



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΈΡΕΥΝΑΣ**

Επιβλέπων: Δρ. Γεώργιος Δούνιας

ΜΑΡΙΟΣ ΘΥΜΙΑΝΗΣ

**Νοήμονες Μέθοδοι και Μηχανική των Αποφάσεων
(Intelligent Techniques and Decision Engineering)**

Χίος, Ιούλιος 2023

Δήλωση περί Πνευματικών Δικαιωμάτων

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. Είμαι συγγραφέας αυτής της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων ή ιδεών, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.

Ο δηλών

Μάριος Θυμιάνης

Στόχος

Η έρευνα εστιάζει στην ανάπτυξη και εφαρμογή νοημών μεθοδολογιών για την επιτυχή λήψη αποφάσεων σε μια σειρά από προβλήματα βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά, τέτοια προβλήματα αποτελούν τα προβλήματα συντήρησης – αξιοπιστίας (επιλογή εξαρτημάτων για ρύθμιση του επιπέδου αξιοπιστίας ενός συστήματος), η αποτελεσματική επιλογή χαρακτηριστικών (feature selection), η βελτιστοποίηση παραμέτρων ρύθμισης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, η διαχείριση ιατρικών δεδομένων για σχεδίαση αποτελεσματικών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, κ.ά. Οι μέθοδοι προς ανάπτυξη είναι είτε εμπνευσμένες από το φυσικό κόσμο (συμπεριφορά έμβιων συστημάτων και οργανισμών), είτε συνδυασμός υφισταμένων μεθόδων από το χώρο της μηχανικής μάθησης (υβριδικά νοήμονα συστήματα).

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη υβριδικών σχημάτων για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης που αποτελούνται από επιμέρους στόχους αξιοπιστίας και συγκεκριμένα την προσέγγιση του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας (reliability – redundancy allocation problem). Απώτερος σκοπός της μελέτης είναι η διερεύνηση αν ο υβριδισμός αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων πολλών επιμέρους στόχων.

Παράλληλα, ένα άλλο επίπεδο έρευνας της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η μελέτη και η ανάπτυξη νοημών εξελικτικών μεθοδολογιών για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (electric vehicle routing problems), το οποίο αποτελεί μια παραλλαγή του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problem). Πιο συγκεκριμένα στόχος της έρευνας είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση γύρω από τις εξελικτικές και μετα-ερευνητικές μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση του προβλήματος. Επιπλέον στόχους αποτελούν η συλλογή και η παρουσίαση των μελετών περίπτωσης που εφαρμόζονται στην βιβλιογραφία για το εν λόγω πρόβλημα και η πρόταση μιας καινοτόμου μεθόδου, η οποία βασίζεται στην Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization).

Aim

The research focuses on developing and applying intelligent methodologies for successful decision-making in a range of optimization problems. Indicatively, such problems are the maintenance-reliability problems (selection of components to adjust the level of reliability of a system), the effective selection of features (feature selection), the parameter optimization of machine learning algorithms, the management of medical data for the design of effective decision support systems, etc. The methods to be developed can either be inspired by the natural world (behavior of living systems and organisms) or be a combination of existing methods from the field of machine learning (hybrid intelligent systems).

This Master Thesis aims to develop hybrid schemes for solving optimization problems consisting of individual reliability objectives and specifically the reliability–redundancy allocation problem. The study aims to investigate whether hybridization is a powerful tool for solving such reliability problems.

Another level of research of this Thesis is the study and development of intelligent evolutionary methodologies for solving the electric vehicle routing problem, which is a variant of the vehicle routing problem. More specifically, the aim of the research is to conduct a literature review regarding the evolutionary and meta-heuristic methods that have been used to approach the problem. Additional objectives are collecting and presenting data instances used in the literature for this problem and proposing a novel method based on Ant Colony Optimization (ACO).

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των προβλημάτων της βιομηχανίας έχει φέρει στο προσκήνιο την εφαρμογή μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης, οι οποίες καλούνται να προσεγγίσουν την βέλτιστη στρατηγική ενός προβλήματος λήψης απόφασης. Τα εν λόγω προβλήματα βελτιστοποίησης είναι συνήθως αυξημένης πολυπλοκότητας και εμφανίζονται σε διάφορα πεδία της Μηχανικής (Engineering).

Η παρούσα έρευνα στοχεύει στην ανάπτυξη και εφαρμογή τέτοιων νοημόνων μεθοδολογιών για την επιτυχή λήψη αποφάσεων σε μια σειρά από προβλήματα βελτιστοποίησης. Η μελέτη εστιάζει σε δύο διαφορετικά μεταξύ τους προβλήματα, όπου η εφαρμογή των εν λόγω μεθοδολογιών εμφανίζει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Πιο συγκεκριμένα, τα προβλήματα που επιλέχθηκαν προέρχονται από τον χώρο της Μηχανικής της Αξιοπιστίας (Reliability Engineering) και της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (Logistics). Ως αποτέλεσμα, η έρευνα χωρίζεται σε δύο άξονες. Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει εάν τέτοιες μεθοδολογίες αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων Βελτιστοποίησης.

Στο πρώτο μέρος της έρευνας επιλύονται προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας (reliability-redundancy allocation) χρησιμοποιώντας νοήμονα υβριδικά σχήματα που απαρτίζονται από αλγόριθμους που είναι εμπνευσμένοι από τη φύση (Nature Inspired Algorithms). Τα προβλήματα αυτά αποτελούν τον συνδυασμό των προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας (reliability allocation) και κατανομής εφεδρείας (redundancy allocation). Τα εν λόγω προβλήματα στοχεύουν στην επίτευξη του υψηλότερου επιπέδου αξιοπιστίας ενός συστήματος, κατά το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί η κατάλληλη προδιαγραφή αξιοπιστίας των εξαρτημάτων (κατανομή αξιοπιστίας) καθώς και το πλήθος των εξαρτημάτων (κατανομή εφεδρείας) για κάθε ένα από τα υποσυστήματα.

Στόχος είναι να διερευνηθεί εάν ο υβριδισμός είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος προσέγγισης προβλημάτων με πολλαπλούς στόχους. Ως εκ τούτου, για τον σχεδιασμό των υβριδικών σχημάτων επιλέχθηκαν γνωστοί αλγόριθμοι που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας και κατανομής εφεδρείας στη βιβλιογραφία. Η ιδέα πίσω από αυτό είναι να μελετηθεί εάν ένα αποτελεσματικό υβριδικό σχήμα είναι το αποτέλεσμα της υβριδοποίησης (επιμέρους) αποδοτικών αλγορίθμων. Για τον έλεγχο της προτεινόμενης προσέγγισης προτείνονται εννέα (9) εναλλακτικά μεθοδολογικά σχήματα. Η απόδοση των εννέα προτεινόμενων σχημάτων και των επιμέρους (μεμονωμένων) αλγορίθμων ελέγχεται σε δέκα γνωστές τεχνητές και πραγματικές μελέτες περίπτωσης, από τον χώρο της μηχανικής της αξιοπιστίας. Μάλιστα, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με άλλα της βιβλιογραφίας, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων υβριδικών σχημάτων και, κατά

συνέπεια, υποστηρίζουν την ερευνητική υπόθεση ότι ο υβριδισμός μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των μεθόδων βελτιστοποίησης.

Στο δεύτερο μέρος της έρευνας, μελετάται μια παραλλαγή (εκδοχή) του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem-VRP). Το εν λόγω πρόβλημα είναι ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, καθώς γύρω του έχει γίνει σημαντική έρευνα ως προς τη διερεύνηση νέων παραλλαγών του και νέων προσεγγίσεων επίλυσής του.

Μία από αυτές τις παραλλαγές είναι το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem-EVRP), του οποίου κύριος στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη δρομολόγηση ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις τοποθεσίες των σταθμών φόρτισης και την κατανάλωση μπαταρίας των οχημάτων. Ο στόχος αυτής της μελέτης χωρίστηκε σε τρία μέρη. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις μετα-ευρετικές (meta-heuristics) προσεγγίσεις που εφαρμόζονται στην εν λόγω παραλλαγή του προβλήματος. Έπειτα συλλέχθηκαν πληροφορίες σχετικά με τα διαθέσιμα δεδομένα μελετών περίπτωσης και τέλος προτάθηκε μια νέα καινοτόμος μέθοδος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων. Μάλιστα, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαφορετικές γνωστές μετα-ευρετικές προσεγγίσεις σε διάφορες περιπτώσεις του εν λόγω προβλήματος.

Abstract

In recent years, the increasing complexity of industry problems has brought to the fore the application of Artificial Intelligence methods, which are called upon to approach the optimal strategy of a decision-making problem. These optimization problems are usually of increased complexity and appear in various fields of Engineering.

The present research aims on developing and applying such intelligent methodologies for successful decision-making in a series of optimization problems. The study focuses on two different problems, where the application of these methodologies shows significant research interest. More specifically, the problems chosen come from the fields of Reliability Engineering and Logistics. As a result, the research is divided into two axes. The main goal of the present thesis is to investigate whether such methodologies are a powerful tool for solving complex Optimization problems.

At the first part of the research, reliability-redundancy allocation problems are solved, using intelligent hybrid schemes made up of algorithms inspired by nature (Nature Inspired Algorithms). These problems are a combination of reliability allocation and redundancy allocation problems. These problems aim to achieve the highest level of reliability of a system, in which the appropriate reliability specification of the components (reliability allocation), as well as the number of components (redundancy allocation), must be determined for each of the subsystems.

The goal is to investigate whether hybridization is an efficient way to approach problems with multiple objectives. Therefore, well-known algorithms that have been successfully applied to reliability allocation and redundancy allocation problems in the literature were chosen to design the hybrid schemes. The idea behind this is to study whether an efficient hybrid scheme is the result of hybridizing (individual) efficient algorithms. Nine (9) alternative methodological schemes are proposed to test the proposed approach. The performance of the nine proposed schemes and the individual algorithms is tested on ten well-known artificial and real case studies, from the field of reliability engineering. The results are compared with others in the literature, highlighting the effectiveness of the proposed hybrid schemes and, consequently, supporting the research hypothesis that hybridization can improve the performance of optimization methods.

At the second part of the research, a variant of the Vehicle Routing Problem (VRP) is investigated. The problem in question is one of the most well-known combinatorial optimization problems, as a significant amount of research has been done around it in terms of investigating new variants and new approaches to solving it.

One of these variants is the Electric Vehicle Routing Problem (EVRP), whose main objective is to find the optimal route for a fleet of electric vehicles, considering the locations of recharging stations and the battery consumption of the vehicles. The objective of this study was divided into three parts. First, a brief literature review was carried out regarding the meta-heuristic approaches applied to this variation of the problem. Consequently, information on the available data instances was collected and finally, a new innovative Ant Colony Optimization method was proposed to solve the Electric Vehicle Routing Problem. The results are compared with different known meta-heuristic approaches in different instances of the problem in question.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1	Νοήμονες Εξελικτικές Μέθοδοι	17
1.2	Συνεισφορά.....	19
2	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ – ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ	22
2.1	Εξελικτικός Προγραμματισμός σε προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας	23
2.2	Πολυπλοκότητα προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας.....	25
2.3	Γενικός Φορμαλισμός Προβλημάτων Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας	28
2.4	Εφαρμογές σε προβλήματα Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας	32
2.4.1	Μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος.....	32
2.4.2	Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος.....	33
2.4.3	Μελέτη Περίπτωσης Περίπλοκου Συστήματος Γέφυρας	34
2.4.4	Μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης	36
2.4.5	Μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου	37
2.4.6	Μελέτη περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.....	39
2.4.7	Μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας	40
2.4.8	Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων	41
2.4.9	Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων	42
2.4.10	Μελέτη περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων.....	44
3	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ - ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ	46
3.1	Εξεταζόμενες Μέθοδοι	46
3.1.1	Γενετικός Αλγόριθμος	48
3.1.2	Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις.....	50
3.1.3	Αλγόριθμος της Νυχτερίδας	51
3.1.4	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	53
3.1.5	Αναζήτηση Κούκου	55
3.1.6	Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας.....	56
3.2	Προτεινόμενο μοντέλο υβριδικών σχημάτων προσέγγισης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας	58
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ – ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ	60
4.1	Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Handling)	60
4.2	Ρύθμιση Παραμέτρων.....	60
4.3	Δεδομένα Μελετών Περίπτωσης.....	61
4.4	Αποτελέσματα	64
4.5	Συμπεράσματα.....	82

