχα και για  $\Delta P_k = 0.5$  το μέσο κόστος ανά διακοπή είναι μεγαλύτερο από αυτό για  $\Delta P_k = 0$ .

### **Μέσος ρυθμός κόστους διακοπής του συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (*avg cost rate<sub>s</sub>*)**

Ο μέσος ρυθμός κόστους διακοπής του συστήματος στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τους αντίστοιχους ρυθμούς των υπολοίπων  $\Delta P_k$ . Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και περισσότερες ενέργειες ανά διακοπή. Αντίστοιχα και για  $\Delta P_k = 0.5$  ο μέσος ρυθμός κόστους ανά διακοπή είναι μεγαλύτερος από αυτό για  $\Delta P_k = 0$ .

### **Μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής του συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (*avg stime<sub>s</sub>*)**

Ο μέσος χρόνος διάρκειας διακοπής της λειτουργίας για  $\Delta P_k = 0$  είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των υπολοίπων  $\Delta P_k$ . Ο μέσος χρόνος διάρκειας διακοπής της λειτουργίας για  $\Delta P_k = 0.5$  είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για  $\Delta P_k = 1$ . Ωστόσο αν και για  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται περισσότερες ενέργειες ανά διακοπή ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής λειτουργίας εξαρτάται από την διάρκεια των ενεργειών ανά διακοπή περισσότερο από ότι τον αριθμό των ενεργειών ανά διακοπή. Εφόσον για  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται μόνο ενέργειες ανανέωσης, οι οποίες διαρκούν περισσότερο από τις ενέργειες συντήρησης που προγραμματίζονται για τα υπόλοιπα  $\Delta P_k$ , τότε είναι λογικό να καταγραφεί μεγαλύτερος μέσος χρόνος διάρκειας

της διακοπής λειτουργίας του συστήματος για  $\Delta P_k = 0$ . Αντίστοιχα, ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής για  $\Delta P_k = 0.5$  είναι μεγαλύτερος από αυτόν για  $\Delta P_k = 1$ , διότι για  $\Delta P_k = 0.5$  προγραμματίζονται περισσότερες ενέργειες ανανέωσης από ότι για  $\Delta P_k = 1$ .

#### **Μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης σε κάθε διακοπή κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού (*avg PM<sub>s</sub>*)**

Ο μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης σε κάθε διακοπή είναι μεγαλύτερος για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  από ότι των υπολοίπων περιπτώσεων  $\Delta P_k$ . Για  $\Delta P_k = 0$  δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια συντήρησης.

#### **Μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης σε κάθε διακοπή κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού (*avg PR<sub>s</sub>*)**

Ο μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης σε κάθε διακοπή είναι μεγαλύτερος για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  από ότι των υπολοίπων περιπτώσεων  $\Delta P_k$ . Κάθε ενέργεια που προγραμματίζεται για  $\Delta P_k = 0$  είναι ενέργεια ανανέωσης άρα σε κάθε διακοπή θα συμβαίνει ακριβώς μία ενέργεια ανανέωσης. Εδώ διαφαίνεται γιατί ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής είναι μεγαλύτερος για  $\Delta P_k = 0$ , εφόσον σε κάθε στοιχείο η διάρκεια περάτωσης μίας ενέργειας ανανέωσης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μιας ενέργειας συντήρησης.

#### **Μέσος αριθμός ενεργειών σε κάθε διακοπή κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού (*avg M*)**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται από μία ενέργεια σε κάθε στοιχείο. Επομένως σε κάθε διακοπή προγραμματίζονται ακριβώς τρεις ενέργειες. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται ακριβώς μία ενέργεια.

#### **Σύνολο των ευκαιριακών ενεργειών κατά την διάρκεια του οριζοντα προγραμματισμού (*sum opp<sub>s</sub>*)**



Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  δεν προγραμματίζεται καμία ευκαιριακή ενέργεια. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται πολλές περισσότερες ευκαιριακές ενέργειες από ότι στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$ .

### **Μέσος αριθμός των ευκαιριακών ενεργειών ανά διακοπή κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (*avg opp*)**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  δεν προγραμματίζεται καμία ευκαιριακή ενέργεια. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται από μία ενέργεια σε κάθε στοιχείο άρα σε κάθε διακοπή προγραμματίζονται τρεις ενέργειες. Οι δύο εκ των οποίων είναι ευκαιριακές εφόσον η τρίτη αντιστοιχεί στο στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή.

### **Σύνολο των ενεργειών κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. (*sum M<sub>s</sub>*)**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται οι λιγότερες ενέργειες. Εφόσον για  $\Delta P_k = 0$  ο μέσος αριθμός ενεργειών ανανέωσης είναι μεγαλύτερος από αυτών των υπολοίπων  $\Delta P_k$ , είναι αναμενόμενο για  $\Delta P_k = 0$  να προγραμματίζονται οι λιγότερες ενέργειες. Αντίστοιχα για  $\Delta P_k = 1$  ο μέσος αριθμός ενεργειών συντήρησης είναι μεγαλύτερος από αυτών των υπολοίπων  $\Delta P_k$  και επομένως ο αριθμός των ενεργειών που προγραμματίζονται για  $\Delta P_k = 1$  είναι μεγαλύτερος.

### **Σύνολο των μη ευκαιριακών ενεργειών κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (*sum no opp<sub>s</sub>*)**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται οι περισσότερες μη ευκαιριακές ενέργειες. Ωστόσο το ποσοστό των ενεργειών που καλύπτουν οι ευκαιριακές ενέργειες στην περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  είναι μεγαλύτερο από των άλλων περιπτώσεων.

### **Σύνολο των διακοπών που προγραμματίστηκαν κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού για την τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (*n<sub>HPT</sub>*)**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  προγραμματίζονται πολλές περισσότερες διακοπές για κάποια ενέργεια στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης από ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις.

**Σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού ( $\text{sum } M_{\text{HPT}}$ )**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται πολλές περισσότερες ενέργειες για την τουρμπίνα υψηλής πίεσης από ότι για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

**Σύνολο των ενεργειών συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού ( $\text{sum } PM_{\text{HPT}}$ )**

Περισσότερες ενέργειες συντήρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο καταγράφονται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$ . Καμία ενέργεια συντήρησης δεν προγραμματίζεται στο συγκεκριμένο στοιχείο για  $\Delta P_k = 0$ .

**Σύνολο των ενεργειών ανανέωσης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού ( $\text{sum } PR_{\text{HPT}}$ )**

Οι περισσότερες ενέργειες ανανέωσης στο συγκεκριμένο στοιχείο καταγράφονται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$ . Οι λιγότερες ενέργειες ανανέωσης στο συγκεκριμένο στοιχείο καταγράφονται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$

**Σύνολο των διακοπών για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στην τουρμπίνα υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του προγραμματισμού ( $\text{sum } noM_{\text{HPT}}$ )**

Στις περιπτώσεις όπου  $\Delta P_k = 1$  και  $\Delta P_k = 0.5$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται κάποια ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο

**Σύνολο των διακοπών που προγραμματίστηκαν κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού για την τουρμπίνα χαμηλής πίεσης ( $n_{\text{LPT}}$ )**

Μόνο στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται διακοπές για ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο.

**Σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum  $M_{LPT}$ )**

Μόνο στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται ενέργειες για το συγκεκριμένο στοιχείο.

**Σύνολο των ενεργειών συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum  $PM_{LPT}$ )**

Εφόσον μόνο στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται ενέργειες για το συγκεκριμένο στοιχείο. Λογικό είναι μόνο στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  να προγραμματίζονται ενέργειες συντήρησης για το συγκεκριμένο στοιχείο.

**Σύνολο των ενεργειών ανανέωσης που πραγματοποιήθηκαν στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum  $PR_{HPC}$ )**

Σε καμία από τις περιπτώσεις των τιμών του  $\Delta P_k$  δεν προγραμματίζεται κάποια ενέργεια ανανέωσης στο συγκεκριμένο στοιχείο.

**Σύνολο των διακοπών για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum  $noM_{LPT}$ )**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται κάποια ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο. Στις περιπτώσεις  $\Delta P_k = 0.5$  και  $\Delta P_k = 0$  σε καμία διακοπή δεν προγραμματίζεται ενέργεια για το συγκεκριμένο στοιχείο. Στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0.5$  καταγράφονται οι περισσότερες διακοπές για τις οποίες δεν θα προγραμματιστεί καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο.

**Σύνολο των διακοπών που προγραμματίστηκαν κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού για τον συμπιεστή υψηλής πίεσης ( $n_{HPC}$ )**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  καταγράφονται οι περισσότερες προγραμματισμένες διακοπές για την εκτέλεση κάποιας ενέργειας στο συγκεκριμένο στοιχείο και μάλιστα είναι κατά πολύ μεγαλύτερος ο αριθμός των διακοπών αυτών για την περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  από τον αριθμό των αντίστοιχων διακοπών για τις υπόλοιπες τιμές του  $\Delta P_k$ .

#### **Σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum $M_{HPC}$ )**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  εντοπίζονται οι περισσότερες ενέργειες για το συγκεκριμένο στοιχείο και μάλιστα ξεπερνούν κατά πολύ τα αντίστοιχα σύνολα των διαφορετικών τιμών του  $\Delta P_k$ .

#### **Σύνολο των ενεργειών συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum $PM_{HPC}$ )**

Μόνο στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται ενέργειες συντήρησης για το συγκεκριμένο στοιχείο.

#### **Σύνολο των ενεργειών ανανέωσης που πραγματοποιήθηκαν στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum $PR_{HPC}$ )**

Στην περιπτώσή  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται οι περισσότερες ενέργειες ανανέωσης στο συγκεκριμένο στοιχείο. Μάλιστα το σύνολο των ενεργειών ανανέωσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού για το συγκεκριμένο στοιχείο για  $\Delta P_k = 0$  είναι διπλάσιο του αντίστοιχου συνόλου για  $\Delta P_k = 0.5$  και τετραπλάσιο του συνόλου για  $\Delta P_k = 1$ .

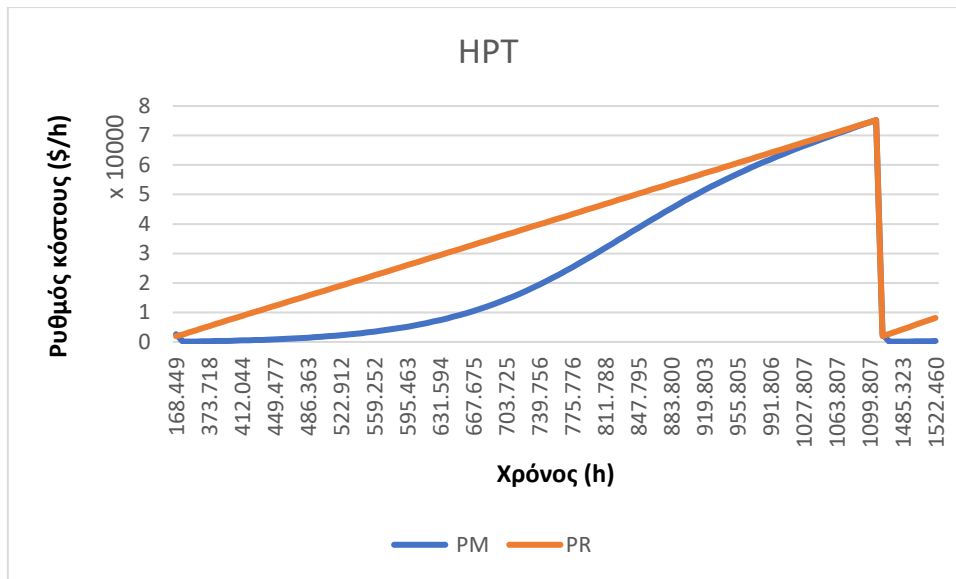
#### **Σύνολο των διακοπών για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στον συμπιεστή υψηλής πίεσης κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού (sum $noM_{HPC}$ )**

Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται κάποια ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο. Στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0.5$  καταγράφονται οι

περισσότερες διακοπές για τις οποίες δεν θα προγραμματιστεί καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο.

Τα αποτελέσματα της περίπτωσης όπου  $\Delta P_k = 1$  στον **Πίνακα 7**, είναι τα ίδια με τα αντίστοιχα του **Πίνακα 6**. Άρα τα **Σχήματα 2-8** ισχύουν και για την περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  στον **Πίνακα 7**.

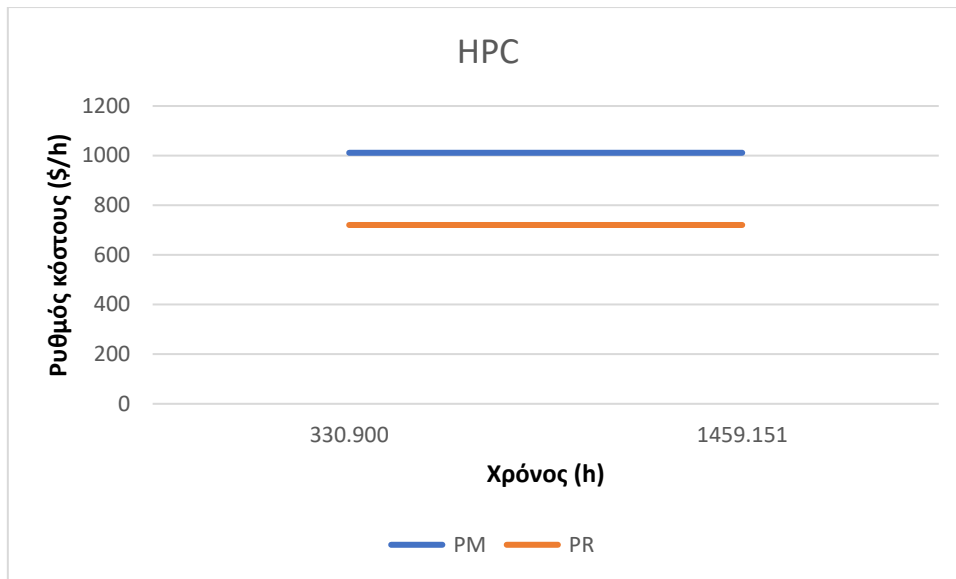
Το **Σχήμα 19** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης (HPT) σε κάθε χρονική στιγμή οπού συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Οι ενέργειες ανανέωσης είναι 3 και προγραμματίζονται για τις διακοπές με χρονικές στιγμές  $t_1, t_{107}, t_{108}$ . Οι στιγμές  $t_{107}, t_{108}$  αντιστοιχούν σε 2 διαδοχικές ενέργειες ανανέωσης. Ανάμεσα στις ενέργειες ανανέωσης που έχουν προγραμματιστεί τις χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_{107}$ , προγραμματίζονται 105 ενέργειες συντήρησης και δεν προγραμματίζονται ενέργειες για 1 διακοπή. Στο **Σχήμα 19** παρατηρείται ότι στην χρονική στιγμή  $t_1$  ο ρυθμός κόστους μίας ανανέωσης είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο μίας συντήρησης. Ο ρυθμός κόστους συντήρησης μειώνεται από την ανανέωση αλλά σταδιακά με το πέρασμα του χρόνου και των συντηρήσεων που ακολουθούν αυξάνεται. Ο ρυθμός κόστους της ανανέωσης συνεχίζει να αυξάνεται, πιο αργά ωστόσο από τον ρυθμό κόστους συντήρησης. Για αυτό λοιπόν την χρονική στιγμή  $t_{107}$  ο ρυθμός κόστους συντήρησης είναι μεγαλύτερος από αυτόν της ανανέωσης και έτσι προγραμματίζεται η επόμενη ανανέωση. Η ανανέωση της χρονικής στιγμής  $t_{107}$  μειώνει και τους ρυθμούς κόστους των δύο ενεργειών. Ωστόσο ο ρυθμός κόστους της ανανέωσης παραμένει μικρότερος και άρα στην χρονική στιγμή  $t_{108}$  προγραμματίζεται άλλη μία ενέργεια ανανέωσης. Αυτή η ανανέωση έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των ρυθμών κόστους και των δύο ενεργειών. Ο ρυθμός κόστους συντήρησης τώρα πλέον είναι μικρότερος άρα οι επόμενες ενέργειες είναι ενέργειες συντήρησης. Ωστόσο επειδή ο ρυθμός κόστους συντήρησης αυξάνεται γρηγορότερα από αυτόν της ανανέωσης είναι σίγουρο πως θα κάποια μελλοντική χρονική στιγμή θα προγραμματιστεί ανανέωση.



Σχήμα 19: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0.5$

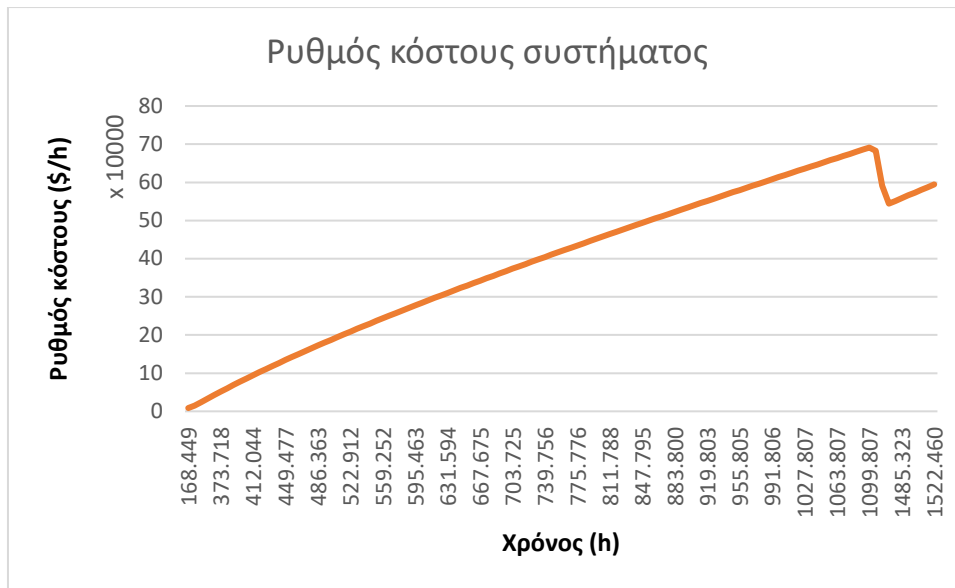
Για το στοιχείο Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης (LPT) δεν προγραμματίζεται κάποια ενέργεια στον ορίζοντα προγραμματισμού και άρα δεν κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία κάποιου σχήματος για  $\Delta P_k = 0.5$ .

Το Σχήμα 20 αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Προγραμματίζονται μόνο 2 ενέργειες και μάλιστα είναι και οι 2 ενέργειες ανανέωσης. Οι χρονικές στιγμές των ανανεώσεων αυτών είναι  $t_2$  και  $t_{109}$  ανάμεσα σε αυτές τις ενέργειες υπάρχουν 107 διακοπές για τις οποίες δεν προγραμματίστηκε καμία ενέργεια στο εν λόγω στοιχείο. Ενδεχομένως σε μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού ο ρυθμός κόστους ανανέωσης να ξεπερνούσε σε κάποια στιγμή αυτόν της συντήρησης και έτσι να προγραμματιζόταν κάποια ενέργεια συντήρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο.



**Σχήμα 20: Ρυθμός κόστους Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0.5$**

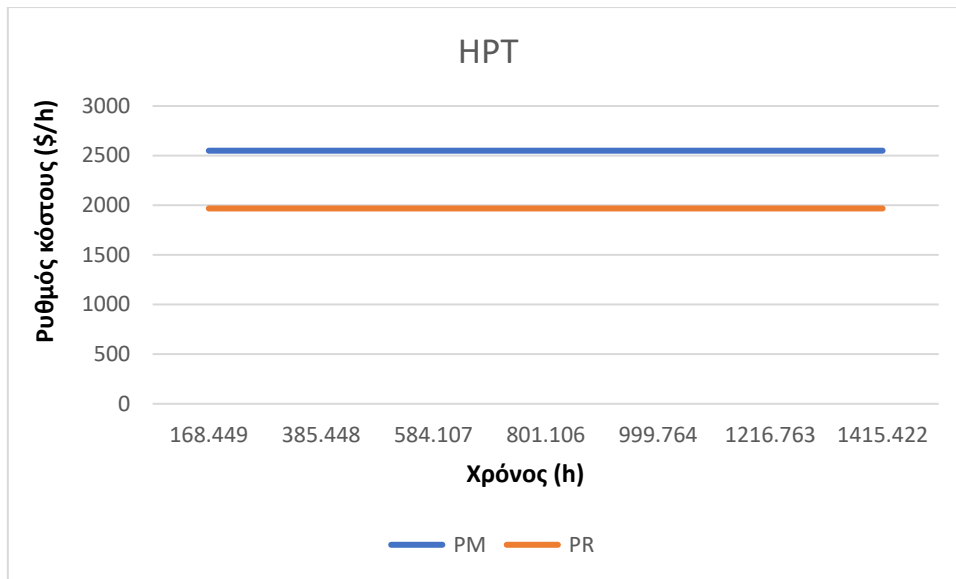
Το **Σχήμα 21** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του χρόνου που διαρκεί ο οριζόντας προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0.5$ . Παρατηρείται πως ο ρυθμός κόστους του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η διάρκεια του οριζόντα προγραμματισμού. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού κόστους αναφέρεται στο πόσο απότομη είναι η κλίση της συγκεκριμένης ευθείας με αυτή του χρόνου. Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι φθίνουσα όταν η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο, για το οποίο προγραμματίζεται η διακοπή, είναι ενέργεια ανανέωσης. Δηλαδή η ενέργεια που υφίσταται το στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε διακοπή τις χρονικές στιγμές  $t_{107}, t_{108}, t_{109}$ , είναι ενέργεια ανανέωσης.



Σχήμα 21: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει του χρόνου για  $\Delta P_k = 0.5$

Το **Σχήμα 22** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης (HPT) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Προγραμματίζονται 7 ενέργειες και κάθε ενέργεια είναι μια ενέργεια ανανέωσης. Οι χρονικές στιγμές των ενεργειών είναι :  $t_1, t_3, t_4, t_6, t_7, t_9, t_{10}$ . Ενδεχομένως σε μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού ο ρυθμός κόστους ανανέωσης να ξεπερνούσε σε κάποια στιγμή αυτόν της συντήρησης και έτσι να προγραμματιζόταν κάποια ενέργεια συντήρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο.