5	ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (ΠΑΗΟ).....	85
5.1	Εξελκτικές και Μετα-ευρετικές Μέθοδοι στο Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων	86
5.2	Φορμαλισμός του Προβλήματος	88
5.3	Εφαρμογές σε Περιπτώσεις Συγκριτικής Αξιολόγησης Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	92
6	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	95
6.1	Εξεταζόμενη Μέθοδος: Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	95
6.2	Προτεινόμενη Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	97
7	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	99
7.1	Αναδιατύπωση της Λύσης.....	99
7.2	Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Handling)	100
7.3	Ρύθμιση Παραμέτρων.....	101
7.4	Αποτελέσματα	101
7.5	Συμπεράσματα.....	104
8	ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Παράδειγμα λύσης σειριακού συστήματος 5 υποσυστημάτων.....	26
Σχήμα 2.2: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων μεγάλου πλήθους εξαρτημάτων	27
Σχήμα 2.3: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων εξαρτημάτων υψηλής αξιοπιστίας.....	27
Σχήμα 2.4: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων.....	28
Σχήμα 2.5: Παράδειγμα κατανομής εφεδρικών εξαρτημάτων 5 υποσυστημάτων, σειριακού συστήματος.....	29
Σχήμα 2.6: Σειριακό - παράλληλο σύστημα.....	34
Σχήμα 2.7: Περίπλοκο σύστημα γέφυρας.....	34
Σχήμα 2.8: Πιθανά ενδεχόμενα περίπλοκου συστήματος γέφυρα.....	35
Σχήμα 2.9: Σύστημα προστασίας υπερτάχυνσης.....	36
Σχήμα 2.10: Σύστημα γέφυρας δικτύου.....	37
Σχήμα 2.11: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος γέφυρας δικτύου.....	38
Σχήμα 2.12: Σύστημα υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.....	39
Σχήμα 2.13: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα... ..	40
Σχήμα 2.14: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.....	41
Σχήμα 2.15: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.....	44
Σχήμα 2.16: Σύστημα γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων. Πηγή: (Garg and Sharma, 2013).....	45
Σχήμα 3.1: Υβριδικό μοντέλο επίλυσης πολλαπλών στόχων προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας.....	58

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μαθηματική σημειογραφία μελετών περίπτωσης.	31
Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων υβριδικών σχημάτων.	61
Πίνακας 3: Δεδομένα σειριακού και περίπλοκου συστήματος.	62
Πίνακας 4: Δεδομένα σειριακού - παράλληλου συστήματος.	62
Πίνακας 5: Δεδομένα συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.	62
Πίνακας 6: Δεδομένα συστήματος μεγάλης κλίμακας.	63
Πίνακας 7: Δεδομένα συστημάτων δομής δέκα και δεκαπέντε υποσυστημάτων.	63
Πίνακας 8: Δεδομένα συστήματος γραμμής παραγωγή εργοστασίου φαρμάκων.	64
Πίνακας 9: Άνω όρια περιορισμών μελετών περίπτωσης.	64
Πίνακας 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού συστήματος.	66
Πίνακας 4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού -παράλληλου συστήματος.	67
Πίνακας 5: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας.	68
Πίνακας 6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.	69
Πίνακας 7: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου.	70
Πίνακας 8: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.	70
Πίνακας 9: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας.	71
Πίνακας 10: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων.	73
Πίνακας 11: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων.	73
Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων.	74
Πίνακας 20: Τεστ Friedman αποτελεσμάτων υβριδικών σχημάτων.	79

Πίνακας 21: Τιμές p-value τεστ Nemeygi για σύγκριση κάθε πιθανού ζεύγους αλγορίθμων.	80
Πίνακας 22: Μέσοι χρόνοι εκτέλεσης (sec) υβριδικών σχημάτων στις μελέτες περίπτωσης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας.....	82
Πίνακας 16: Τιμές παραμέτρων προτεινόμενης BAM.....	101
Πίνακας 17: Αποτελέσματα BAM και των δύο AMΓ σε μελέτες περίπτωσης ΠΔΗΟ.....	103
Πίνακας 18: Τεστ Friedman αποτελεσμάτων ΠΔΗΟ.....	104

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα υβριδικών σχημάτων σε κάθε μελέτη περίπτωσης κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας.....	78
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Κρίσιμης Απόστασης (Critical Difference Diagram) σύγκρισης προτεινόμενων υβριδικών σχημάτων.....	81

Κατάλογος Ψευδοκωδίκων

Ψευδοκώδικας 3.1: Γενετικός Αλγόριθμος	50
Ψευδοκώδικας 3.2: Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις.....	51
Ψευδοκώδικας 3.3: Αλγόριθμος της Νυχτερίδας	53
Ψευδοκώδικας 3.4: Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων	54
Ψευδοκώδικας 3.5: Αναζήτηση Κούκου.....	56
Ψευδοκώδικας 3.6: Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας	57
Ψευδοκώδικας 6.1: Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	96

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Παράδειγμα γράφου.....	89
Εικόνα 2: Παράδειγμα γράφου δρομολόγησης οχημάτων.....	89
Εικόνα 3: Παράδειγμα γράφου δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων.....	91
Εικόνα 4: Στρατηγική αναδιατύπωσης λύσης.....	99

1 Εισαγωγή

Ο όρος Τεχνητή Νοημοσύνη καθιερώθηκε από τους McCarthy et al. το (1955) και αναφέρεται στον προγραμματισμό των μηχανών ώστε να αναπαράγουν τις γνωστικές λειτουργίες ενός ανθρώπου, όπως αυτή της μάθησης. Ωστόσο, σε αντίθεση με τον άνθρωπο οι μηχανές μπορούν να εκτελούν περίπλοκες λειτουργίες χωρίς κανένα σφάλμα, σε πρακτικό χρόνο.

Η ικανότητα των υπολογιστών να επεξεργάζονται πληροφορίες σε πρακτικό χρόνο, οδήγησε στην εμφάνιση πολλών εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης. Μεταξύ αυτών είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) (Rojas, 1996), η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) (Carbonell, Michalski and Mitchell, 1983), η Ρομποτική (Brady, 1984) κ.α.. Επιπρόσθετα, προκειμένου να ληφθούν αποφάσεις σε περίπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης, εμφανίστηκε μια νέα κατηγορία μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης που ονομάζεται Υπολογιστική Νοημοσύνη (Computational Intelligence) (Konar, 2005).

Η έρευνα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής αφορά την ανάπτυξη και εφαρμογή τέτοιων νοημόνων μεθοδολογιών για την επιτυχή λήψη αποφάσεων σε μια σειρά από προβλήματα βελτιστοποίησης, πρόβλεψης, κατηγοριοποίησης ή ομαδοποίησης. Οι μέθοδοι προς ανάπτυξη μπορεί είτε να είναι εμπνευσμένες από το φυσικό κόσμο (συμπεριφορά έμβιων συστημάτων και οργανισμών) είτε να είναι συνδυασμός υφισταμένων μεθόδων από το χώρο της μηχανικής μάθησης (υβριδικά νοήμονα συστήματα).

Ενδεικτικά τέτοια ερευνητικά προβλήματα (συνδυασμός μεθόδων και χώρων εφαρμογής) είναι η ανάπτυξη υβριδικών νοημόνων συστημάτων για την επίλυση προβλημάτων συντήρησης – αξιοπιστίας (επιλογή εξαρτημάτων για ρύθμιση του επιπέδου αξιοπιστίας ενός συστήματος), χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης για την αποτελεσματική επιλογή χαρακτηριστικών (feature selection), βελτιστοποίηση παραμέτρων ρύθμισης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, διαχείριση ιατρικών δεδομένων για σχεδίαση αποτελεσματικών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, κ.ά.

1.1 Νοήμονες Εξελικτικές Μέθοδοι

Μερικά από τα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι αυτά της υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (Decision Making) σε προβλήματα διαφόρων πεδίων εφαρμογών της μηχανικής. Κατά καιρούς χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού, όμως καθώς εμφανίζονταν προβλήματα με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, αυτές οι μέθοδοι αδυνατούσαν να αποδώσουν την ακριβή λύση σε πεπερασμένο χρόνο. Αργότερα, έκαναν την εμφάνισή τους οι ευρετικές (heuristic) μέθοδοι, οι οποίες βασίζόμενες σε ευρετικούς κανόνες αναζητούν τη

βέλτιστη λύση σε μικρότερο μέρος του χώρου λύσεων. Ωστόσο, οι ευρετικές μέθοδοι δεν απέφεραν λύσεις υψηλής ποιότητας με αποτέλεσμα να κάνουν την εμφάνιση τους οι μετα-ευρετικές μέθοδοι κατά τις οποίες η λύση μεταβάλλεται στην διάρκεια της αλγοριθμικής διαδικασίας, βασιζόμενη σε κάποια πληροφορία (Garg, 2015b).

Με την ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης, η πληροφορία αυτή άρχισε να αντλείται μέσω νοημοσύνης (intelligence) (Fogel, Owens and Walsh, 1966), αυτές οι μέθοδοι, βασιζόμενες στην θεωρία της εξέλιξης, ονομάζονται νοήμονες εξελικτικές μέθοδοι και αποτελούν τεχνικές του Εξελικτικού Προγραμματισμού (Evolutionary Computing). Μεταξύ αυτών είναι η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing) (Kim, Bae and Park, 2006), ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm) (Yokota et al., 1996), η Τεχνητή Αποικία Μελισσών (Artificial Bee Colony) (Yeh and Hsieh, 2011) και η Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) (Agarwal and Sharma, 2010).

Πιο συγκεκριμένα, ο Εξελικτικός Προγραμματισμός αντλεί έμπνευση από την θεωρία της εξέλιξης. Για παράδειγμα, θεωρείται ένα δεδομένο περιβάλλον το οποίο μπορεί να φιλοξενήσει μόνο έναν περιορισμένο αριθμό ατόμων, όπου ως βασικό ένστικτο έχουν να αναπαραχθούν. Ευνοούνται εκείνα τα άτομα που ανταγωνίζονται για τους πόρους επιβίωσης πιο αποτελεσματικά, με άλλα λόγια, εκείνοι που προσαρμόζονται καλύτερα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα χαρακτηριστικά εκείνα ενός ατόμου που επηρεάζουν άμεσα την απόκριση του στο περιβάλλον, καθορίζουν την καταλληλότητα του. Κάθε άτομο αντιπροσωπεύει έναν μοναδικό συνδυασμό χαρακτηριστικών που αξιολογείται από το περιβάλλον. Εάν αυτός ο συνδυασμός αξιολογηθεί ευνοϊκά, τότε το άτομο έχει περισσότερες πιθανότητες να δημιουργήσει απογόνους. Διαφορετικά, το άτομο απορρίπτεται πεθαίνοντας χωρίς απογόνους (Eiben and Smith, 2004).

Στις εξελικτικές μεθόδους, δημιουργείται ένας πληθυσμός (population) ατόμων που αντιπροσωπεύουν τις υποψήφιες λύσεις (candidate solutions) ενός προβλήματος, η εξέλιξη των ατόμων διαρκεί για κάποιες γενιές (generations) οι οποίες αποτελούν τον αριθμό των επαναλήψεων κατά τον οποίο θα εκτελεστεί η μέθοδος. Σε κάθε γενιά δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός βασιζόμενος στην πληροφορία από τον πληθυσμό της προηγούμενης γενιάς (Τζανέτος, 2020).

Τα άτομα του πληθυσμού αποτελούν τους αναζητητές ή εξυπηρετητές (agents) της μεθόδου, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν μια υποψήφια λύση έκαστος. Μια λύση αποτελεί ένα διάνυσμα τιμών για κάθε μια μεταβλητή απόφασης του προβλήματος. Σε κάθε γενιά οι αναζητητές μεταβάλλουν τις τιμές του διανύσματος τους, βασιζόμενοι σε μια πληροφορία, μετακινούμενοι στον χώρο λύσεων που περιγράφει το πρόβλημα. Η διαδικασία αυτή

επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού της μεθόδου, το οποίο είναι προκαθορισμένο.

Η διαδικασία αυτή κατά την οποία προκαθορίζονται οι παράμετροι μιας μεθόδου, ονομάζεται αρχικοποίηση (initialization). Μια μέθοδος αποτελείται από τις παραμέτρους που περιγράφουν τον αριθμό του πληθυσμού και των γενεών, οι οποίες είναι κοινές σχεδόν σε όλες τις μεθόδους και εκφράζουν τον Πλήθος Κλήσεων της Αντικειμενικής Συνάρτησης (Number of Function Evaluations) (ΠΚΑΣ), όπου υπολογίζεται ως:

$$\text{ΠΚΑΣ} = \text{Πληθυσμός} \times \text{Γενιές} \quad (1.1)$$

Πέραν του πληθυσμού και των γενεών, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι έχουν κάποιες επιμέρους παραμέτρους, οι οποίες σχετίζονται με το φυσικό ανάλογο του φαινομένου στο οποίο βασίζονται, όπως π.χ. στο Γενετικό Αλγόριθμο ορίζεται ένα ποσοστό μετάλλαξης, που αναπαριστά την πιθανότητα να μεταβληθεί τυχαία μια λύση από τον πληθυσμό. Επιπρόσθετα, κατά την διαδικασία της αρχικοποίησης προσδιορίζεται το σημείο εκκίνησης των αναζητητών στον χώρο λύσεων, το οποίο συνήθως γίνεται με τυχαίο τρόπο.

1.2 Συνεισφορά

Στα πλαίσια της έρευνας έχουν μελετηθεί προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας (Reliability Optimization Problems), τα οποία είναι γνωστό ότι είναι αρκετά πολύπλοκα να επιλυθούν (Chern, 1992) και συνεπώς απαιτούνται αποτελεσματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη τα τρία βασικά προβλήματα βελτιστοποίησης της αξιοπιστίας τεχνολογικών συστημάτων, το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας (reliability allocation), κατανομής εφεδρείας (redundancy allocation) και κατανομής αξιοπιστίας–εφεδρείας (reliability–redundancy allocation problem), τα οποία περιγράφουν προβλήματα των οποίων στόχος είναι να επιτευχθούν τα υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας ενός συστήματος. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία ο όρος κατανομή αξιοπιστίας–εφεδρείας δεν έχει πιθανοτική έννοια, αλλά αναφέρεται στην επιλογή της προδιαγραφής της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και το πλήθος των εξαρτημάτων για κάθε υποσύστημα που αποτελούν το εξεταζόμενο σύστημα.