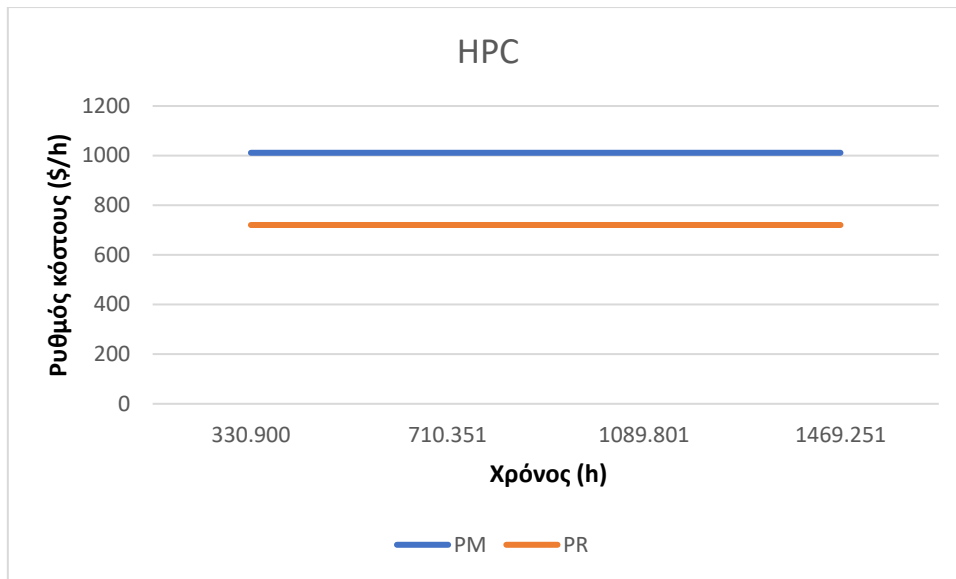




**Σχήμα 22: Ρυθμός κόστους Τουρμπίνας υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0$**

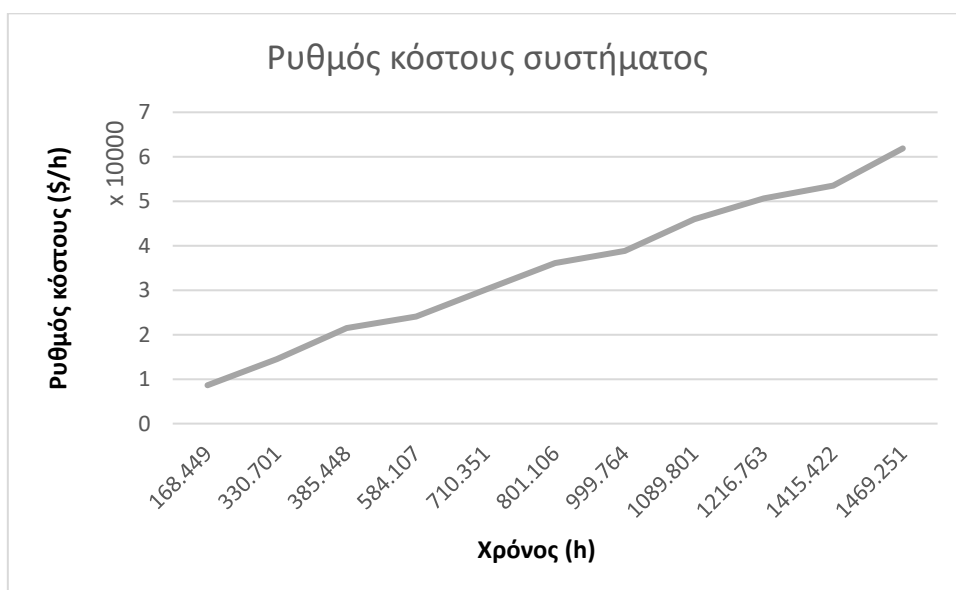
Για το στοιχείο Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης (LPT) δεν προγραμματίζεται κάποια ενέργεια στον ορίζοντα προγραμματισμού και άρα δεν κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία κάποιου σχήματος για  $\Delta P_k = 0$

Το **Σχήμα 23** αναφέρεται στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  και παρουσιάζει την σύγκρισή του ρυθμού κόστους μεταξύ των ενεργειών συντήρησης (PM) και ανανέωσής (PR) στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC) σε κάθε χρονική στιγμή όπου συμβαίνει μια προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος και επιλέγεται κάποια από τις ενέργειες (συντήρηση, ανανέωση) κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού. Προγραμματίζονται 4 ενέργειες και κάθε ενέργεια είναι μια ενέργεια ανανέωσης. Οι χρονικές στιγμές των ενεργειών είναι :  $t_2, t_5, t_8, t_{11}$ . Ενδεχομένως σε μεγαλύτερο ορίζοντα προγραμματισμού ο ρυθμός κόστους ανανέωσης να ξεπερνούσε σε κάποια στιγμή αυτόν της συντήρησης και έτσι να προγραμματιζόταν κάποια ενέργεια συντήρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο.



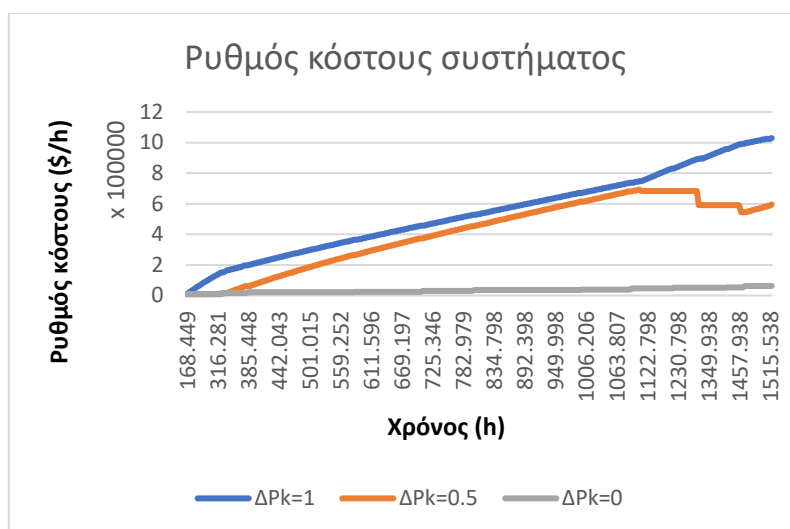
**Σχήμα 23: Ρυθμός κόστους Συμπιεστή υψηλής πίεσης για  $\Delta P_k = 0$**

Το **Σχήμα 24** δίνει την μεταβολή του ρυθμού κόστους του συστήματος συναρτήσει του χρόνου που διαρκεί ο ορίζοντας προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0$ . Αν η κλίση είναι απότομη τότε ο ρυθμός κόστους αυξάνεται πολύ γρήγορα σε συνάρτηση με τον χρόνο ενώ σκοπός της βελτιστοποίησης του ρυθμού κόστους του συστήματος είναι να γίνει πιο ομαλή αυτή η κλίση. Η ευθεία είναι πάντοτε αύξουσα παρόλο που κάθε ενέργεια που εκτελείται σε κάθε στοιχείο στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ενέργεια ανανέωσης και άρα δηλαδή δεν εκτελείται καμία ενέργεια συντήρησης εντός του ορίζοντα προγραμματισμού.



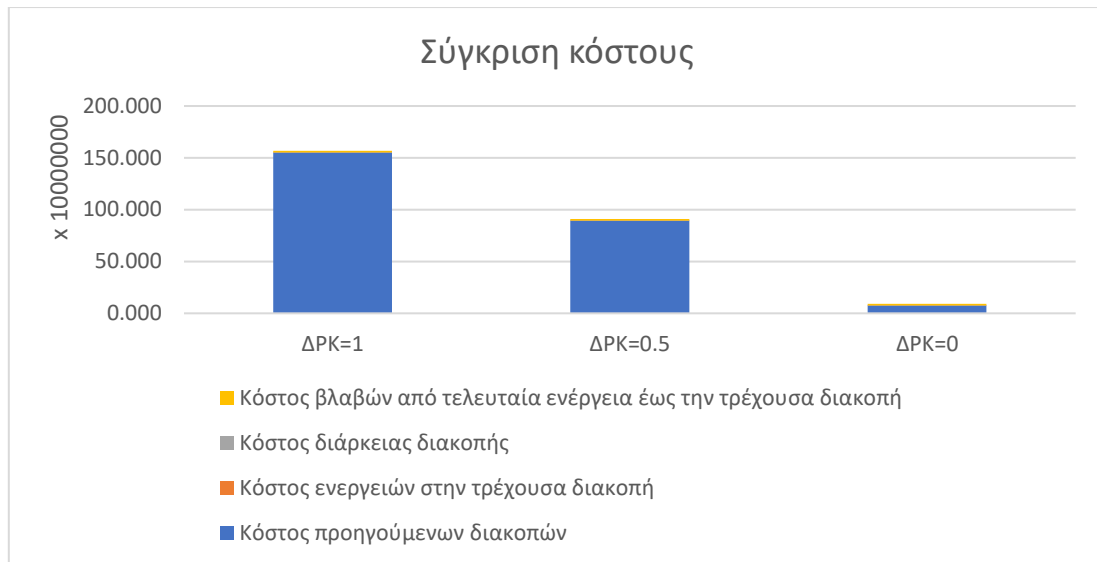
**Σχήμα 24: Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει του χρόνου για  $\Delta P_k = 0$**

Το **Σχήμα 25** συν αποτελείται από τα **Σχήματα 7,21,24**. Σκοπός του είναι να δείξει την σύγκριση των ρυθμών κόστους για τις διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  στον κοινό ορίζοντα προγραμματισμού. Παρατηρείται στο σχήμα πως ο ρυθμός κόστους είναι μεγαλύτερος για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$ , ενώ είναι μικρότερος για  $\Delta P_k = 0$ . Φαίνεται μια σταδιακή αύξηση του ρυθμού κόστους με την αύξηση του χρόνου στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$ .



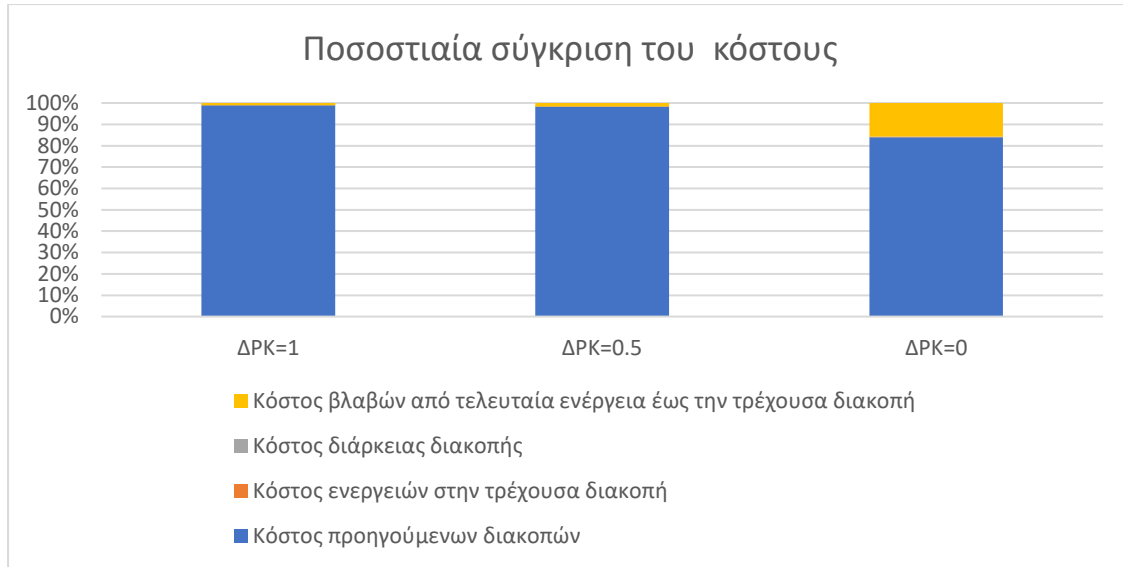
**Σχήμα 25:** Ρυθμός κόστους συστήματος συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$

Το **Σχήμα 26** συγκρίνει το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Δηλαδή δείχνει τις τιμές από τα επιμέρους κόστη που απαρτίζουν το συνολικό κόστος του συστήματος στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Φαίνεται πως το κόστος των προηγούμενων διακοπών είναι αυτό που δίνει την μεγαλύτερη τιμή, ενώ ακολουθεί το κόστος από τις βλάβες από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή. Με τα υπόλοιπα κόστη να παίζουν μικρότερο ρόλο στο συνολικό κόστος. Στο σχήμα δεν φαίνονται τα χρώματα που αντιστοιχούν στο κόστος διάρκειας της διακοπής και στο κόστος των ενεργειών της τρέχουσας διακοπής διότι οι τιμές που τους αντιστοιχούν είναι πάρα πολύ μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες στα υπόλοιπα κόστη.



**Σχήμα 26: Σύγκριση κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$**

Το **Σχήμα 27** συγκρίνει ποσοστιαία το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Δηλαδή συγκρίνει τα ποσοστά από τα επιμέρους κόστη που απαρτίζουν το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους καταλαμβάνεται από το κόστος των προηγούμενων διακοπών ενώ ακολουθεί το ποσοστό του κόστους των βλαβών στην τρέχουσα διακοπή. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  φαίνεται πως το ποσοστό του κόστους των βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων περιπτώσεων, αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  υπάρχει μεγαλύτερος αναμενόμενος αριθμός βλαβών και άρα μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης. Στο σχήμα δεν φαίνονται τα χρώματα που αντιστοιχούν στο ποσοστό του κόστους διάρκειας της διακοπής και στο ποσοστό του κόστους των ενεργειών της τρέχουσας διακοπή διότι τα ποσοστά που τους αντιστοιχούν είναι πάρα πολύ μικρά συγκριτικά με τα αντίστοιχα στα υπόλοιπα κόστη.



**Σχήμα 27: Ποσοστιαία σύγκριση κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$**

Στον **Πίνακα 8** δίνεται η ποσοστιαία ανάλυση του συνολικού κόστους διακοπής συστήματος στην τελευταία διακοπή από το **Σχήμα 27**. Παρατηρείται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα αποτελέσματα από το **Σχήμα 27** πως όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $\Delta P_k$  το ποσοστό του συνολικού κόστους της διακοπής που καλύπτει το κόστος από τις προηγούμενες διακοπές είναι μικρότερο. Είναι λογικό εφόσον για μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται λιγότερες διακοπές. Παρατηρείται πως στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  το ποσοστό του συνολικού κόστους που καλύπτει το κόστος από τις ενέργειες που πραγματοποιούνται στην τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων περιπτώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται μονάχα ενέργειες ανανέωσης και μάλιστα δεν υπάρχει καμία ευκαιριακή απόφαση άρα εφαρμόζονται μόνο ενέργειες ανανέωσης στο στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή. Μία ενέργεια ανανέωσης κοστίζει περισσότερο από μία ενέργεια συντήρησης, άρα είναι λογική η παραπάνω παρατήρηση παρόλο που για μεγαλύτερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται περισσότερες ενέργειες ανά διακοπή. Το ποσοστό του συνολικού κόστους από τις ενέργειες στην τρέχουσα διακοπή στην περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  είναι μεγαλύτερο από αυτό για  $\Delta P_k = 0.5$  για τον απλό λόγο πως στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή για  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται τρεις ενέργειες συντήρησης, μία για κάθε στοιχείο και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους. Ενώ για  $\Delta P_k = 0.5$  στην τελευταία διακοπή προγραμματίζεται μονάχα μία ενέργεια συντήρησης και καταλαμβάνει μικρότερο μέρος του συνολικού κόστους του συστήματος. Η επόμενη παρατήρηση αφορά το ποσοστό του συνολικού

κόστους που καλύπτει το κόστος διάρκειας της διακοπής, όσο μικρότερη είναι η τιμή  $\Delta P_k$  τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό που καταλαμβάνει το κόστος διάρκειας της διακοπής. Αυτό συμβαίνει διότι, στις μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  το ποσοστό των ενεργειών που προγραμματίζονται και είναι ανανεώσεις είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των μεγαλύτερων  $\Delta P_k$  και εφόσον η διάρκεια που χρειάζεται μία ενέργεια ανανέωσης για να περατωθεί είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτεί μία συντήρηση είναι λογική η παρατήρηση. Το ποσοστό του συνολικού κόστους που καταλαμβάνει το κόστος από την εμφάνιση βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερο για τις μικρότερες τιμές του  $\Delta P_k$ , αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι στις μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται λιγότερες διακοπές εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και άρα μεγαλύτερα διαστήματα ανάμεσα στις ενέργειες αυτό οδηγεί στην αύξηση του αναμενόμενου αριθμού βλαβών επομένως και στην αύξηση της πιθανότητας βλάβης καθώς και στο ποσοστό του συνολικού κόστους του συστήματος που καταλαμβάνει το κόστος εξαιτίας των βλαβών. Ακόμη ένας πιθανός λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι διότι στις μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  τα στοιχεία για τα οποία δεν προγραμματίστηκε η διακοπή δεν προγραμματίζεται εύκολά κάποια ενέργεια δηλαδή χρειάζεται η τρέχουσα αξιοπιστία τους να πλησιάσει περισσότερο την κρίσιμη αξιοπιστία τους, έτσι ώστε να προγραμματιστεί κάποια ενέργεια και εφόσον πρέπει να μειωθεί η τρέχουσα αξιοπιστία ώστε να εφαρμοστεί κάποια ενέργεια είναι λογική η αύξηση του αριθμού των αναμενόμενων βλαβών άρα και το ποσοστό του συνολικού κόστους που καταλαμβάνουν.

**Πίνακας 8: Ποσοστιαία ανάλυση του κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$**

$\Delta P_k$	1	0.5	0
Κόστος προηγούμενων διακοπών	99.029%	98.322%	84.003%
Κόστος ενεργειών στην τρέχουσα διακοπή	0.005%	0.003%	0.034%
Κόστος διάρκειας διακοπής	0.005%	0.008%	0.199%
Κόστος βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή	0.962%	1.667%	15.764%

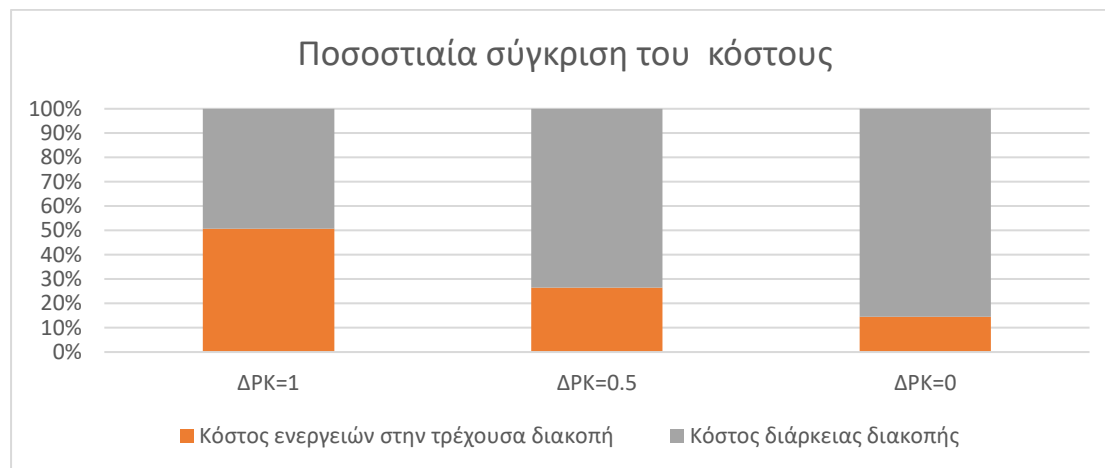
Το **Σχήμα 28** συγκρίνει ποσοστιαία το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή, έχοντας αποκλείσει το κόστος από προηγούμενες διακοπές. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται η εξάρτηση που έχει το συνολικό κόστος του συστήματος κατά την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή από τα υπόλοιπα κόστη. Μετά το κόστος των προηγούμενων διακοπών φαίνεται πως το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος εξαρτάται από το κόστος των βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή. Στο σχήμα δεν φαίνονται τα χρώματα που αντιστοιχούν στο ποσοστό του κόστους διάρκειας της διακοπής και στο ποσοστό του κόστους των ενεργειών της τρέχουσας διακοπής διότι τα ποσοστά που τους αντιστοιχούν είναι πάρα πολύ μικρά συγκριτικά με το αντίστοιχο του κόστους βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή.



**Σχήμα 28: Ποσοστιαία σύγκριση κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  χωρίς το κόστος από προηγούμενες διακοπές**

Το **Σχήμα 29** συγκρίνει ποσοστιαία το κόστος της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή, έχοντας αποκλείσει το κόστος από προηγούμενες διακοπές και το κόστος από τις βλάβες έως την τρέχουσα διακοπή. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται η εξάρτηση που έχει το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος κατά την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή από τα υπόλοιπα κόστη. Στην περίπτωση όπου

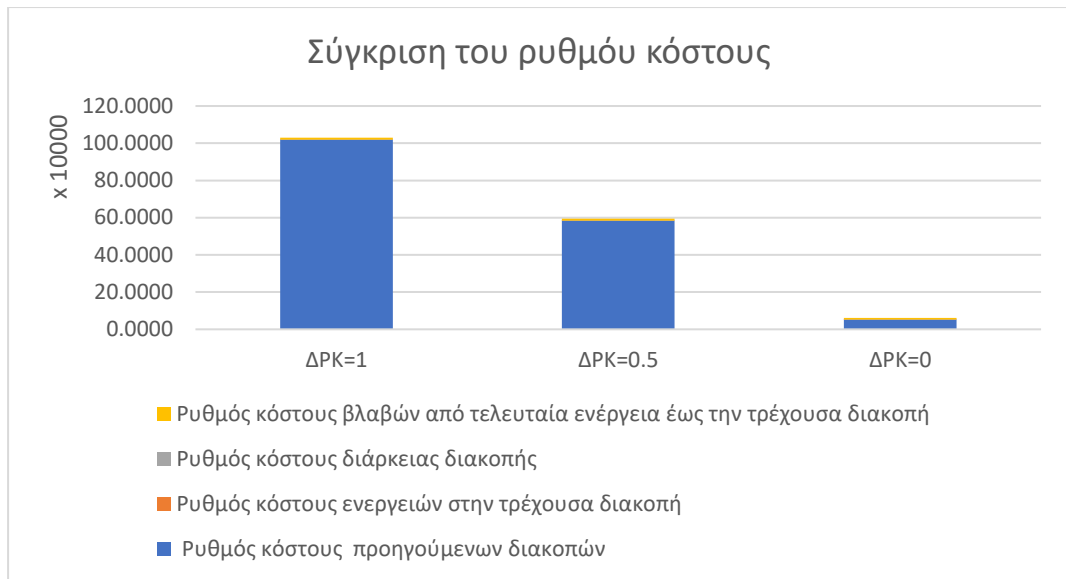
$\Delta P_k = 1$  παρατηρείται πως τα κόστη που απόμειναν επηρεάζουν ισοδύναμα το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος. Ενώ όσο μειώνεται η τιμή του  $\Delta P_k$  φαίνεται πως το κόστος διάρκειας της διακοπής επηρεάζει περισσότερο το συνολικό κόστος της διακοπής του συστήματος.