Κάθε εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από ένα πλήθος υποσυστημάτων (subsystems), όπου με την σειρά τους αποτελούνται από ένα πλήθος παράλληλα συνδεδεμένων εξαρτημάτων (components) ίσης αξιοπιστίας, με χαρακτηριστικά βάρους, όγκου και κόστους. Η επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας επιτυγχάνεται αυξάνοντας την αξιοπιστία των εξαρτημάτων (reliability allocation) κάθε υποσυστήματος, προσθέτοντας εφεδρικά εξαρτήματα (redundancy allocation) σε παραλληλία των υπαρχόντων υποσυστημάτων ή εφαρμόζοντας και τα δύο (reliability – redundancy allocation). Ωστόσο, μια επιλογή εξαρτημάτων υψηλής (προδιαγραφής)

αξιοπιστίας αναλογεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, όπως επίσης μια αύξηση στο πλήθος των εφεδρικών εξαρτημάτων σημαίνει αύξηση του συνολικού κόστους, βάρους και όγκου. Συνεπώς τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας μπορούν να διατυπωθούν ως μη γραμμικά προβλήματα μικτών ακεραίων, όπου η πολυπλοκότητα τους είναι η επίτευξη της μέγιστης αξιοπιστίας του συστήματος, χωρίς να ξεπεραστεί η διαθεσιμότητα των πόρων κόστους, βάρους και όγκου.

Στόχος της έρευνας αποτελεί ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη υβριδικών σχημάτων που αποτελούνται από νοήμονες εξελικτικές μεθόδους, με στόχο την εφαρμογή τους σε μελέτες περίπτωσης που συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφία.

Ένα ακόμη πεδίο εφαρμογής που παρουσιάζει αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον είναι τα προβλήματα δρομολόγησης (routing problems). Το ενδιαφέρον για τα εν λόγω προβλήματα πηγάζει από την απλή εφαρμογή τους για την αντιμετώπιση πραγματικών καταστάσεων, καθώς επίσης και από την αυξημένη πολυπλοκότητα τους. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της έρευνας έχει μελετηθεί το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (electric vehicle routing problems), το οποίο αποτελεί μια επέκταση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problems). Στόχος των προβλημάτων δρομολόγησης αποτελεί η δρομολόγηση ενός στόλου οχημάτων ώστε να εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες, με τρόπο τέτοιο που ικανοποιούνται κάποιοι δευτερεύων στόχοι, όπως η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μετακίνησης.

Παράλληλα, στόχος της έρευνας είναι η διερεύνηση μιας νέας εκδοχής προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων, κατά τον οποίο τα οχήματα λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια έναντι καυσίμων. Στο εν λόγω πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (ΠΔΗΟ), ο στόλος των εξυπηρετητών αποτελείται από ηλεκτροκίνητα οχήματα τα οποία έχουν περιορισμένη χωρητικότητα φορτίου και μπαταρίας.

Πιο συγκεκριμένα η έρευνα διεξάγει μια σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση γύρω από τις εξελικτικές και μετα-ερευνητικές μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση του ΠΔΗΟ και των διαφόρων εκδοχών του. Αναλυτικότερα στόχος του προβλήματος είναι ο προσδιορισμός των διαδρομών που θα ακολουθήσει κάθε ηλεκτρικό όχημα ώστε όλοι οι κόμβοι ενδιαφέροντος (πελάτες) να έχουν επισκεφθεί, με τρόπο τέτοιο που να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος δρομολόγησης (μετακίνησης). Η πολυπλοκότητα του προβλήματος βρίσκεται στους περιορισμούς που αφορούν τα οχήματα. Συγκεκριμένα, η υπολειπόμενη χωρητικότητα φορτίου του οχήματος θα πρέπει να είναι επαρκής κατά την άφιξη του σε οποιοδήποτε κόμβο, καθώς επίσης και το φορτίο της μπαταρίας κατά την μετακίνηση του σε επόμενο κόμβο.

Μια ακόμη συνεισφορά της έρευνας αποτελεί η συλλογή και η παρουσίαση των μελετών περίπτωσης που εφαρμόζονται στην βιβλιογραφία για το εν λόγω πρόβλημα. Τέλος, προτείνεται μια καινοτόμος μέθοδος, η οποία βασίζεται στην Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) (Dorigo, Birattari and Stutzle, 2006). Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στις πιο γνωστές μελέτες περίπτωσης της βιβλιογραφίας και τα αποτελέσματα αυτής συγκρίνονται με διαφορετικές γνωστές μετα-ευρετικές προσεγγίσεις.

2 Προβλήματα Κατανομής Αξιοπιστίας – Εφεδρείας

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των συστημάτων της βιομηχανίας και το ταχέως αυξανόμενο κόστος που προκύπτει από την απώλεια λειτουργίας τους, έχουν θέσει την αξιοπιστία ως ένα σημαντικό μέτρο απόδοσης ενός τεχνολογικού συστήματος (Birolini, 2010). Η αξιοπιστία είναι ένα μέτρο απόδοσης το οποίο εκφράζει την πιθανότητα ένα δεδομένο σύστημα να λειτουργήσει χωρίς αστοχία για ένα καθορισμένο χρόνο λειτουργίας, αποτελεί μια παράμετρο απόδοσης που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός συστήματος.

Ο σχεδιασμός αξιοπιστίας στοχεύει στον προσδιορισμό μιας βέλτιστης διαμόρφωσης σε επίπεδο συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την αντιστάθμιση μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και των πόρων, που εδώ και πολύ καιρό υπήρξε σημαντικό θέμα στη μηχανική της αξιοπιστίας (reliability engineering). Από το 1960, πολλές δημοσιεύσεις έχουν αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας διαφορετικές δομές συστήματος, μέτρα απόδοσης και τεχνικές βελτιστοποίησης για τη βελτίωση της αξιοπιστίας (Levitin, 2007).

Τέτοια σύνθετα προβλήματα αξιοπιστίας, αποτελούν τα προβλήματα κατανομής εφεδρείας, προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας και προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας. Αφορούν την παροχή εφεδρικών (πλεοναζόντων) εξαρτημάτων παράλληλα, την ενίσχυση της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και τον συνδυασμό αυτών, αντίστοιχα.

Ωστόσο, κάθε προσπάθεια βελτίωσης συνήθως απαιτεί πόρους. Πολύ συχνά είναι δύσκολο για έναν μόνο στόχο να περιγράψει επαρκώς ένα πραγματικό πρόβλημα για το οποίο απαιτείται βέλτιστος σχεδιασμός. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας (reliability optimization problem) είναι γνωστό ότι είναι αρκετά πολύπλοκα να επιλυθούν (Chern, 1992) και συνεπώς απαιτούνται αποτελεσματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Όπως αναφέρεται στην αρχή της ενότητας, στόχος του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας είναι η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος που μελετάται. Η συνολική αξιοπιστία του συστήματος εξαρτάται από το πλήθος (καταμερισμό) των εφεδρικών εξαρτημάτων στα επιμέρους υποσυστήματα και την επιλογή της (προδιαγραφής) αξιοπιστίας αυτών των εξαρτημάτων. Προκείμενου να απλοποιηθεί το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας, πριν αυτό μοντελοποιηθεί, έγινε η υπόθεση ότι ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές.

Κάθε υποσύστημα αποτελείται από ομογενή εξαρτήματα, το οποίο υποδηλώνει ότι πρόκειται για εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας. Η εν λόγω παραδοχή έχει ως αποτέλεσμα η επιλογή της (προδιαγραφής) αξιοπιστίας των εξαρτημάτων να γίνεται σε επίπεδο

υποσυστήματος, δηλαδή να επιλέγεται η αξιοπιστία που θα διαθέτουν όλα τα εξαρτήματα, που το αποτελούν.

Τα εφεδρικά εξαρτήματα κάθε υποσυστήματος είναι συνδεδεμένα παράλληλα. Ως συνέπεια της παραπάνω παραδοχής είναι η συνολική αξιοπιστία κάθε υποσυστήματος να περιγράφεται από την ίδια μαθηματική σχέση. Αυτό σημαίνει πως η αντικειμενική συνάρτηση (μαθηματική σχέση της συνολικής αξιοπιστίας) του προβλήματος διαμορφώνεται από την τοπολογία του συστήματος, σε επίπεδο υποσυστημάτων.

Η κατανομή εφεδρικών εξαρτημάτων ακολουθεί στρατηγική ενεργής εφεδρείας. Όπως αναφέρεται προηγουμένως, για λόγους απλούστευσης του προβλήματος η συνολική αξιοπιστία κάθε υποσυστήματος περιγράφεται από την ίδια μαθηματική σχέση.

2.1 Εξελικτικός Προγραμματισμός σε προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας παρουσιάζουν αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον, ενώ αρκετές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στην προσέγγιση τους με τεχνικές βελτιστοποίησης (Chern, 1992; M. Hikita et al., 1992). Πρόσφατα, με την έλευση των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης, πολλές εξελικτικές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας. Μεταξύ αυτών υπάρχουν μέθοδοι βασισμένες στην Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) (Ravikumar Pandi and B. K., 2008; Coelho, 2009; D. Zou et al., 2010; Wu et al., 2011; Zhang et al., 2013), στην τεχνική της Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (Artificial Bee Colony) (Yeh and Hsieh, 2011; Garg, Rani and Sharma, 2013), με βάση τις τεχνικές βελτιστοποίησης Ανοσοποιητικού Συστήματος (Immune Algorithm) (Chen, 2006; Hsieh and You, 2011), βασισμένες στον Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic Algorithm) (Kanagaraj, Ponnambalam and Jawahar, 2013; Hsieh, Chen and Bricker, 1998; Yokota et al., 1996) και άλλες συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης (Wang and Li, 2012; Afonso, Mariani and dos Santos Coelho, 2013; Ouyang et al., 2015).

Αν και οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι έχουν παρουσιάσει καλή απόδοση κατά την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, επιδεικνύουν κάποιες αδυναμίες όπως η μικρότερη σταθερότητα απόδοσης λύσεων, η πρόωρη σύγκλιση καθώς και το γεγονός ότι δεν διενεργούν τοπική αναζήτηση του χώρου λύσεων. Δεδομένου ότι τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας θεωρούνται αρκετά πολύπλοκα (Chern, 1992), οι ευρετικές τεχνικές είναι δύσκολο να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλαπλών μεταβλητών απόφασης. Έτσι, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, προτείνεται η προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας με χρήση νοημών εξελικτικών μεθόδων.

Η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) αποτελεί ένα πρακτικό εργαλείο και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας εργοστασίου φαρμάκων (reliability – redundancy allocation problem of pharmaceutical plant) (Garg and Sharma, 2013) και το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problem) (Ai and Kachitvichyanukul, 2009). Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι (Wu et al., 2011), η εν λόγω μέθοδος παρουσιάζει το μειονέκτημα την πρόωρης σύγκλισης (premature convergence), με αποτέλεσμα να μην έχει καλή απόδοση σε περίπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας. Έτσι οι (Wu et al., 2011) ενσωμάτωσαν μηχανισμούς για την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος και πρότειναν την Βελτιωμένη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Improved Particle Swarm Optimization) (BBSS), η οποία σχεδιάζει δύο στρατηγικές ενημέρωσης θέσης και εισάγει έναν μηχανισμό μετάλλαξης μετά την ενημέρωση θέσης, με αποτέλεσμα να θεωρείται ως ένα απλό αλλά ισχυρό εργαλείο για την επίλυση διαφόρων πρακτικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Επιπρόσθετα, οι (Afonso, Mariani and dos Santos Coelho, 2013) παρατήρησαν ότι ο Αλγόριθμος Ιμπεριαλιστικού Ανταγωνισμού (Imperialist Competitive Algorithm) των (E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, 2007) παρουσιάζει το μειονέκτημα της πρόωρης σύγκλισης (premature convergence) με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να εγκλωβίζεται σε τοπικά βέλτιστα. Έτσι πρότειναν τον Τροποποιημένο Αλγόριθμο Ιμπεριαλιστικού Ανταγωνισμού με την μέθοδο Έλξης - Απώθησης (Attraction Repulsion Modified Imperialist Competitive Algorithm) (AIAAE), στον οποίο ενσωματώθηκε ο μηχανισμός Έλξης – Απώθησης των (Ursem, 2002), όπου όταν οι υποψήφιοι λύσεις δεν εμφανίζουν υψηλή ποικιλομορφία, απωθούνται κάνοντας μια καλύτερη εξερεύνηση του χώρου λύσεων, ενώ όταν εμφανίζουν υψηλή ποικιλομορφία, έλκονται μεταξύ τους έτσι ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει.

Οι (Hsieh and You, 2011) παρατήρησαν ότι η Προσέγγιση Ανοσοποιητικού Συστήματος (Immune Based Approach) του (Chen, 2006) μπορεί να ενισχυθεί, ενσωματώνοντας έναν επιπλέον μηχανισμό. Συνεπώς πρότειναν την Προσέγγιση Δύο Φάσεων Ανοσοποιητικού Συστήματος (Immune Based Two Phase Approach) (ΠΔΦΑΣ), η οποία είναι μια νέα προσέγγιση δύο φάσεων που αντλεί έμπνευση από το ανοσοποιητικό σύστημα σχεδιασμένη για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας. Κατά την πρώτη φάση, ο αλγόριθμος προσεγγίζει μια σχεδόν βέλτιστη λύση του προβλήματος, ενώ κατά την δεύτερη φάση χρησιμοποιείται ο επιπλέον μηχανισμός ώστε να βελτιώσει την υποψήφια λύση.