**Σχήμα 29: Ποσοστιαία σύγκριση κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  χωρίς το κόστος από προηγούμενες διακοπές και το κόστος βλαβών**

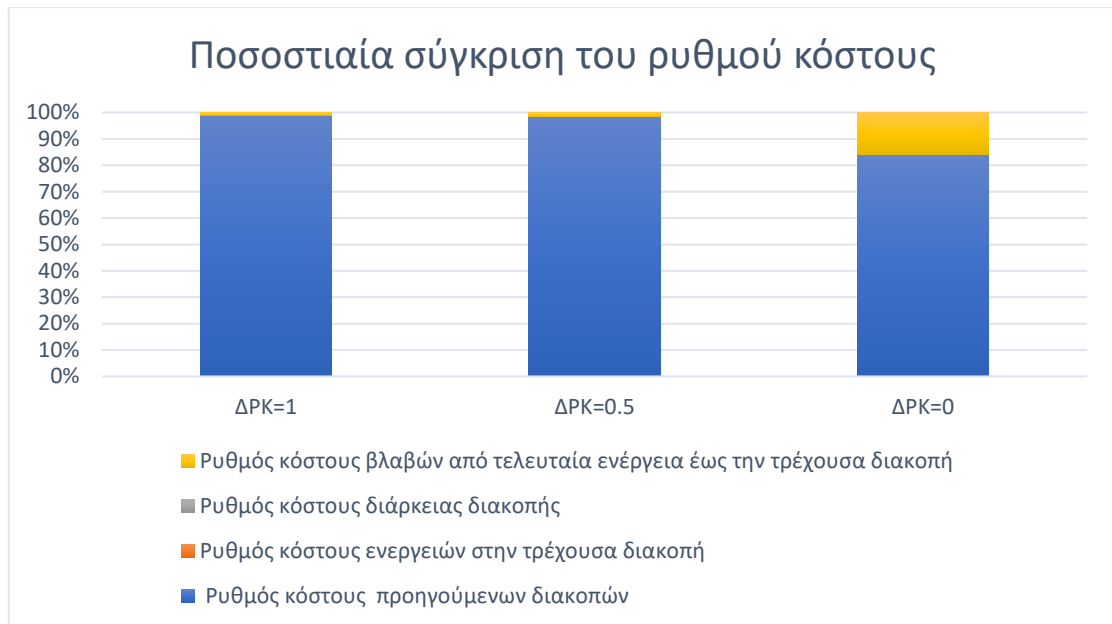
Το **Σχήμα 30** συγκρίνει τον συνολικό ρυθμό κόστους της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Δηλαδή δείχνει τις τιμές από τους επιμέρους ρυθμούς κόστους που απαρτίζουν τον συνολικό ρυθμό κόστους του συστήματος στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Φαίνεται πως ο ρυθμός κόστους των προηγούμενων διακοπών είναι αυτός που δίνει την μεγαλύτερη τιμή, ενώ ακολουθεί ο ρυθμός κόστους από τις βλάβες έως την τρέχουσα διακοπή. Με τους υπόλοιπους ρυθμούς κόστους να παίζουν μικρότερο ρόλο στον συνολικό ρυθμό κόστους. Στο σχήμα δεν φαίνονται τα χρώματα που αντιστοιχούν στον ρυθμό κόστους διάρκειας της διακοπής και στον ρυθμό κόστους των ενεργειών της τρέχουσας διακοπή διότι οι τιμές που τους αντιστοιχούν είναι πάρα πολύ μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες στους υπόλοιπους ρυθμούς κόστους.





**Σχήμα 30: Σύγκριση του ρυθμού κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$**

Το **Σχήμα 31** συγκρίνει ποσοστιαία τον συνολικό ρυθμό κόστος της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Δηλαδή συγκρίνει τα ποσοστά από τους επιμέρους ρυθμούς κόστους που απαρτίζουν τον συνολικό ρυθμό κόστους της διακοπής του συστήματος στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή. Παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους καταλαμβάνεται από τον ρυθμό κόστους των προηγούμενων διακοπών ενώ ακολουθεί το ποσοστό του ρυθμού κόστους των βλαβών στην τρέχουσα διακοπή. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  φαίνεται πως το ποσοστό του κόστους των βλαβών έως την τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων περιπτώσεων, αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  υπάρχει μεγαλύτερος αναμενόμενος αριθμός βλαβών και άρα μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης. Στο σχήμα δεν φαίνονται τα χρώματα που αντιστοιχούν στο ποσοστό του ρυθμού κόστους διάρκειας της διακοπής και στο ποσοστό του ρυθμού κόστους των ενεργειών της τρέχουσας διακοπής διότι οι τα ποσοστά που τους αντιστοιχούν είναι πάρα πολύ μικρά συγκριτικά με τα αντίστοιχα στους υπόλοιπους ρυθμούς κόστους.



**Σχήμα 31: Ποσοστιαία σύγκριση του ρυθμού κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$**

Στον **Πίνακα 9** δίνεται η ποσοστιαία ανάλυση του συνολικού ρυθμού κόστους διακοπής συστήματος από το **Σχήμα 31**. Παρατηρείται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα αποτελέσματα από το **Σχήμα 31** πως όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $\Delta P_k$  το ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους της διακοπής που καλύπτει ο ρυθμός κόστους από τις προηγούμενες διακοπές είναι μικρότερος. Είναι λογικό εφόσον για μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται λιγότερες διακοπές. Παρατηρείται πως στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  το ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους που καλύπτει ο ρυθμός κόστος από τις ενέργειες που πραγματοποιούνται στην τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των άλλων περιπτώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται μονάχα ενέργειες ανανέωσης και μάλιστα δεν υπάρχει καμία ευκαιριακή απόφαση άρα εφαρμόζονται μόνο ενέργειες ανανέωσης στο στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή. Μία ενέργεια ανανέωσης κοστίζει περισσότερο από μία ενέργεια συντήρησης, άρα είναι λογική η παραπάνω παρατήρηση παρόλο που για μεγαλύτερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται περισσότερες ενέργειες ανά διακοπή. Το ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους από τις ενέργειες στην τρέχουσα διακοπή στην περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  είναι μεγαλύτερο από αυτό για  $\Delta P_k = 0.5$  για τον απλό λόγο πως στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή για  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται τρεις ενέργειες συντήρησης, μία για κάθε στοιχείο και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού ρυθμού κόστους του συστήματος, έναντι στο αντίστοιχο μέρος που καταλαμβάνει η μια συντήρηση που προγραμματίζεται

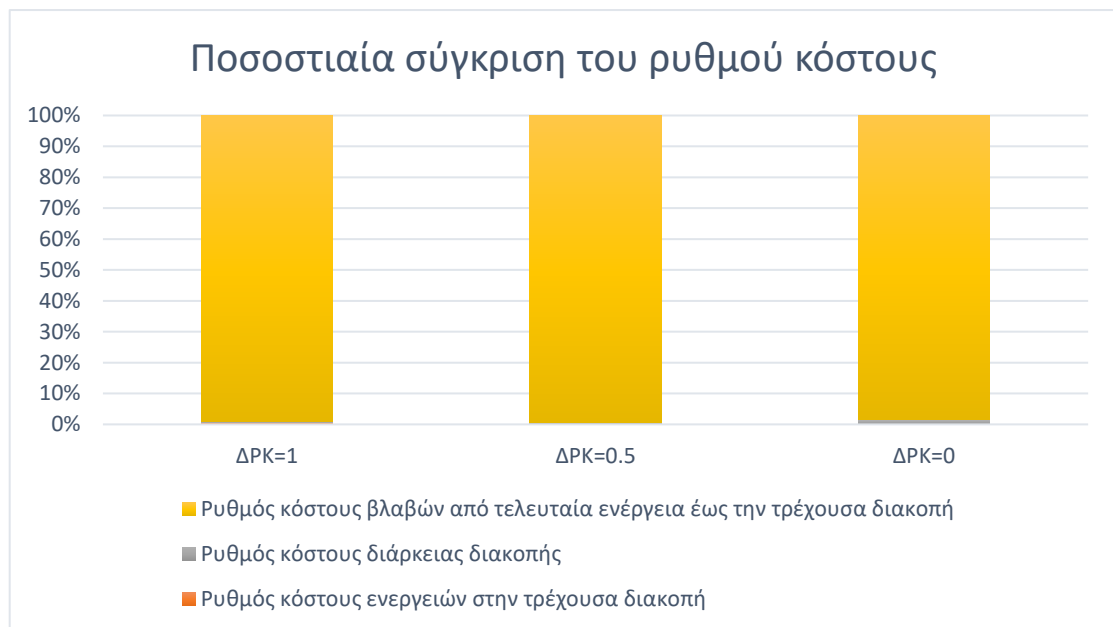
στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0.5$ . Η επόμενη παρατήρηση αφορά το ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους που καλύπτει ο ρυθμός κόστους διάρκειας της διακοπής, όσο μικρότερη είναι η τιμή  $\Delta P_k$  τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό που καταλαμβάνει ο ρυθμός κόστους διάρκειας της διακοπής. Αυτό συμβαίνει διότι, στις μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  το ποσοστό των ενεργειών που προγραμματίζονται και είναι ανανεώσεις είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των μεγαλύτερων  $\Delta P_k$  και εφόσον η διάρκεια που χρειάζεται μία ενέργεια ανανέωσης για να περατωθεί είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτεί μία συντήρηση είναι λογική η παρατήρηση. Το ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους που καταλαμβάνει ο ρυθμός κόστους από την εμφάνιση βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερο για τις μικρότερες τιμές του  $\Delta P_k$ , αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι στις μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται λιγότερες διακοπές εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και άρα μεγαλύτερα διαστήματα ανάμεσα στις ενέργειες αυτό οδηγεί στην αύξηση του αναμενόμενου αριθμού βλαβών επομένως και στην αύξηση της πιθανότητας βλάβης καθώς και στο ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους του συστήματος που καταλαμβάνει ο ρυθμός κόστος εξαιτίας των βλαβών. Ακόμη ένας πιθανός λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι διότι στις μικρότερες τιμές  $\Delta P_k$  τα στοιχεία για τα οποία δεν προγραμματίστηκε η διακοπή δεν προγραμματίζεται εύκολα κάποια ενέργεια δηλαδή χρειάζεται η τρέχουσα αξιοπιστία τους να πλησιάσει περισσότερο την κρίσιμη αξιοπιστία τους, έτσι ώστε να προγραμματιστεί κάποια ενέργεια και εφόσον πρέπει να μειωθεί η τρέχουσα αξιοπιστία ώστε να εφαρμοστεί κάποια ενέργεια είναι λογική η αύξηση του αριθμού των αναμενόμενων βλαβών άρα και το ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους που καταλαμβάνουν.