Παρομοίως, προτάθηκε από τους (Garg, Rani and Sharma, 2013) η Προσέγγιση Δύο Φάσεων Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (Two Phase Approach Artificial Bee Colony) (ΠΔΦΤΑΜ), που βασίζεται στη Τεχνητή Αποικία Μελισσών (Artificial Bee Colony), η οποία παρόμοια με παραπάνω, σε μια δεύτερη φάση χρησιμοποιεί έναν επιπλέον μηχανισμό ώστε να βελτιώσει την υποψήφια λύση.

Επιπλέον οι (Mellal and Zio, 2016) τροποποίησαν την Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ (Stochastic Fractal Search) του (Salimi, 2015), έτσι ώστε να προσεγγίζει περίπλοκα προβλήματα που υπόκεινται περιορισμούς. Επομένως, προτείνουν την Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ με μέθοδο Ποινής (Penalty guided Stochastic Fractal Search) (ΣΑΦΠ), όπου ενσωμάτωσαν τον μηχανισμό μεθόδου ποινής (penalty method) προκειμένου να διαχειριστούν τους πειρασμούς που υπόκεινται τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας.

Όπως καταδεικνύεται στη βιβλιογραφία, οι παραπάνω τεχνικές βελτιστοποίησης δείχνουν καλή απόδοση στην προσέγγιση μιας σχεδόν βέλτιστης λύσης για διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και επιβεβαιώνουν την υπεροχή τους από την άποψη τόσο της καλύτερης λύσης, όσο και της σταθερότητας αυτής.

2.2 Πολυπλοκότητα προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, έχουν συνήθως ως στόχο τους την μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος, ενώ παράλληλα υπόκεινται σε περιορισμούς κόστους, όγκου και βάρους κατασκευής. Το τεχνολογικό σύστημα που μελετάται σε κάθε περίπτωση, αποτελείται από συνδεδεμένα υποσυστήματα, τα οποία με την σειρά τους αποτελούνται από ένα πλήθος παράλληλα συνδεδεμένων εξαρτημάτων. Η λειτουργία ενός υποσυστήματος απαιτεί τουλάχιστον ένα εξάρτημα. Βασιζόμενα στις αρχές της αξιοπιστίας, συνδέοντας περισσότερα εφεδρικά εξαρτήματα σε παραλληλία, η αξιοπιστία του εν λόγω υποσυστήματος αυξάνει. Αυτό συμβαίνει καθώς αν κάποιο εξάρτημα αστοχήσει, υπάρχει τουλάχιστον ένα εφεδρικό το οποίο βρίσκεται σε λειτουργία και κατά συνέπεια το υποσύστημα.

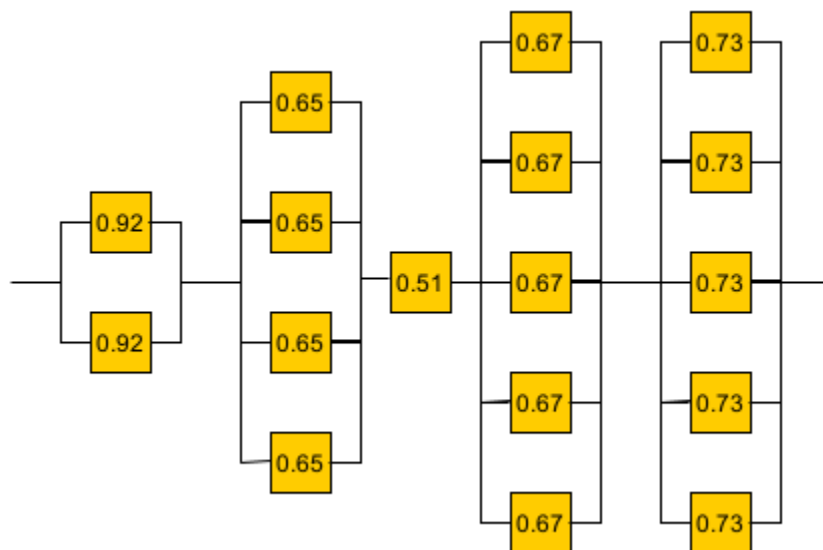
Συνεπώς η απόφαση που καλείται κανείς να λάβει, είναι να επιλέξει το πλήθος των παράλληλα συνδεδεμένων εξαρτημάτων και την αξιοπιστία, που τα περιγράφει για κάθε υποσύστημα του συστήματος που εξετάζεται. Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι οι τιμές της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων $[r_1, r_2, \dots, r_m]$ για κάθε ένα από τα m υποσυστήματα καθώς και το πλήθος των εξαρτημάτων κάθε υποσυστήματος $[n_1, n_2, \dots, n_m]$, που είναι σε παράλληλη σύνδεση.

Το Σχήμα 2.1 αναπαριστά ένα σύστημα που αποτελείται από 5 υποσυστήματα συνδεδεμένα σε σειρά, όπου φαίνεται ένα παράδειγμα λύσης. Η λύση αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί από το διάνυσμα $[\vec{r}; \vec{n}] = [0.92, 0.65, 0.51, 0.67, 0.73; 2, 4, 1, 5, 5]$, το οποίο προέρχεται από την σύμπτυξη των δύο παραπάνω διανυσμάτων, δηλαδή της αξιοπιστίας και του πλήθους των εξαρτημάτων κάθε υποσυστήματος. Θα μπορούσε κανείς να επιλέξει ένα πολύ μεγάλο πλήθος εξαρτημάτων κατώτατης αξιοπιστίας (π.χ. $r = 0.01$) για κάθε υποσύστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Όπως είναι προφανές μια τέτοια στρατηγική θα

οδηγούσε σε αύξηση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος, ωστόσο θα πρόκυπτε υπέρβαση της διαθεσιμότητας των πόρων. Πιο συγκριμένα, μια ραγδαία αύξηση στο πλήθος των εφεδρικών εξαρτημάτων, αναλογεί στην αύξηση του συνολικού κόστους, όγκου και βάρους του εξεταζόμενου συστήματος. Μια ακόμη στρατηγική, θα μπορούσε να είναι η επιλογή ενός εξαρτήματος μέγιστης αξιοπιστίας (π.χ. $r = 0.99$) για κάθε υποσύστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Παρομοίως, μια τέτοια στρατηγική θα οδηγούσε σε αύξηση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος, ωστόσο θα πρόκυπτε υπέρβαση της διαθεσιμότητας του κόστους. Η επιλογή εξαρτημάτων υψηλής αξιοπιστίας, αναλογεί σε ραγδαία αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος.

Κατ' επέκταση, τα εν λόγω προβλήματα αποτελούνται από μεγάλο πλήθος μεταβλητών απόφασης, οι οποίες ορίζονται για διαφορετικό εύρος τιμών. Όσο μεγαλύτερο το πλήθος των μεταβλητών και το διάστημα στο οποίο ορίζονται, τόσες περισσότερες πιθανές λύσεις προκύπτουν. Έτσι, ο έλεγχος όλων των πιθανών λύσεων απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ και χρόνο.

Όπως περιγράφεται από τον Chern (1992) τα προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας (ακόμη και το πιο απλό, όπως το σειριακό σύστημα) απαιτούν αρκετό χρόνο και υπολογιστική ισχύ κατά την επίλυση τους. Η δυσκολία και απαίτηση αυτών των πόρων ορίζεται ως πολυπλοκότητα χρόνου και συγκεκριμένα τα προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας ανήκουν στην NP-δυσμενή (NP-hard) κλάση πολυπλοκότητας, δηλαδή αν προσεγγιστούν από κλασσικές μεθόδους επιλύονται σε εκθετικό χρόνο.

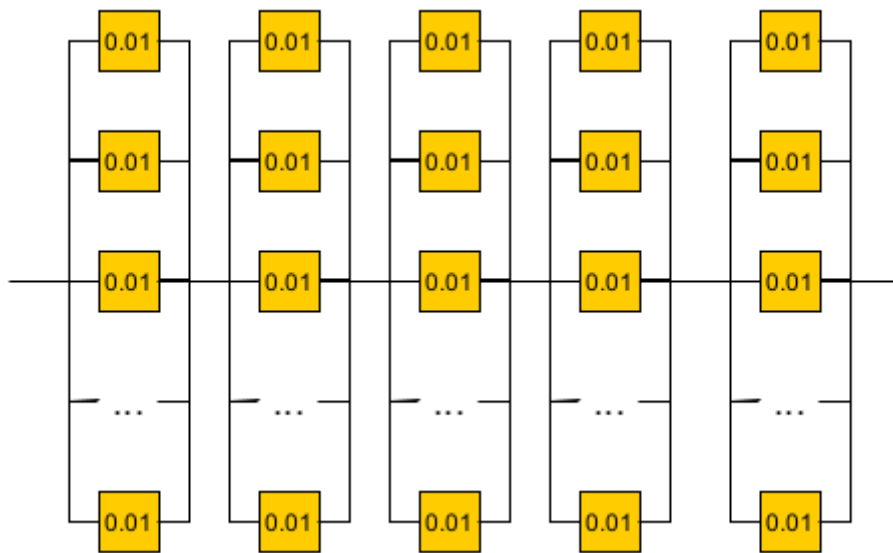


Σχήμα 2.1: Παράδειγμα λύσης σειριακού συστήματος 5 υποσυστημάτων

Πολλές κλασσικές μέθοδοι όπως οι πολλαπλασιαστές Lagrange μαζί με Μέθοδο Διακλάδωσης Και Οριοθέτησης (Lagrange Multipliers with Branch And Bound Method) (W.

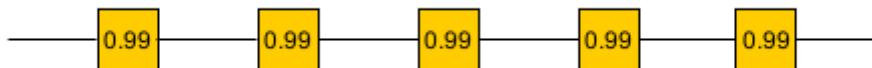
Κυο et al., 1987) και ο Δυναμικός Προγραμματισμός (Y. Nakagawa and S. Miyazaki, 1981) έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, όμως έχουν δημιουργηθεί για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων και αδυνατούν να επιλύσουν μη γραμμικά προβλήματα μεγάλου μεγέθους με πολλαπλούς περιορισμούς, όπως αυτό της κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας (Chen, 2006), σε πρακτικό χρόνο.

Επιπρόσθετα, η δυσκολία των εν λόγω προβλημάτων βρίσκεται στους μη-γραμμικούς περιορισμούς, όπου η απόφαση που καλείται κανείς να λάβει απαιτεί την υψηλότερα δυνατή αξιοπιστία διατηρώντας ισορροπία μεταξύ των διαθέσιμων πόρων, όπως του συνολικού κόστους, βάρους και όγκου.



Σχήμα 2.2: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων μεγάλου πλήθους εξαρτημάτων

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η πολυπλοκότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας η προσέγγιση με χρήση νοημών εξελικτικών μεθόδων αποτέλεσε ενδιαφέρον για την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

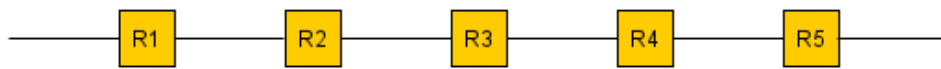


Σχήμα 2.3: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων εξαρτημάτων υψηλής αξιοπιστίας

2.3 Γενικός Φορμαλισμός Προβλημάτων Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας

Όπως αναφέρεται προηγουμένως, η επίτευξη υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας επιτυγχάνεται αυξάνοντας την αξιοπιστία των εξαρτημάτων (reliability allocation) κάθε υποσυστήματος, προσθέτοντας εφεδρικά εξαρτήματα (redundancy allocation) σε παραλληλίες των υπάρχοντων υποσυστημάτων ή εφαρμόζοντας και τα δύο (reliability – redundancy allocation).

Σε ένα πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας το σύστημα αποτελείται από m συνδεδεμένα υποσυστήματα αξιοπιστίας R_i , όπως στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων.

Ο στόχος του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας είναι να βρεθεί το διάνυσμα $r = [r_1, r_2, \dots, r_m]$ που μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία R_s του συστήματος και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση (Mellal and Zio, 2016):

$$\text{Maximize } R_s(r) = R_s(r_1, r_2, \dots, r_m) \quad (2.1)$$

Όσον αφορά το πρόβλημα κατανομής εφεδρείας, το κάθε υποσύστημα περιέχει ένα πλήθος n_i ιδίων εξαρτημάτων αξιοπιστίας r_i , όπως φαίνεται στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Στόχος είναι να βρεθεί το διάνυσμα $n = [n_1, n_2, \dots, n_m]$ που μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία R_s του συστήματος και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση (Mellal and Zio, 2016):

$$\text{Maximize } R_s(n) = R_s(n_1, n_2, \dots, n_m) \quad (2.2)$$

Η κατανομή των εφεδρικών συστημάτων μπορεί να προσδιοριστεί με δύο διαφορετικές στρατηγικές: την ενεργή εφεδρεία (active redundancy) και την εφεδρεία αναμονής (standby redundancy). Στην ενεργή εφεδρεία (active redundancy), σε κάθε υποσύστημα, τα εφεδρικά εξαρτήματα λειτουργούν ταυτόχρονα κάθε στιγμή λειτουργίας του υποσυστήματος, ανεξάρτητα αν απαιτείται μόνο ένα εξάρτημα για την λειτουργία του. Αντιθέτως, στην εφεδρεία αναμονής (standby redundancy), σε κάθε υποσύστημα, τα εφεδρικά εξαρτήματα προστατεύονται από λειτουργικές καταπονήσεις καθώς βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας και τίθενται σε λειτουργία διαδοχικά, αν αστοχήσει το εξάρτημα που λειτουργεί εκείνη την στιγμή, με σκοπό την διατήρηση της λειτουργίας του υποσυστήματος (Abouei Ardakan and Zeinal Hamadani, 2014). Όπως διαπιστώνεται από την βιβλιογραφία, όλες οι εργασίες που μελετούν το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας εξετάζουν την στρατηγική ενεργής

εφεδρείας (active redundancy), εστιάζοντας στην ανάπτυξη νέων, τροποποιημένων ή συνδυασμένων μετα-ευρετικών αλγορίθμων (Chen, 2006).