**Πίνακας 9: ποσοστιαία ανάλυση του ρυθμού κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$**

$\Delta P_k$	1	0.5	0
Ρυθμός κόστους προηγούμενων διακοπών	99.029%	98.322%	84.003%
Ρυθμός κόστους ενεργειών στην τρέχουσα διακοπή	0.005%	0.003%	0.034%
Ρυθμός κόστους διάρκειας διακοπής	0.005%	0.008%	0.199%
Ρυθμός κόστους βλαβών από την	0.962%	1.667%	15.764%

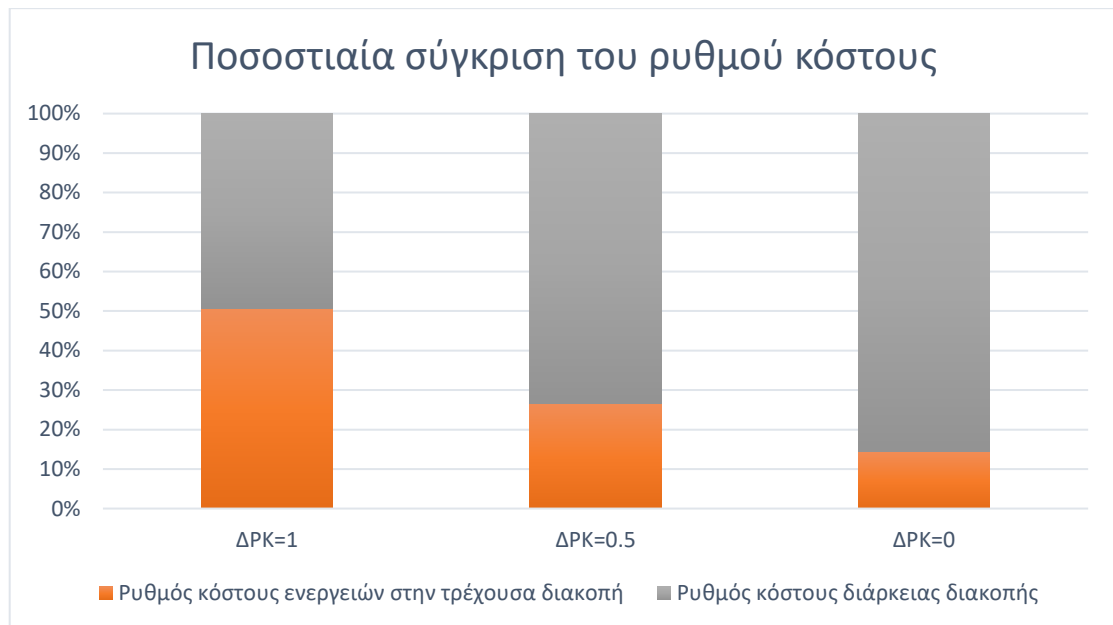
τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή			
---	--	--	--

Το **Σχήμα 32** συγκρίνει ποσοστιαία τον ρυθμό κόστους της τελευταίας διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή, έχοντας αποκλείσει τον ρυθμό κόστους από προηγούμενες διακοπές. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται η εξάρτηση που έχει ο συνολικός ρυθμός κόστος του συστήματος κατά την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή από τους υπόλοιπους ρυθμούς κόστους. Μετά τον ρυθμό κόστους των προηγούμενων διακοπών φαίνεται πως ο συνολικός ρυθμός κόστους της διακοπής του συστήματος εξαρτάται από τον ρυθμό κόστους των βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή. Στο σχήμα δεν φαίνονται τα χρώματα που αντιστοιχούν στο ποσοστό του ρυθμού κόστους διάρκειας της διακοπής και στο ποσοστό του ρυθμού κόστους των ενεργειών της τρέχουσας διακοπής διότι τα ποσοστά που τους αντιστοιχούν είναι πάρα πολύ μικρά συγκριτικά με το αντίστοιχο του ρυθμού κόστους των βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή.



**Σχήμα 32: Ποσοστιαία σύγκριση του ρυθμού κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  χωρίς τον ρυθμό κόστους από προηγούμενες διακοπές**

Το **Σχήμα 33** συγκρίνει ποσοστιαία τον ρυθμό κόστους της διακοπής του συστήματος ως προς την σύνθεση του για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  για την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή, έχοντας αποκλείσει τον ρυθμό κόστους από προηγούμενες διακοπές και τον ρυθμό κόστους των βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται η εξάρτηση που έχει ο συνολικός ρυθμός κόστους της διακοπής του συστήματος κατά την τελευταία προγραμματισμένη διακοπή από τους υπόλοιπους ρυθμούς κόστους. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  παρατηρείται πως οι ρυθμοί κόστους που απόμειναν επηρεάζουν ισοδύναμα τον συνολικό ρυθμό κόστους της διακοπής του συστήματος. Ενώ όσο μειώνεται η τιμή του  $\Delta P_k$  φαίνεται πως ο ρυθμός κόστους διάρκειας της διακοπής επηρεάζει περισσότερο τον συνολικό ρυθμό κόστους της διακοπής του συστήματος.



**Σχήμα 33: Ποσοστιαία σύγκριση του ρυθμού κόστους συστήματος για διαφορετικές τιμές  $\Delta P_k$  χωρίς τον ρυθμό κόστους από προηγούμενες διακοπές και τον ρυθμό κόστους βλαβών**

### 4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Αναμενόμενο ήταν πως λιγότερες ενέργειες ανά διακοπή θα σηματοδοτούσε και μεγαλύτερο αριθμό διακοπών στον ορίζοντα προγραμματισμού. Ωστόσο παρατηρήθηκε πως στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές από ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις του  $\Delta P_k$ . Μάλιστα στην περίπτωση

όπου  $\Delta P_k = 0$  η οποία προγραμματίζει τις λιγότερες ενέργειες ανά διακοπή αντιστοιχεί τον μικρότερο αριθμό διακοπών στον ορίζοντα προγραμματισμού. Αυτό συμβαίνει διότι, κάθε ενέργεια που προγραμματίζεται για την περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  είναι ενέργεια ανανέωσης και άρα το στοιχείο που υφίσταται την ανανέωση επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και απαιτεί περισσότερο χρόνο ώστε να χρειαστεί κάποια ενέργεια σε σύγκριση με τις περιπτώσεις για  $\Delta P_k = 1$  και  $\Delta P_k = 0.5$  στις οποίες προγραμματίζονται κυρίως ενέργειες συντήρησης και τα στοιχεία δεν επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση και απαιτούν λιγότερο χρόνο ώστε να χρειαστούν ξανά κάποια ενέργεια. Αυτό παρατηρείται και στην σύγκριση μεταξύ της περίπτωσης  $\Delta P_k = 0.5$  και της  $\Delta P_k = 1$ . Όπου για  $\Delta P_k = 0.5$  το 95.76% των ενεργειών που προγραμματίζονται είναι ενέργειες συντήρησης και το 4.24% είναι ενέργειες ανανέωσης. Ενώ για  $\Delta P_k = 1$  το 99.63% των ενεργειών που προγραμματίζονται είναι ενέργειες συντήρησης ενώ το 0.37% είναι ενέργειες ανανέωσης. Άρα είναι λογικό που παρατηρείται πως ο αριθμός των προγραμματισμένων διακοπών εντός του ορίζοντα προγραμματισμού για  $\Delta P_k = 0.5$  είναι μικρότερος του αντίστοιχου για  $\Delta P_k = 1$ .

Όσο αφορά τις ευκαιριακές ενέργειες στην κάθε περίπτωση  $\Delta P_k$ . Παρατηρείται πως στην περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  το 66.67% των ενεργειών που προγραμματίζονται είναι ευκαιριακές ενέργειες. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  το ποσοστό των ευκαιριακών ενεργειών που προγραμματίζονται είναι το 1.69% των συνολικών ενεργειών που προγραμματίζονται εντός του ορίζοντα προγραμματισμού. Ενώ για  $\Delta P_k = 0$  το ποσοστό αυτό μηδενίζεται και όλες οι ενέργειες που προγραμματίζονται είναι μη ευκαιριακές αυτό δηλαδή σημαίνει πως σε κάθε προγραμματισμένη διακοπή εκτελείται κάποια ενέργεια μονάχα στο στοιχείο για το οποίο και προγραμματίστηκε η συγκεκριμένη διακοπή.

Εξετάζεται ποσοστιαία ο χρόνος που αντιστοιχεί στην λειτουργία και στην διακοπή-συντήρηση του συστήματος εντός του ορίζοντα προγραμματισμού. Για  $\Delta P_k = 0$  το 83% της διάρκειας του ορίζοντα προγραμματισμού το σύστημα λειτουργεί ενώ το 17% βρίσκεται σε συντήρηση. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  το 39% της διάρκειας του ορίζοντα προγραμματισμού το σύστημα λειτουργεί ενώ το 61% βρίσκεται σε συντήρηση. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  το 12% της διάρκειας του ορίζοντα προγραμματισμού το σύστημα λειτουργεί ενώ το 88% βρίσκεται σε συντήρηση. Αυτό συμβαίνει διότι μεγαλύτερη τιμή του  $\Delta P_k$  οδηγεί σε μεγαλύτερο συνολικό αριθμό ενεργειών συντήρησης και σε μεγαλύτερο αριθμό προγραμματισμένων διακοπών εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και άρα σε μεγαλύτερο ποσοστό διάρκειας διακοπής.

Παρατηρήθηκε πως το μέσο κόστος ανά διακοπή του συστήματος κατά την διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού καθώς και ο μέσος ρυθμός κόστους διακοπής του συστήματος εντός του ορίζοντα προγραμματισμού είναι μεγαλύτερα για  $\Delta P_k = 1$  διότι προγραμματίζονται περισσότερες ενέργειες σε μία διακοπή και περισσότερες διακοπές εντός του ορίζοντα. Ωστόσο ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής για την περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  είναι ο μικρότερος ενώ παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό χρόνου διακοπής όσο αφορά τον ορίζοντα προγραμματισμού.

Ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής της λειτουργίας για  $\Delta P_k = 0$  είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με τον αντίστοιχο των άλλων περιπτώσεων. Διότι όλες οι ενέργειες που προγραμματίζονται για  $\Delta P_k = 0$  είναι ενέργειες ανανέωσης και οι ενέργειες ανανέωσης διαρκούν περισσότερο από τις ενέργειες συντήρησης. Το ίδιο συμβαίνει και για τον μέσο χρόνο διάρκειας της διακοπής για τις περιπτώσεις  $\Delta P_k = 0.5$  και  $\Delta P_k = 1$ . Όπου αντίστοιχα, ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής για  $\Delta P_k = 0.5$  είναι μεγαλύτερος από αυτόν για  $\Delta P_k = 1$  διότι για  $\Delta P_k = 0.5$  το ποσοστό των ενεργειών ανανέωσης είναι μεγαλύτερο από ότι το αντίστοιχο για  $\Delta P_k = 1$ . Παρατηρείται πως ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής της λειτουργίας εξαρτάται περισσότερο από το ποσοστό των ενεργειών που είναι ανανεώσεις και ποσοστό των ενεργειών που είναι συντηρήσεις παρά από τον αριθμό των προγραμματισμένων διακοπών.

Όσο αφορά τα στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 1$  το 81.32% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης, το 9.89% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στην τουρμπίνα χαμηλής πίεσης και το 8.79% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης. Εφόσον για  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται ενέργειες για κάθε στοιχείο σε κάθε διακοπή, μπορεί να ειπωθεί πως η Τουρμπίνα υψηλής πίεσης ευεργετείται περισσότερο των ευκαιριακών ενεργειών ενώ ακολουθεί η Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης και έπειτα ο Συμπιεστής υψηλής πίεσης. Πιο συγκεκριμένα για 91.21% των διακοπών του συστήματος προγραμματίζεται ευκαιριακή ενέργεια στο στοιχείο Τουρμπίνα υψηλής πίεσης, για 90.11% των διακοπών του συστήματος προγραμματίζεται ευκαιριακή ενέργεια στο στοιχείο Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης και για 18.68% των διακοπών του συστήματος προγραμματίζεται ευκαιριακή ενέργεια στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0.5$  το 98.28% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης, το 1.72% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στον Συμπιεστή

υψηλής πίεσης και καμία από τις προγραμματισμένες διακοπές δεν συνέβη για κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Εφόσον στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια για  $\Delta P_k = 0.5$  τότε το συγκεκριμένο στοιχείο δεν ευεργετείται από κάποια ευκαιριακή ενέργεια. Για τον Συμπιεστή υψηλής πίεσης το 98.28% των διακοπών του συστήματος αντιστοιχούν σε ευκαιριακή ενέργεια και για την Τουρμπίνα υψηλής πίεσης το 1.72% των διακοπών του συστήματος αντιστοιχούν σε ευκαιριακή ενέργεια. Στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  το 63.64% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα υψηλής πίεσης, το 36.36% των προγραμματισμένων διακοπών συνέβησαν για κάποια ενέργεια στον Συμπιεστή υψηλής πίεσης και καμία προγραμματισμένη διακοπή δεν συνέβη για κάποια ενέργεια στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης. Εφόσον στην Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια για  $\Delta P_k = 0$  τότε το συγκεκριμένο στοιχείο δεν ευεργετείται από κάποια ευκαιριακή ενέργεια. Για τον Συμπιεστή υψηλής πίεσης το 36.36% των διακοπών του συστήματος αντιστοιχούν σε ευκαιριακή ενέργεια και για την Τουρμπίνα υψηλής πίεσης το 63.64% των διακοπών του συστήματος αντιστοιχούν σε ευκαιριακή ενέργεια Παρατηρείται πως το στοιχείο το οποίου οι παράμετροι των εκθετικών που περιγράφουν την διάρκεια των σταδίων υποβάθμισής του και έχουν τις μικρότερες τιμές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των άλλων στοιχείων, στις περιπτώσεις  $\Delta P_k = 0$  και  $\Delta P_k = 0.5$  δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο. Δηλαδή η Τουρμπίνα χαμηλής πίεσης φθείρεται πιο ήπια από τα άλλα στοιχεία και για αυτό στις περιπτώσεις  $\Delta P_k = 0$  και  $\Delta P_k = 0.5$  δεν προγραμματίζεται καμία ενέργεια στο συγκεκριμένο στοιχείο.

Από τον Πίνακα 8 και Πίνακα 9 φαίνεται πως οι διαφορετικές τιμές του  $\Delta P_k$  μεταβάλλουν την σύνθεση του κόστους της διακοπής συστήματος και του ρυθμού κόστους της διακοπής συστήματος εντός του ορίζοντα προγραμματισμού. Για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  ποσοστό του κόστους και το ποσοστό του ρυθμού κόστους από προηγούμενες διακοπές είναι μικρότερα από των άλλων περιπτώσεων. Η μείωση του  $\Delta P_k$  οδηγεί σε μείωση του ποσοστού ρυθμού κόστους και του ποσοστού κόστους από προηγούμενες διακοπές. Εφόσον για το  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται οι λιγότερες διακοπές στον ορίζοντα προγραμματισμού. Για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  ποσοστό του κόστους και το ποσοστό του ρυθμού κόστους από την περάτωση ενεργειών στην τρέχουσα διακοπή είναι μεγαλύτερα από των άλλων περιπτώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι για  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται μονάχα ενέργειες ανανέωσης και μάλιστα δεν υπάρχει καμία ευκαιριακή απόφαση άρα εφαρμόζονται μόνο ενέργειες ανανέωσης στο στοιχείο για το οποίο προγραμματίστηκε η διακοπή. Μία ενέργεια ανανέωσης κοστίζει περισσότερο από μία ενέργεια συντήρησης επομένως είναι λογικό



το συγκεκριμένο ποσοστό για την περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  να είναι μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα των άλλων περιπτώσεων, παρόλο που για μεγαλύτερες τιμές  $\Delta P_k$  προγραμματίζονται περισσότερες ενέργειες ανά διακοπή. Το ποσοστό του κόστους και το ποσοστό του ρυθμού κόστους από την περάτωση ενεργειών στην τρέχουσα διακοπή για την περίπτωση  $\Delta P_k = 1$  είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα για  $\Delta P_k = 0.5$  για τον απλό λόγο πως στην τελευταία προγραμματισμένη διακοπή για  $\Delta P_k = 1$  προγραμματίζονται τρεις ενέργειες συντήρησης, μία για κάθε στοιχείο και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους και ρυθμού κόστους του συστήματος, έναντι στο αντίστοιχο μέρος που καταλαμβάνει η μία συντήρηση που προγραμματίζεται στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0.5$ . Για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  ποσοστό του κόστους και το ποσοστό του ρυθμού κόστους της διάρκειας διακοπής είναι μεγαλύτερο από των άλλων περιπτώσεων. Αυτό γιατί παρόλο που στις άλλες περιπτώσεις προγραμματίζονται περισσότερες διακοπές, για  $\Delta P_k = 0$  σε κάθε διακοπή προγραμματίζεται ενέργεια ανανέωσης και οι ενέργειες ανανέωσης διαρκούν περισσότερο από τις ενέργειες συντήρησης. Αλλιώς επειδή ο μέσος χρόνος διάρκειας της διακοπής στην περίπτωση  $\Delta P_k = 0$  είναι μεγαλύτερος από τους αντίστοιχους των άλλων περιπτώσεων, άρα το ποσοστό του κόστους της διάρκειας διακοπής και το ποσοστό του ρυθμού κόστους της διάρκειας διακοπής είναι λογικό να είναι μεγαλύτερα από αυτά των άλλων περιπτώσεων. Δηλαδή παρόλο που το ποσοστό που καταλαμβάνουν οι διακοπές στον ορίζοντα προγραμματισμού για τα  $\Delta P_k = 1$  και  $\Delta P_k = 0.5$  είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για  $\Delta P_k = 0$ , στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  το ποσοστό του κόστους της διάρκειας της διακοπής και το ποσοστό του ρυθμού κόστους της διάρκειας διακοπής είναι μεγαλύτερο διότι τα ποσοστά αυτά εξαρτώνται όπως φαίνεται από την διάρκεια των διακοπών και όχι από το ποσοστό που καταλαμβάνει αυτή στον ορίζοντα προγραμματισμού ή από τον αριθμό των διακοπών. Αυτό επαναλαμβάνεται και από την σύγκριση του ποσοστού κόστους και του ποσοστού του ρυθμού κόστους της διάρκειας της διακοπής για  $\Delta P_k = 0.5$  και  $\Delta P_k = 1$ . Για την περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  το ποσοστό του κόστους και το ποσοστό του ρυθμού κόστους εξαιτίας των βλαβών είναι μεγαλύτερο από των άλλων περιπτώσεων. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι για  $\Delta P_k = 0$  προγραμματίζονται λιγότερες διακοπές εντός του ορίζοντα προγραμματισμού και άρα μεγαλύτερα διαστήματα ανάμεσα στις ενέργειες αυτό οδηγεί στην αύξηση του αναμενόμενου αριθμού βλαβών επομένως και στην αύξηση της πιθανότητας βλάβης καθώς και στο ποσοστό του συνολικού ρυθμού κόστους του συστήματος που καταλαμβάνει ο ρυθμός κόστους εξαιτίας των βλαβών. Ακόμη ένας πιθανός λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι διότι για  $\Delta P_k = 0$  για τα στοιχεία για τα οποία δεν προγραμματίστηκε η διακοπή

δεν προγραμματίζεται εύκολα κάποια ενέργεια δηλαδή χρειάζεται η τρέχουσα αξιοπιστία τους να πλησιάσει περισσότερο την κρίσιμη αξιοπιστία τους, έτσι ώστε να προγραμματιστεί κάποια ενέργεια και εφόσον πρέπει να μειωθεί η τρέχουσα αξιοπιστία ώστε να εφαρμοστεί κάποια ενέργεια είναι λογική η αύξηση του αριθμού των αναμενόμενων βλαβών άρα και το ποσοστού του συνολικού ρυθμού κόστους που καταλαμβάνουν. Αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση όπου  $\Delta P_k = 0$  υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός αναμενόμενων βλαβών υπάρχει άρα και μεγαλύτερος κίνδυνος βλάβης.

## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται εν συντομία το έργο που αποτέλεσε η παρούσα Διπλωματική Εργασία, τα βασικά συμπεράσματά της καθώς και οι μελλοντικές προοπτικές έρευνας.

### 5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα της έρευνας

Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι η μοντελοποίηση, η ανάλυση και ο σχεδιασμός βέλτιστων στρατηγικών ευκαιριακής συντήρησης για σύστημα με στοιχεία που υπόκεινται σε πολλαπλά στάδια υποβάθμισης. Ο σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του ρυθμού κόστους του συστήματος. Το σύστημα αποτελείται από τρία επιμέρους στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά με δύο στάδια υποβάθμισης για το κάθε στοιχείο και άρα τα στοιχεία είναι ικανά να βρεθούν σε τρεις καταστάσεις. Όταν κάποιο στοιχείο βρεθεί στην τελευταία κατάσταση, δηλαδή στην κατάσταση μετά το τελευταίο επίπεδο υποβάθμισης τότε αυτό το στοιχείο θεωρείται πως βρίσκεται σε βλάβη.

Οι ενέργειες που είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε κάποιο στοιχείο είναι τρεις. Οι ενέργειες συντήρησης που συντηρούν το στοιχείο δίχως να το φέρουν στην αρχική του κατάσταση. Οι ενέργειες ανανέωσης που φέρνουν το στοιχείο στην αρχική του κατάσταση και οι ελάχιστες επισκευές οι οποίες φέρνουν το στοιχείο στην κατάσταση που βρισκόταν ακριβώς πριν την βλάβη, δίχως να επηρεάζουν την διαδικασία υποβάθμισης.

Η βασική στρατηγική εφαρμόζεται σε επίπεδο στοιχείου και επιτάσσει πως κάθε φορά που η αξιοπιστία του στοιχείου αγγίζει την κρίσιμη αξιοπιστία του, τότε εφαρμόζεται μια ενέργεια συντήρησης. Όταν ο αριθμός των ενεργειών συντήρησης σε έναν κύκλο ανανέωσης αγγίξει έναν συγκεκριμένο αριθμό τότε εφαρμόζεται μία ενέργεια ανανέωσης και με το τέλος αυτής της ενέργειας κλείνει και ο κύκλος ανανέωσης. Η βασική στρατηγική υπολογίζει το βέλτιστο στατικό πρόγραμμα συντήρησης για κάθε στοιχείο το οποίο όμως όταν ενταχθούν και οι ευκαιριακές αποφάσεις συντήρησης παύει να είναι βέλτιστο.