Συνεπώς το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας περιγράφει τον συνδυασμό των δύο παραπάνω προβλημάτων. Ο στόχος του, ομοίως με τα προηγούμενα, είναι η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας R_s , η οποία πλέον είναι συνάρτηση της αξιοπιστίας r_i καθώς και του πλήθους n_i των ίδιων εξαρτημάτων σε κάθε υποσύστημα του συστήματος. Περιγράφεται από την παρακάτω σχέση (Mellal and Zio, 2016):

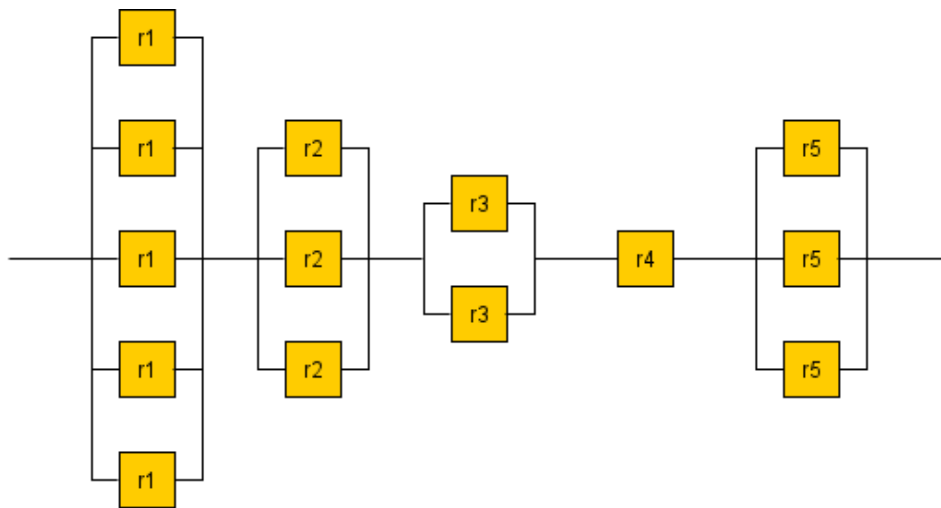
$$\text{Maximize } R_s(r, n) = R_s(r_1, r_2, \dots, r_m; n_1, n_2, \dots, n_m) \quad (2.3)$$

Με g_j συμβολίζεται ο j -οστός περιορισμός του προβλήματος, όπου συνήθως αφορά το βάρος, τον όγκο ή το κόστος του συστήματος, με b το ανώτερο όριο του j -οστού περιορισμού. Επίσης η αξιοπιστία r_i των m συνδεδεμένων εξαρτημάτων είναι πραγματικός αριθμός που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$ και το πλήθος n_i των εφεδρικών εξαρτημάτων κάθε υποσυστήματος είναι θετικός ακέραιος αριθμός που δεν ξεπερνάει το όριο $n_{i,max}$. Οι περιορισμοί μπορούν να περιγραφούν από τις σχέσεις (2.4), (2.5) και (2.6).

$$g_j(r_1, r_2, \dots, r_m; n_1, n_2, \dots, n_m) \leq b \quad (2.4)$$

$$0 \leq r_i \leq 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

$$1 \leq n_i \leq n_{i,max} \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα κατανομής εφεδρικών εξαρτημάτων 5 υποσυστημάτων, σειριακού συστήματος.

Για παράδειγμα, το Σχήμα 2.5 απεικονίζει ένα πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας εφεδρείας ενός συστήματος που αποτελείται από πέντε υποσυστήματα συνδεδεμένα σε σειρά. Όσο αυξάνεται η αξιοπιστία r_i και το πλήθος n_i των εξαρτημάτων, οι περιορισμοί $g_j(r, n)$ του

συστήματος τείνουν να παραβιαστούν. Αυτό συμβαίνει καθώς μια αύξηση στο πλήθος των εφεδρικών εξαρτημάτων σε κάποιο υποσύστημα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής ενώ παράλληλα αυξάνεται ο όγκος και το βάρος του συστήματος. Επίσης, η αντικατάσταση των εξαρτημάτων, κάποιου υποσυστήματος, με άλλα μεγαλύτερης αξιοπιστίας, αναλογεί σε αύξηση του συνολικού κόστους (Garg, Rani and Sharma, 2013). Συνεπώς, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω στον φορμαλισμό των εν λόγω περιορισμών, το συνολικό κόστος εξαρτάται από την αξιοπιστία r_i και το πλήθος n_i των εξαρτημάτων, ενώ το σύνολο βάρους και όγκου, μονάχα από το πλήθος n_i των εξαρτημάτων.

Ο στόχος είναι να βρεθεί το διάνυσμα $[r, n] = [r_1, r_2, \dots, r_m; n_1, n_2, \dots, n_m]$, όπου r_i η αξιοπιστία των εξαρτημάτων του i -οστού υποσυστήματος και n_i το πλήθος των ιδίων εξαρτημάτων αξιοπιστίας r_i σε κάθε υποσύστημα, που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία του συστήματος $R_s(r, n)$, όπου υπολογίζεται από την σχέση (2.7). Ωστόσο, προκειμένου να θεωρεί εφικτή (αποδεκτή) η υποψήφια λύση απαιτείται να μην παραβιάζεται κανένας από τους περιορισμούς $g_j(r, n)$.

$$R_s(r, n) = \prod_{i=1}^m R_i(r, n) \quad (2.7)$$

Η παραπάνω σχέση αναφέρεται στην περίπτωση που τα υποσυστήματα είναι συνδεδεμένα σε σειρά, όπου ως R_i ορίζεται η αξιοπιστία του i -οστού υποσυστήματος και υπολογίζεται από τον σχέση:

$$R_i(r, n) = 1 - (1 - r_i)^{n_i} \quad (2.8)$$

Εντούτοις, στην περίπτωση που τουλάχιστον δύο υποσυστήματα είναι συνδεδεμένα παράλληλα η συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$R_s(r, n) = \prod_{i=1}^m [1 - R_i(r, n)] \quad (2.9)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μελέτες περίπτωσης, όπου θα χρησιμοποιηθούν ως προβλήματα ελέγχου αποδοτικότητας (benchmark). Μεταξύ αυτών υπάρχουν μελέτες περίπτωσης που περιγράφονται και από τα τρία προβλήματα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα. Οι πρώτες τρεις μελέτες περίπτωσης των (Xu, Kuo and Lin, 1990; Hikita et al., 1992; Hsieh, Chen and Bricker, 1998) παρουσιάζουν τα προβλήματα μη – γραμμικών περιορισμών σειριακού συστήματος (Series System), σειριακού – παράλληλου συστήματος (Series – Parallel System) και περίπλοκου συστήματος γέφυρας (Complex Bridge System). Επιπρόσθετα οι (Dhingra, 1992; Yokota et al., 1996) παρουσιάζουν το πρόβλημα συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης (Overspeed Protection System), οι (Zhang et al., 2013) το πρόβλημα

συστήματος μεγάλης κλίμακας (Large Scale System), οι (Agarwal and Sharma, 2010) τα προβλήματα συστημάτων δομής δέκα και δεκαπέντε υποσυστημάτων (Ten & Fifteen Unit System) και οι (Garg and Sharma, 2013) παρουσιάζουν την περίπτωση του συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων (Pharmaceutical Plant System). Όλες αυτές οι περιπτώσεις φαίνεται να αποτελούν προβλήματα μεγιστοποίησης της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος, με μη γραμμικούς περιορισμούς.

Επιπρόσθετα, μελετώνται οι περιπτώσεις των (V. Ravi, B. S. N. Murty, and J. Reddy, 1997), όπου παρουσιάζουν τα προβλήματα περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου (Complex Network Bridge System) και συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας (Life Support In Space Capsule). Οι περιπτώσεις αυτές αποτελούν προβλήματα ελαχιστοποίησης του κόστους κατασκευής του συστήματος, διατηρώντας το επίπεδο αξιοπιστίας υψηλό.

Οι μελέτες περίπτωσης ακολουθούν τον φορμαλισμό των εργασιών από τις οποίες μελετήθηκαν. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει την μαθηματική σημειογραφία που χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία, ενώ παράλληλα περιέχει τον προσδιορισμό του κόστους ενός εξαρτήματος συγκεκριμένης αξιοπιστίας καθώς και αυτόν του κόστους των υλικών διασύνδεσης των εξαρτημάτων.

Πίνακας 1: Μαθηματική σημειογραφία μελετών περίπτωσης.

Συμβολισμός	Περιγραφή
R_s	Συνολική αξιοπιστία συστήματος
m	Πλήθος υποσυστημάτων στο σύστημα
r_i	Αξιοπιστία κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
r	$= (r_1, r_2, \dots, r_m)$ Διάνυσμα κατανομής αξιοπιστίας εξαρτημάτων
n_i	Πλήθος εφεδρικών εξαρτημάτων i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
n	$= (n_1, n_2, \dots, n_m)$ Διάνυσμα κατανομής εφεδρικών εξαρτημάτων
R_i	$= 1 - (1 - r_i)^{n_i}$, αξιοπιστία του i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
$n_{i,max}$	Μέγιστος αριθμός εφεδρικών εξαρτημάτων i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
M	Πλήθος περιορισμών
g_j	j -οστός περιορισμός, $j = 1, 2, \dots, M$
$\alpha_i \cdot (-T/\ln r_i)^{\beta_i}$	Κόστος απόκτησης κάθε εξαρτήματος αξιοπιστίας r_i στο i -οστό υποσύστημα, $1 \leq i \leq m$
T	Χρόνος λειτουργίας κατά τον οποίο ένα εξάρτημα δεν πρέπει να αστοχήσει
w_i	Βάρος κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
v_i	Όγκος κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
α_i, β_i	Παράμετροι που συμβολίζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά (συντελεστής διαμόρφωσης και κλίμακας αντίστοιχα) κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος, $1 \leq i \leq m$
W, C, V	Το ανώτερο όριο βάρους, κόστους και όγκου του συστήματος, αντίστοιχα.
$\exp(n_i/4)$	Συντελεστής υλικών διασύνδεσης εξαρτημάτων.

2.4 Εφαρμογές σε προβλήματα Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας

2.4.1 Μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος

Η περίπτωση του σειριακού συστήματος (Series System) (Garg, Rani and Sharma, 2013, Garg, 2015b; a; Hsieh, Chen and Bricker, 1998; Mellal and Zio, 2016) περιγράφει ένα πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας ενός συστήματος που αποτελείται από 5 υποσυστήματα συνδεδεμένα σε σειρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Το κάθε υποσύστημα i αποτελείται από n_i εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία, όπως το παράδειγμα του συστήματος στο Σχήμα 2.5.

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάλυμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος. Ο στόχος υπολογίζεται από την σχέση (2.10) για $m = 5$, όσο και το πλήθος των υποσυστημάτων, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^m [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (2.10)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν τον όγκο, το κόστος κατασκευής και το βάρος του συστήματος.

Όσον αφορά τον όγκο, ο εν λόγω περιορισμός περιγράφεται από τη σχέση:

$$g_1(n) = \sum_{i=1}^m v_i \cdot n_i^2 \leq V \quad (2.11)$$

όπου με v_i συμβολίζεται ο όγκος κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος, n_i το πλήθος των εξαρτημάτων που περιλαμβάνει και V το ανώτερο όριο του όγκου.

Όσον αφορά το κόστος κατασκευής, ο εξεταζόμενος περιορισμός περιγράφεται από τη σχέση:

$$g_2(r, n) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot (-T/\ln r_i)^{\beta_i} \cdot [n_i + \exp(n_i/4)] \leq C \quad (2.12)$$

όπου $\alpha_i \cdot (-T/\ln r_i)^{\beta_i}$ συμβολίζεται το κόστος του εξαρτήματος αξιοπιστίας r_i του i -οστού υποσυστήματος. Οι παράμετροι β_i και α_i εκφράζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του εξαρτήματος και συγκεκριμένα τους συντελεστές διαμόρφωσης (shaping factor) και κλίμακας (scaling factor) αντίστοιχα. Ως T εκφράζεται ο χρόνος λειτουργίας κάθε εξαρτήματος κατά τον οποίο δεν πρέπει να αστοχήσει (να μην λειτουργεί), n_i είναι το πλήθος των εξαρτημάτων που

περιλαμβάνει το i -οστό υποσύστημα, $\exp(n_i/4)$ είναι ο συντελεστής συνυπολογισμού των υλικών διασύνδεσης στο συνολικό κόστος και C το ανώτερο όριο του κόστους.