Η δυναμική στρατηγική εφαρμόζεται και αυτή σε επίπεδο στοιχείου και αποφασίζει σε κάθε στοιχείο για το οποίο θα εφαρμοσθεί κάποια ενέργεια σε

προγραμματισμένη διακοπή, τι είδους ενέργεια θα είναι αυτή ανάμεσα σε συντήρηση ή ανανέωση. Η δυναμική στρατηγική συγκρίνει τον ρυθμό κόστους σε περίπτωση που προγραμματιστεί ενέργεια συντήρησης έως την ανανέωση με τον ρυθμό κόστους στην περίπτωση που προγραμματιστεί ανανέωση και έπειτα επιλέγει την ενέργεια που θα εφαρμοσθεί με βάση τον μικρότερο ρυθμό κόστους.

Οι στρατηγικές αυτές συνυπάρχουν στην αλγοριθμική διαδικασία. Αρχικά υπολογίζεται το βέλτιστο στατικό πρόγραμμα κάθε στοιχείου από την βασική στρατηγική και έπειτα ξεκινάει να τρέχει η αλγοριθμική διαδικασία. Στην αλγοριθμική διαδικασία για προγραμματισμένη διακοπή του συστήματος. Αρχικά υπολογίζεται η αξιοπιστία για κάθε στοιχείο και έπειτα αποφασίζεται με την βοήθεια του κατώτατου ορίου αναλογίας αξιοπιστίας, που δίνεται από τον χρήστη, εάν στο εκάστοτε στοιχείο θα πραγματοποιηθεί κάποια ενέργεια στην προγραμματισμένη διακοπή ή όχι. Στην συνέχεια για τα στοιχεία που προγραμματίζεται κάποια ενέργεια με την βοήθεια των ημερολόγιων συντήρησης και την βοήθεια της δυναμικής στρατηγικής αποφασίζεται τι είδους ενέργεια θα είναι αυτή για το κάθε ένα στοιχείο. Έπειτα ενημερώνονται τα προγράμματα συντήρησης όλων των στοιχείων καθώς και οι καταστάσεις τους μετά την προγραμματισμένη διακοπή. Στην συνέχεια υπολογίζεται η επόμενη προγραμματισμένη διακοπή και υπολογίζεται το κόστος διακοπής του συστήματος και ο ρυθμός κόστους της διακοπής του συστήματος. Η αλγοριθμική διαδικασία υπολογίζεται για τρεις διαφορετικές τιμές του κατώτατου ορίου αναλογίας αξιοπιστίας ώστε να μελετηθεί το κόστος και ο ρυθμός κόστους της κάθε περίπτωσης και να συγκριθούν ως προς τις τιμές τους καθώς και την σύνθεση των επιμέρους που τα απαρτίζουν.

Συνοψίζοντας, όσο περισσότερες οι ευκαιριακές αποφάσεις τόσο μεγαλύτερο το συνολικό κόστος διακοπής του συστήματος καθώς και ο συνολικός ρυθμούς κόστους της διακοπής του συστήματος. Όσο περισσότερες είναι οι ευκαιριακές αποφάσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος από τις προηγούμενες διακοπές καθώς και ο ρυθμός κόστους από τις προηγούμενες διακοπές. Όσο λιγότερες είναι οι ευκαιριακές αποφάσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος διάρκειας της διακοπής καθώς και ο ρυθμός κόστους της διάρκειας της διακοπής. Όσο λιγότερες είναι οι ευκαιριακές αποφάσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή καθώς και ο ρυθμός κόστους βλαβών από την τελευταία ενέργεια έως την τρέχουσα διακοπή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την αλγοριθμική διαδικασία και τις στρατηγικές που μελετήθηκαν μπορεί να αντληθεί το συμπέρασμα πως όσο περισσότερες είναι οι ευκαιριακές αποφάσεις τόσο μεγαλύτερος ο συνολικός ρυθμός κόστους της διακοπής του συστήματος καθώς και το συνολικό

κόστος διακοπής του συστήματος, ωστόσο όσο λιγότερες είναι οι ευκαιριακές αποφάσεις τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος εμφάνισης βλάβης στο σύστημα.

## 5.2 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις

Όσον αφορά στις μελλοντικές προοπτικές της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η μελέτη που παρουσιάζεται θα μπορούσε να επεκταθεί εξετάζοντας πως οι παράμετροι των εκθετικών κατανομών επηρεάζουν τα αποτελέσματα και τις στρατηγικές ή ακόμη και αντί για εκθετικές να χρησιμοποιηθούν κατανομές Weibull. Ένας άλλος τρόπος που θα μπορούσε να επεκταθεί η μελέτη είναι να αναλυθεί η υποβάθμιση των στοιχείων σε περισσότερα στάδια ώστε να αποτυπώνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια καθώς επίσης και σε σύστημα με μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων ώστε το σύστημα που μελετάται να είναι πιο περίπλοκο. Μια άλλη κατεύθυνση που θα μπορούσε να ακολουθηθεί σε μελλοντική μελέτη είναι να ενταχθούν στην μελέτη ξαφνικές βλάβες από εξωτερικές αιτίες πχ. με την χρήση μαθηματικών κατανομών, έτσι θα δημιουργούνται περισσότερες ευκαιρίες για ευκαιριακές αποφάσεις.

## Βιβλιογραφία

- Arts, J., Basten, R., 2018. Design of multi-component periodic maintenance programs with single-component models. *IISE Transactions* 50, 606–615. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1437301>
- Bakir, I., Yildirim, M., Ursavas, E., 2021. An integrated optimization framework for multi-component predictive analytics in wind farm operations & maintenance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138, 110639. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110639>
- Bouvard, K., Artus, S., Bérenguer, C., Cocquempot, V., 2011. Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. Application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 601–610. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.11.009>
- Chalabi, N., Dahane, M., Beldjilali, B., Neki, A., 2016. Optimisation of preventive maintenance grouping strategy for multi-component series systems: Particle swarm based approach. *Computers & Industrial Engineering* 102, 440–451. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.018>
- Chen, S., Ho, T., Mao, B., 2013. Maintenance schedule optimisation for a railway power supply system. *International Journal of Production Research* 51, 4896–4910. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.774501>
- Chen, S., Ho, T., Mao, B., Bai, Y., 2014. A bi-objective maintenance scheduling for power feeding substations in electrified railways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 44, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.04.016>
- Chen, X., An, Y., Zhang, Z., Li, Y., 2020. An approximate nondominated sorting genetic algorithm to integrate optimization of production scheduling and accurate maintenance based on reliability intervals. *Journal of Manufacturing Systems* 54, 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.004>
- El-Sayed, A., 2017. *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*, Second Edition. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315156743>
- García Nieto, P.J., García-Gonzalo, E., Sánchez Lasheras, F., De Cos Juez, F.J., 2015. Hybrid PSO–SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability. *Reliability Engineering & System Safety* 138, 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.001>
- Li, Y., Chen, Y., Hu, Z., Zhang, H., 2023. Remaining useful life prediction of aero-engine enabled by fusing knowledge and deep learning models. *Reliability*

- Engineering & System Safety 229, 108869.  
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108869>
- Liu, G., Chen, S., Ho, T., Ran, X., Mao, B., Lan, Z., 2022a. Optimum opportunistic maintenance schedule over variable horizons considering multi-stage degradation and dynamic strategy. *Reliability Engineering & System Safety* 225, 108572. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108572>
- Liu, G., Chen, S., Ho, T., Ran, X., Mao, B., Lan, Z., 2022b. Optimum opportunistic maintenance schedule over variable horizons considering multi-stage degradation and dynamic strategy. *Reliability Engineering & System Safety* 225, 108572. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108572>
- Liu, G., Chen, S., Jin, H., Liu, S., 2021. Optimum opportunistic maintenance schedule incorporating delay time theory with imperfect maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 213, 107668. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107668>
- Liu, J., Yu, Z., Zuo, H., Fu, R., Feng, X., 2022. Multi-stage residual life prediction of aero-engine based on real-time clustering and combined prediction model. *Reliability Engineering & System Safety* 225, 108624. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108624>
- Liu, Y., Guo, P., Zhang, C., 2020. Fleet-Level Selective Dispatch and Imperfect Maintenance Strategy Optimization Based on Evolutionary Co-Petition Game Theory. *IEEE Access* 8, 148689–148701. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015999>
- Ma, W.-N., Li, H., Yang, Z.-Y., Hu, Q.-W., 2021. Maintenance Optimization for Two-Component Series Systems With Degradation Dependence. *IEEE Access* 9, 48174–48184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062567>
- Olde Keizer, M.C.A., Teunter, R.H., Veldman, J., Babai, M.Z., 2018. Condition-based maintenance for systems with economic dependence and load sharing. *International Journal of Production Economics* 195, 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.030>
- Qiu, Q., Cui, L., 2018. Reliability evaluation based on a dependent two-stage failure process with competing failures. *Applied Mathematical Modelling* 64, 699–712. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.039>
- Stapelberg, R.F., 2009. *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*. Springer, London.
- Trivedi, K.S., 2016. *Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9781119285441>

- Vasileiou, P.-C.G., 2000. Στοχαστικές μεθόδοι στις επιχειρησιακές έρευνες. Ziti, Thessaloniki.
- Wang, H., 2002. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research* 139, 469–489. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00197-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00197-7)
- Wild, T.W., Sterkenburg, R., 2008. Aircraft turbine engines. Avotek, Weyers Cave (Va.).
- Wu, T., Wang, D., Takagi, N., 2020. A negative cloud-to-ground lightning flash initiating at a high altitude and starting without classic preliminary breakdown pulses. *JAE* 39, 16–32. <https://doi.org/10.1541/jae.39.16>
- Xia, T., Dong, Y., Pan, E., Zheng, M., Wang, H., Xi, L., 2021. Fleet-level opportunistic maintenance for large-scale wind farms integrating real-time prognostic updating. *Renewable Energy* 163, 1444–1454. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.072>
- Xia, T., Xi, L., Zhou, X., Lee, J., 2012. Dynamic maintenance decision-making for series-parallel manufacturing system based on MAM-MTW methodology. *European Journal of Operational Research* 221, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.027>
- Yang, L., Ye, Z., Lee, C.-G., Yang, S., Peng, R., 2019. A two-phase preventive maintenance policy considering imperfect repair and postponed replacement. *European Journal of Operational Research* 274, 966–977. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.049>
- Zhang, J., 2019. Reliability evaluation and opportunistic maintenance policy based on a novel delay time model. *Qual Reliab Engng Int* 35, 978–994. <https://doi.org/10.1002/qre.2440>
- Zhou, X., Shi, K., 2019. Capacity failure rate based opportunistic maintenance modeling for series-parallel multi-station manufacturing systems. *Reliability Engineering & System Safety* 181, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.09.007>
- Zhou, X., Xi, L., Lee, J., 2007. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering & System Safety* 92, 530–534. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.01.006>
- Zhu, S.-P., Huang, H.-Z., Peng, W., Wang, H.-K., Mahadevan, S., 2016. Probabilistic Physics of Failure-based framework for fatigue life prediction of aircraft gas turbine discs under uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety* 146, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.002>