Όσον αφορά το βάρος του συστήματος, ο συγκεκριμένος περιορισμός περιγράφεται από την σχέση:

$$g_3(n) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot n_i \cdot \exp(n_i/4) \leq W \quad (2.13)$$

όπου με w_i συμβολίζεται το βάρος κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος, n_i το πλήθος των εξαρτημάτων που περιλαμβάνει, $\exp(n_i/4)$ είναι συντελεστής συνυπολογισμού των υλικών διασύνδεσης στο συνολικό βάρος και W το ανώτερο όριο του βάρους.

Αξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι οι παραπάνω περιορισμοί δεν εξαρτώνται από την τοπολογία (συνδεσμολογία υποσυστημάτων) των συστημάτων. Η διαφορά των περιορισμών μεταξύ των μελετών περίπτωσης βρίσκεται στα άνω όρια των εν λόγω περιορισμών καθώς και στον όγκο και βάρος των εξαρτημάτων.

Τέλος, οι Hsieh, Chen και Bricker (1998) ορίζουν ότι η αξιοπιστία r_i δεν θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5 καθώς επίσης το κάθε υποσύστημα μπορεί να λαμβάνει έως 5 εφεδρικά εξαρτήματα. Ο εν λόγω φορμαλισμός ακολουθείται και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

$$0.5 \leq r_i \leq 1 \quad , \quad 1 \leq n_i \leq 5 \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, 5 \quad (2.14)$$

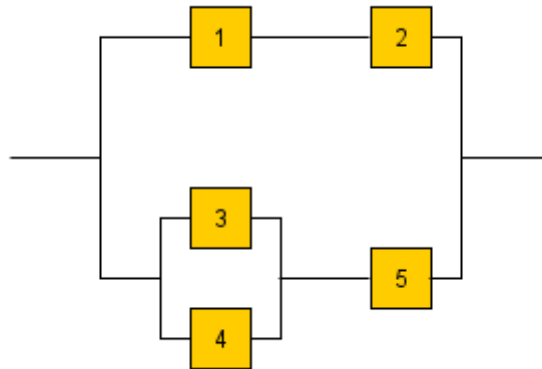
2.4.2 Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος

Το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας της περίπτωσης του σειριακού παράλληλου συστήματος (Series – Parallel Problem) (M. Hikita et al., 1992; Hsieh, Chen and Bricker, 1998; Chen, 2006; Hsieh and You, 2011; Mellal and Zio, 2016) αποτελείται από 5 υποσυστήματα συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το κάθε υποσύστημα i αποτελείται από n_i εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία, όπως το παράδειγμα του συστήματος στο Σχήμα 2.5.

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάλυμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση. Η εν λόγω σχέση προκύπτει από την τοπολογία του συστήματος (Σχήμα 2.5), ακολουθώντας την σχέση (2.7) για τα υποσυστήματα που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και την (2.9) για εκείνα που είναι σε παραλληλία.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } R_s(r, n) \\ = 1 - (1 - R_1 R_2) \cdot [1 - (R_3 + R_4 - R_3 R_4) R_5] \end{aligned} \quad (2.15)$$

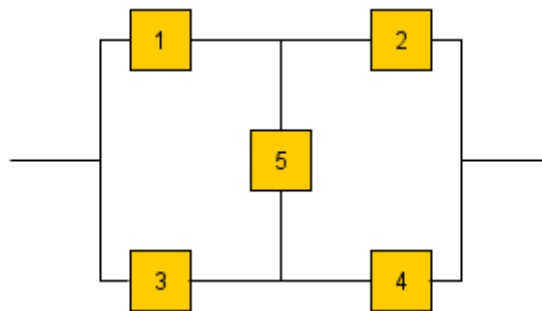
όπου R_i η αξιοπιστία του i -οστού υποσυστήματος που υπολογίζεται από την σχέση $R_i = 1 - (1 - r_i)^{n_i}$, όπου n_i τα εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία.



Σχήμα 2.6: Σειριακό - παράλληλο σύστημα.

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινói με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (2.11), (2.12), (2.13) και (2.14) για $m = 5$.

2.4.3 Μελέτη Περίπτωσης Περίπλοκου Συστήματος Γέφυρας



Σχήμα 2.7: Περίπλοκο σύστημα γέφυρας.

Η μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας (Complex Bridge System) (M. Hikita et al., 1992; Coelho, 2009; Garg, Rani and Sharma, 2013; Valian et al., 2013; Garg, 2015b; 2015b; Mellal and Zio, 2016) απαρτίζει ένα πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας και αποτελείται από 5 συνδεδεμένα υποσυστήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Το κάθε υποσύστημα i αποτελείται από n_i εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία, όπως το παράδειγμα του συστήματος στο Σχήμα 2.5.

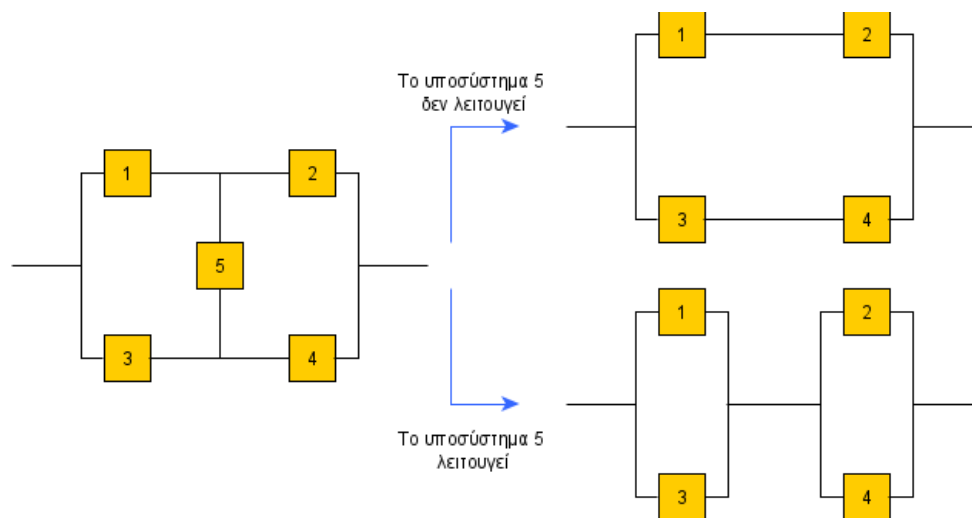
Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος. Η ιδιαιτερότητα του

προβλήματος είναι το υποσύστημα 5 όπου ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται, δηλαδή αν λειτουργεί ή όχι, αλλάζει η δομή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική αξιοπιστία του συστήματος θα υπολογίσουμε την αξιοπιστία με ενδεχόμενο το ενδιάμεσο υποσύστημα 5 να λειτουργεί με πιθανότητα r_5 και με ενδεχόμενο το ενδιάμεσο υποσύστημα 5 να μην λειτουργεί με πιθανότητα $1 - r_5$.

Ο στόχος του προβλήματος υπολογίζεται με το θεώρημα ολικής πιθανότητας, δηλαδή το άθροισμα της αξιοπιστίας κάθε ενδεχόμενου επί την πιθανότητα του αντίστοιχου ενδεχομένου. Η συνάρτηση του στόχου που προκύπτει περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } R_5(r, n) &= R_5[1 - (1 - R_1)(1 - R_3)] \\
 &\times [1 - (1 - R_2)(1 - R_4)] \\
 &+ (1 - R_5)[1 - (1 - R_1R_2)(1 \\
 &\quad - R_3R_4)]
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

όπου R_i η αξιοπιστία του i -οστού υποσυστήματος που υπολογίζεται από την σχέση $R_i = 1 - (1 - r_i)^{n_i}$, όπου n_i τα εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία.

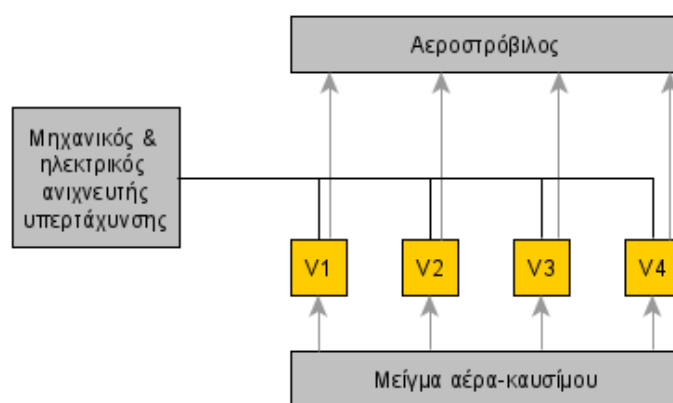


Σχήμα 2.8: Πιθανά ενδεχόμενα περίπλοκου συστήματος γέφυρα.

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινói με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (2.11), (2.12), (2.13) και (2.14) για $m = 5$.

2.4.4 Μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης

Μια ακόμη μελέτη κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας είναι αυτή του συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης¹ (Overspeed Protection System), (Coelho, 2009; Hsieh and You, 2011; Garg, Rani and Sharma, 2013; Valian et al., 2013; Zhang et al., 2013; Mellal and Zio, 2016) και αποτελεί ένα σειριακό σύστημα προστασίας, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.9. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από τέσσερις σειριακά συνδεδεμένες βαλβίδες (υποσυστήματα) που αποκόπτουν την παροχή καυσίμου σε περίπτωση υπερτάχυνσης. Κάθε βαλβίδα i αποτελείται από n_i εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία.



Σχήμα 2.9: Σύστημα προστασίας υπερτάχυνσης.

Η εν λόγω μελέτη περίπτωσης αποτελεί υποκατηγορία της Εφαρμογές σε προβλήματα Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας

Μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των δύο μελετών βρίσκεται στα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων καθώς και στα ανώτατα όρια των περιορισμών. Πιο συγκεκριμένα, ο όγκος v_i κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος και το ανώτερο όριο του όγκου V στον περιορισμό (2.11). Όσον αφορά τον περιορισμό (2.12), διαφέρουν οι συντελεστές διαμόρφωσης β_i (shaping factor) και κλίμακας a_i (scaling factor) κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος και το ανώτερο όριο του κόστους C . Τέλος στον περιορισμό (2.13), αλλάζει το βάρος w_i κάθε εξαρτήματος του i -οστού υποσυστήματος και το ανώτερο όριο του βάρους W .

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος. Ο στόχος υπολογίζεται από την σχέση και είναι ο εξής:

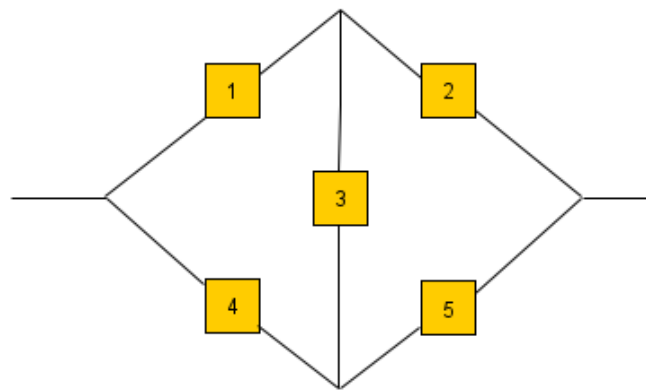
¹ Η υιοθέτηση του όρου «υπερτάχυνση» έχει γίνει από την διπλωματική εργασία του Σκαρλατάκης (2006).

$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^4 [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (2.17)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (2.11), (2.12) και (2.13) ενώ επίσης η αξιοπιστία r_i δεν θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5 και το κάθε υποσύστημα μπορεί να λαμβάνει έως 10 εφεδρικά εξαρτήματα.

$$0.5 \leq r_i \leq 1, 1 \leq n_i \leq 10 \text{ για } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.18)$$

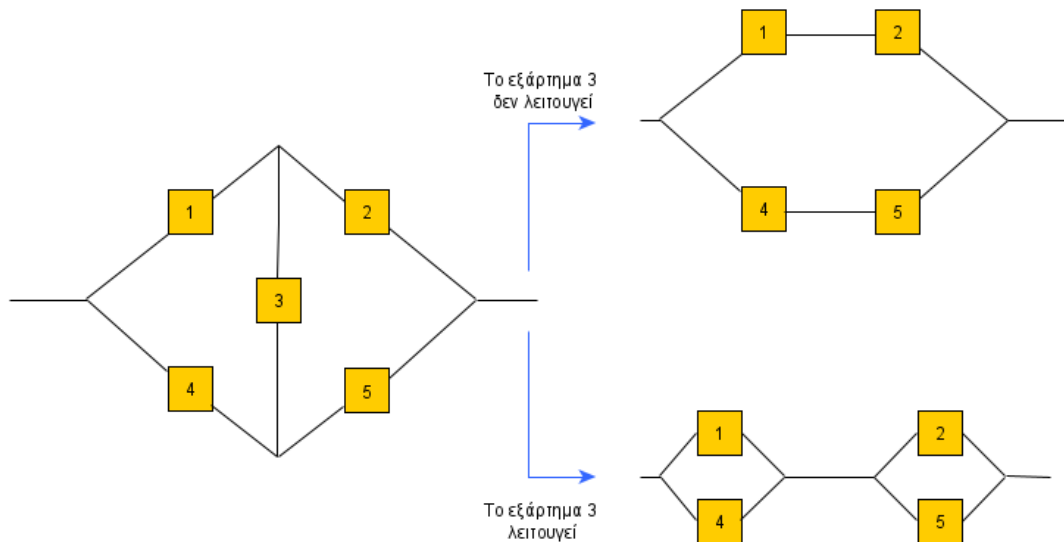
2.4.5 Μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου



Σχήμα 2.10: Σύστημα γέφυρας δικτύου.

Ένα από τα προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας αποτελεί η μελέτη περίπτωσης ενός συστήματος γέφυρας δικτύου (Complex Bridge Network System) (V. Ravi, B. S. N. Murty, and J. Reddy, 1997; Ravi, Reddy and Zimmermann, 2000; Garg, Rani and Sharma, 2013; Mellal and Zio, 2016), το οποίο αποτελείται από 5 εξαρτήματα συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.

Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος, όπως στο πρόβλημα του περίπλοκου συστήματος είναι το εξάρτημα 3 όπου ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται, δηλαδή αν λειτουργεί ή όχι, αλλάζει την δομή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική αξιοπιστία $R_s(r)$ του συστήματος θα υπολογίσουμε την αξιοπιστία με ενδεχόμενο το ενδιάμεσο εξάρτημα 3 να λειτουργεί με πιθανότητα r_3 και με ενδεχόμενο το ενδιάμεσο εξάρτημα 3 να μην λειτουργεί με πιθανότητα $1 - r_3$, χρησιμοποιώντας την σχέση (2.7).



Σχήμα 2.11: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος γέφυρας δικτύου.

Η συνολική αξιοπιστία υπολογίζεται με το θεώρημα ολικής πιθανότητας, δηλαδή το άθροισμα της αξιοπιστίας κάθε ενδεχόμενου επί την πιθανότητα του αντίστοιχου ενδεχομένου και εκφράζεται από την εξής συνάρτηση:

$$\begin{aligned}
 R_s(r) = & r_1 r_4 + r_3 r_5 + r_1 r_3 r_5 + 2r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 - r_2 r_3 r_4 r_5 - r_1 r_3 r_4 r_5 \\
 & - r_1 r_2 r_4 r_5 \\
 & - r_1 r_2 r_4 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_4
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Η εν λόγω μελέτη περίπτωσης αποτελεί υποκατηγορία της μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας. Ωστόσο, ο στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης r που θα ελαχιστοποιεί το κόστος κατασκευής $C_s(r)$ του συστήματος και εκφράζεται από την σχέση:

$$\text{Minimize } C_s(r) = \sum_{i=1}^5 a_i \exp\left(\frac{b_i}{1-r_i}\right) \tag{2.20}$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν την συνολική αξιοπιστία του συστήματος $R_s(r)$ όπου θα πρέπει να είναι σχεδόν η βέλτιστη:

$$0.99 \leq R_s \leq 1 \tag{2.21}$$

Επίσης η αξιοπιστία r_i του κάθε εξαρτήματος δεν θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5 και οι παράμετροι a_i και b_i που εκφράζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων να είναι ίσα με 1 και 0.0003 αντιστοίχως για κάθε i .

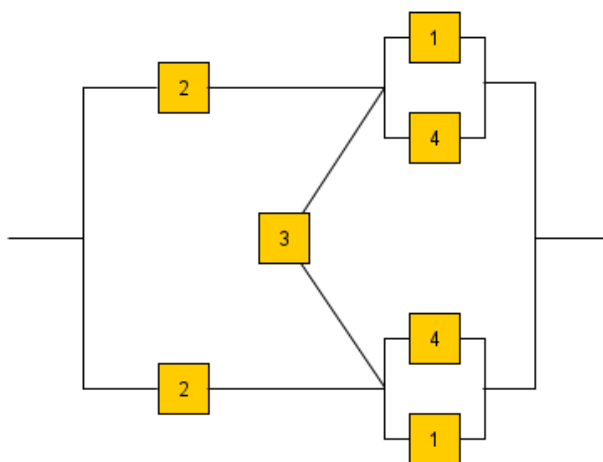
$$a_i = 1, b_i = 0.0003, \forall i \quad (2.22)$$

$$r_i \in [0,1] \subset R^+ \quad (2.23)$$

2.4.6 Μελέτη περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας

Οι (Ravi, Reddy and Zimmermann, 2000; Mellal and Zio, 2016) παρουσιάζουν ένα ακόμη πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας ενός συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα (Life-support in space capsule) που αποτελείται από 4 εξαρτήματα συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12.

Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος, όπως στο πρόβλημα του περίπλοκου συστήματος είναι το εξάρτημα 3 όπου ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται, δηλαδή αν λειτουργεί ή όχι, αλλάζει την δομή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική αξιοπιστία $R_s(r)$ του συστήματος θα υπολογίσουμε την αξιοπιστία με ενδεχόμενο το ενδιάμεσο εξάρτημα 3 να λειτουργεί με πιθανότητα r_3 και με ενδεχόμενο το ενδιάμεσο εξάρτημα 3 να μην λειτουργεί με πιθανότητα $1 - r_3$, χρησιμοποιώντας την σχέση (2.7).



Σχήμα 2.12: Σύστημα υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.

Η συνολική αξιοπιστία υπολογίζεται με το θεώρημα ολικής πιθανότητας, δηλαδή το άθροισμα της αξιοπιστίας κάθε ενδεχόμενου επί την πιθανότητα του αντίστοιχου ενδεχομένου και εκφράζεται από την εξής συνάρτηση:

$$R_s(r) = 1 - r_3[(1 - r_1)(1 - r_4)]^2 - (1 - r_3)[1 - r_2(1 - (1 - r_1)(1 - r_4))]^2 \quad (2.24)$$

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης $[r]$ που θα ελαχιστοποιεί το κόστος κατασκευής $C_s(r)$ του συστήματος και εκφράζεται από την σχέση:

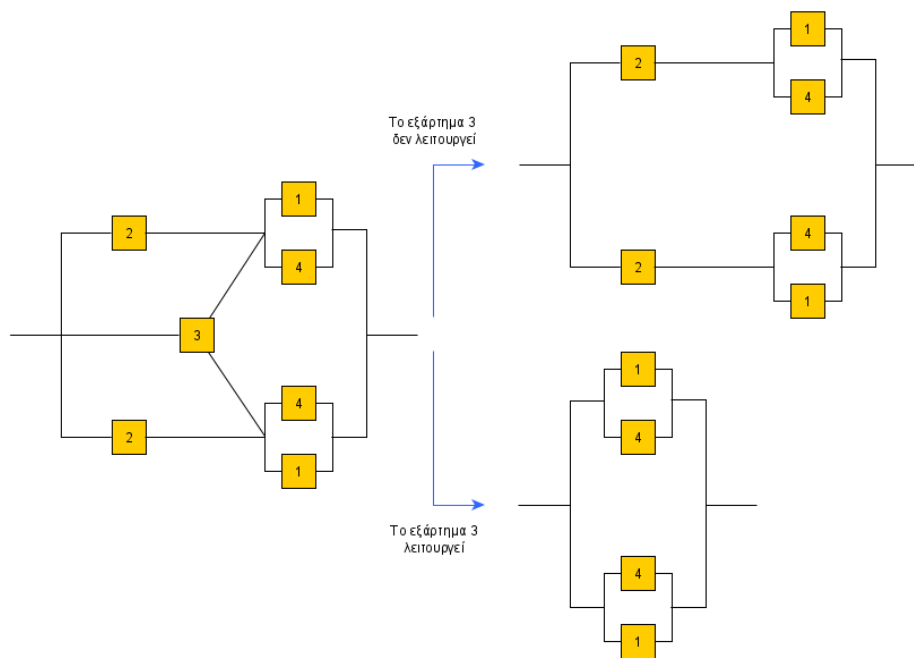
$$\text{Minimize } C_s(r) = \sum_{i=1}^4 K_i \left[\tan\left(\frac{\pi}{2} r_i\right) \right]^{a_i} \quad (2.25)$$

όπου K_i μια παράμετρος κόστους του i -οστού εξαρτήματος και a_i παράμετρος που εκφράζει κάποια φυσικά χαρακτηριστικά του i -οστού εξαρτήματος.

Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν την συνολική αξιοπιστία του συστήματος $R_s(r)$ όπου θα πρέπει να είναι σχεδόν η βέλτιστη όπως περιγράφεται στην σχέση (2.21).

Επίσης η αξιοπιστία r_i του κάθε εξαρτήματος δεν θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5, η παράμετρος a_i που εκφράζει τα φυσικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων να είναι ίση με 1 για κάθε i και η παράμετρος K_i να λαμβάνει τιμές από το διάνυσμα $[25, 25, 50, 37.5]$ για τα αντίστοιχα i .

$$a_i = 1, \forall i \quad (2.26)$$



Σχήμα 2.13: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα.

2.4.7 Μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας

Το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας ενός σειριακού συστήματος μεγάλης κλίμακας (Large Scale reliability – redundancy allocation problem) (Zhang et al., 2013; Mellal and Zio, 2016) συμπεριλαμβάνει είκοσι υποσυστήματα συνδεδεμένα όπως το Σχήμα 2.4.

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος. Ο στόχος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση για $m = 20$, όσο και το πλήθος των υποσυστημάτων:

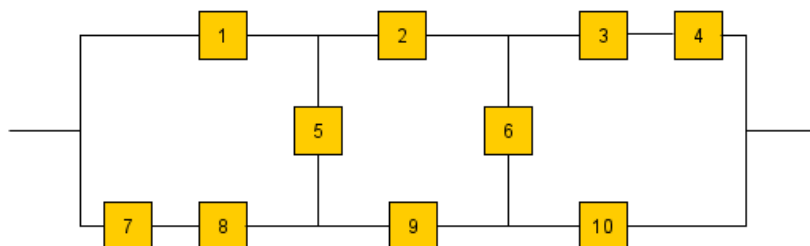
$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^{20} [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (2.27)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς της μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις από τις σχέσεις (2.11), (2.12) και (2.13) για $i = 1, 2, \dots, 20$ ενώ επίσης η αξιοπιστία r_i δεν θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5 και το κάθε υποσύστημα μπορεί να λαμβάνει έως 10 εφεδρικά εξαρτήματα.

$$0.5 \leq r_i \leq 1, 1 \leq n_i \leq 10 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 20 \quad (2.28)$$

2.4.8 Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων

Επιπλέον πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας ενός συστήματος που αποτελείται από δέκα υποσυστήματα (Ten Unit Structure reliability – redundancy allocation problem) (Mellal and Zio, 2016) συνδεδεμένα όπως αναδεικνύεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.

Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος, όπως στο πρόβλημα του περίπλοκου συστήματος είναι τα υποσυστήματα 5 και 6 όπου ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκονται, δηλαδή αν λειτουργούν ή όχι, αλλάζει την δομή του συστήματος. Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική αξιοπιστία $R_s(n)$ του συστήματος θα υπολογίσουμε την αξιοπιστία με ενδεχόμενα όλους του πιθανούς συνδυασμούς τα ενδιάμεσα υποσυστήματα 5 και 6 να λειτουργούν με πιθανότητα r_i και να μην λειτουργούν με πιθανότητα $1 - r_i$, χρησιμοποιώντας την σχέση (2.7).

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης $[n]$ που θα μεγιστοποιεί την αξιοπιστία $R_s(n)$ του συστήματος και υπολογίζεται με το θεώρημα ολικής πιθανότητας, δηλαδή το άθροισμα της αξιοπιστίας κάθε ενδεχόμενου επί την πιθανότητα του αντίστοιχου ενδεχομένου. Η συνάρτηση του στόχου που προκύπτει είναι η εξής:

$$\begin{aligned}
\text{Maximize } R_s(n) = & R_1 R_2 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_6 R_{10} (1 - R_3 + R_3 (1 - R_4)) + R_1 R_5 R_9 R_{10} \\
& \times (1 - R_2 + R_2 (1 - R_3) (1 - R_6) + R_2 R_3 (1 - R_4) (1 - R_6)) \\
& + R_7 R_8 R_9 R_{10} ((1 - R_1 + R_1 (1 - R_2) (1 - R_5)) \\
& + R_1 R_2 (1 - R_3) (1 - R_5) (1 - R_6)) \\
& + R_1 R_2 R_3 (1 - R_5) (1 - R_6) (1 - R_4)) \\
& + (R_2 R_3 R_4 R_5 R_7 R_8 (1 - R_1) (1 - R_9 + R_9 (1 - R_{10}))) \\
& + (1 - R_1) R_3 R_4 R_6 R_7 R_8 R_9 (1 - R_{10}) (1 - R_2 + R_2 (1 - R_5)) \\
& + R_1 (1 - R_2) R_3 R_4 R_6 R_7 R_8 R_9 (1 - R_{10})
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Όπου R_i η αξιοπιστία του i -οστού υποσυστήματος που υπολογίζεται από την σχέση $R_i = 1 - (1 - r_i)^{n_i}$ και n_i τα εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία.

Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν το κόστος κατασκευής του συστήματος και ισχύει ότι:

$$g_y(n) = \sum_{i=1}^{10} c_{yi} \cdot n_i \leq b_y, y = 1, 2, \dots, M \tag{2.30}$$

όπου $b_y = rand(1.5, 3.5) \cdot \sum_{i=1}^{10} c_{yi}$ το ανώτατο κόστος κατασκευής. Οι τιμές c_{yi} παράγονται τυχαία στο διάστημα $[0, 100]$ και πολλαπλασιάζονται με έναν τυχαίο αριθμό στο διάστημα $[1.5, 3.5]$ καθιστώντας τον περιορισμό πιο ελαστικό ή πιο αυστηρό. Τα r_i παράγονται τυχαία στο διάστημα $[0.6, 0.85]$, το M αναφέρεται στο πλήθος των περιορισμών και λαμβάνεται ως πιθανό σενάριο για $M = 5$.

Τα εφεδρικά εξαρτήματα του i -οστού υποσυστήματος δεν έχουν περιορισμό πλήθους n_i και ισχύει ότι:

$$n_i \geq 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 10 \tag{2.31}$$

2.4.9 Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων

Παρόμοιο με την παραπάνω μελέτη περίπτωσης είναι αυτή ενός συστήματος που αποτελείται από δεκαπέντε υποσυστήματα (Fifteen Unit Structure) (Agarwal and Sharma, 2010; Valian et al., 2013; Garg, 2015a; Mellal and Zio, 2016) συνδεδεμένα όπως αναδεικνύεται στο Σχήμα 2.15.

Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος, όπως στο πρόβλημα του περίπλοκου συστήματος, είναι τα υποσυστήματα 7 και 8 όπου ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκονται, δηλαδή αν λειτουργούν ή όχι, αλλάζει την δομή του συστήματος. Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική αξιοπιστία $R_s(r)$ του συστήματος θα υπολογίσουμε την αξιοπιστία με ενδεχόμενα όλους του πιθανούς συνδιασμούς τα ενδιάμεσα υποσυστήματα 7 και 8 να λειτουργούν με πιθανότητα r_i και να μην λειτουργούν με πιθανότητα $1 - r_i$, χρησιμοποιώντας την σχέση (2.7).

$$\begin{aligned}
\text{Maximize } R_s(n) &= R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 \\
&+ R_9 R_{10} R_{11} R_{12} R_{13} R_{14} R_{15} \times ((1 - R_1) + R_1(1 - R_2) + R_1 R_2(1 - R_3)) \\
&+ R_1 R_2 R_3(1 - R_4) + R_1 R_2 R_3 R_4(1 - R_5) + R_1 R_2 R_3 R_4 R_5(1 - R_6)) \\
&+ R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_9 R_{10} \\
&\times (1 - R_{11} + R_{11}(1 - R_{12}) + R_{11} R_{12}(1 - R_{13}) + R_{11} R_{12} R_{13}(1 - R_{14})) \\
&+ R_{11} R_{12} R_{13} R_{14}(1 - R_{15}) \times (1 - R_1 + R_1(1 - R_2)) \\
&+ ((1 - R_1 + R_1(1 - R_2))((1 - R_3) + R_3(1 - R_4) + R_3 R_4(1 - R_7))) \\
&+ R_1 R_2(1 - R_7)(1 - R_3 + R_3(1 - R_4)) \times (1 - R_{13} + R_{13}(1 - R_{14})) \\
&+ R_{13} R_{14}(1 - R_{15}) \times R_5 R_6 R_7 R_8 R_9 R_{10} R_{11} R_{12} + R_1 R_2 R_5 R_6 R_7 R_8 R_{11} R_{12} \\
&\times (R_9 R_{10} + (1 - R_9) + R_9(1 - R_{10})) \\
&\times (1 - R_3 + R_3(1 - R_4))(1 - R_{13} + R_{13}(1 - R_{14}) + R_{13} R_{14}(1 - R_{15})) \\
&+ (1 - R_5 + R_5(1 - R_6)) \times ((1 - R_7 + R_7(1 - R_{11}) + R_7 R_{11}(1 - R_{12}))) \\
&\times (1 - R_9 + R_9(1 - R_{10})) + R_9 R_{10}(1 - R_{11} + R_{11}(1 - R_{12})) \\
&\times R_1 R_2 R_3 R_4 R_8 R_{13} R_{14} R_{15} \\
&+ R_1 R_2 R_7 R_{11} R_{12} R_{13} R_{14} R_{15}(1 - R_9 + R_9(1 - R_{10})) \\
&\quad \times (1 - R_3 + R_3(1 - R_4) + R_4 R_4(1 - R_5) + R_3 R_4 R_5(1 - R_6)) \\
&+ R_3 R_4 R_7 R_8 R_9 R_{10} R_{13} R_{14} R_{15}(1 - R_1 + R_1(1 - R_2)) \\
&\times (1 - R_{11} + R_{11}(1 - R_{12}))(1 - R_5 + R_5(1 - R_6))
\end{aligned} \tag{2.32}$$

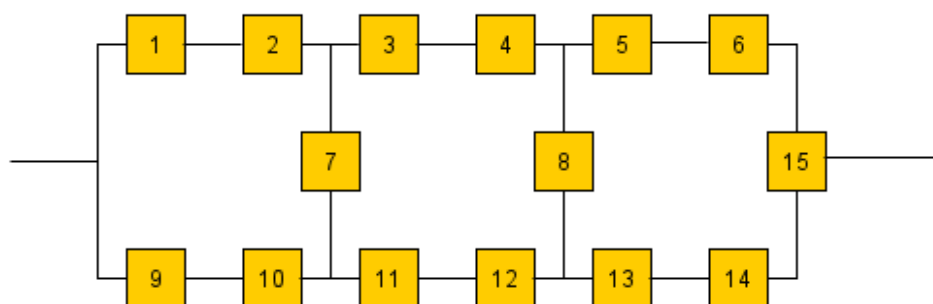
Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάλυμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος και υπολογίζεται με το θεώρημα ολικής πιθανότητας, δηλαδή το άθροισμα της αξιοπιστίας κάθε ενδεχόμενου επί την πιθανότητα του αντίστοιχου ενδεχομένου. Η συνάρτηση του στόχου που προκύπτει είναι η

(2.32), όπου R_i η αξιοπιστία του i -οστού υποσυστήματος που υπολογίζεται από την σχέση $R_i = 1 - (1 - r_i)^{n_i}$ και n_i τα εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας r_i σε παραλληλία.

Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν το κόστος κατασκευής του συστήματος και ισχύει ότι:

$$g_y(n) = \sum_{i=1}^{15} c_{yi} \cdot n_i \leq b_y, y = 1, 2, \dots, M \quad (2.33)$$

όπου $b_y = rand(1.5, 3.5) \cdot \sum_{i=1}^{10} c_{yi}$ το ανώτατο κόστος κατασκευής. Οι τιμές c_{yi} παράγονται τυχαία από την κανονική κατανομή στο διάστημα $[0, 100]$ και πολλαπλασιάζονται με έναν τυχαίο αριθμό στο διάστημα $[1.5, 3.5]$ καθιστώντας το περιορισμό σε πιο ήπιο ή αυστηρό. Τα r_i παράγονται τυχαία από την κανονική κατανομή $[0.6, 0.85]$, το M αναφέρεται στο πλήθος των περιορισμών λαμβάνεται ως πιθανό σενάριο για $M = 5$.



Σχήμα 2.15: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.

Τα εφεδρικά εξαρτήματα του i -οστού υποσυστήματος δεν έχουν περιορισμό πλήθους n_i και ισχύει ότι:

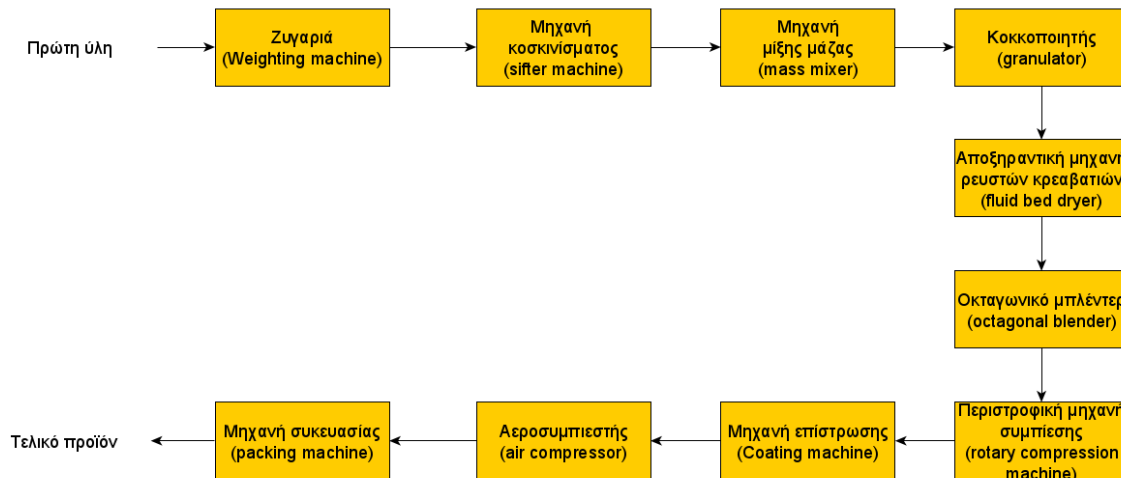
$$n_i \geq 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 10 \quad (2.34)$$

2.4.10 Μελέτη περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων

Τέλος, το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας της περίπτωσης ενός σειριακού συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστάσιο φαρμάκων (Pharmaceutical Plant) (Garg and Sharma, 2013; Mellal and Zio, 2016) αποτελείται από δέκα υποσυστήματα συνδεδεμένα κατά μήκος της γραμμής παραγωγής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16.

Η εν λόγω μελέτη περίπτωσης αποτελεί μια ακόμη υποκατηγορία της μελέτης περίπτωσης σειριακού συστήματος. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των δύο μελετών βρίσκεται

στα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων καθώς και στα ανώτατα όρια των περιορισμών, όπως αναφέρεται και στην Μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.



Σχήμα 2.16: Σύστημα γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων. Πηγή: (Garg and Sharma, 2013)

Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης $[r, n]$ που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία $R_s(r, n)$ του συστήματος. Ο στόχος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (2.7) για $m = 10$, όσο και το πλήθος των υποσυστημάτων:

$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^{10} [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (2.35)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (2.11), (2.12) και (2.13) για $i = 1, 2, \dots, 10$ ενώ επίσης η αξιοπιστία r_i δεν θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5 και μεγαλύτερες του $1 - 10^{-6}$ ενώ το κάθε υποσύστημα μπορεί να λαμβάνει έως 5 εφεδρικά εξαρτήματα.

$$0.5 \leq r_i \leq 1 - 10^{-6}, 1 \leq n_i \leq 5 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 10 \quad (2.36)$$

3 Προτεινόμενη Προσέγγιση Προβλημάτων Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας

Η εργασία στοχεύει να διερευνήσει εάν ο υβριδισμός (hybridization) είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος προσέγγισης προβλημάτων με πολλαπλούς στόχους. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη υβριδικών σχημάτων που αποτελούνται από νοήμονες εξελικτικές μεθόδους για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και ειδικότερα του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο ο στόχος του εν λόγω προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος ικανοποιώντας τους περιορισμούς πόρων, ανεξάρτητα από την μορφολογία των υποσυστημάτων και την φύση των μεταβλητών απόφασης (συνεχείς, διακριτές ή μικτές).

Επιπλέον, διατυπώνεται η ερευνητική υπόθεση, ότι ένα αποτελεσματικό υβριδικό σχήμα προκύπτει από τον υβριδισμό (μεμονωμένων) μεθόδων που παρουσιάζουν καλή απόδοση κατά την προσέγγιση των επιμέρους στόχων. Η αξιολόγηση των υβριδικών σχημάτων θα πραγματοποιηθεί με εφαρμογή στις δέκα παραπάνω μελέτες περίπτωσης της βιβλιογραφίας, οι οποίες περιλαμβάνουν το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας και των δύο επιμέρους προβλημάτων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, οι μελέτες περίπτωσης κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας πρόκειται να προσεγγιστούν με τη χρήση υβριδικών σχημάτων, ενώ οι μελέτες περίπτωσης των επιμέρους στόχων (προβλημάτων) προσεγγίστηκαν με τη χρήση των (μεμονωμένων) μεθόδων που σχηματίζουν τα υβριδικά σχήματα.

3.1 Εξεταζόμενες Μέθοδοι

Το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας περιγράφει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και κατ' επέκταση ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων, όπου καλείται να αναγνωριστούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση (2.3) του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, το υπό μελέτη πρόβλημα αποτελείται από μεταβλητές απόφασης που αντιπροσωπεύουν την κατανομή της εφεδρείας και περιγράφονται από την σχέση:

$$n = [n_1, n_2, \dots, n_m] \quad (3.1)$$

όπου με n_i συμβολίζεται το πλήθος των εφεδρικών εξαρτημάτων του i -οστού υποσυστήματος και με m το πλήθος των υποσυστημάτων που διαθέτει το σύστημα. Επιπρόσθετα μεταξύ των μεταβλητών απόφασης είναι και αυτές της κατανομής της αξιοπιστίας, οι οποίες περιγράφονται από την σχέση:

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_m] \quad (3.2)$$

όπου ως r_i συμβολίζεται η αξιοπιστία των εξαρτημάτων του i -οστού υποσυστήματος.

Κατά την διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι εξελίσσουν κάθε λύση βασιζόμενοι σε κάποια πληροφορία, η οποία δημιουργήθηκε μέσω νοημοσύνης. Κάθε στιγμή της διαδικασίας του αλγόριθμου υπάρχει ένα σύνολο υποψήφιων λύσεων οι οποίες αποτελούν τον πληθυσμό (population), ο εν λόγω πληθυσμός μπορεί να αναπαρασταθεί από τον πίνακα:

$$x_{pop} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \dots & x_{sm} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

όπου το x_{ij} είναι η τιμή της j -οστής μεταβλητής απόφασης της λύσης της i -οστής υποψήφιας λύσης, s είναι το πλήθος του πληθυσμού και m το πλήθος των μεταβλητών απόφασης. Καθώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται, οι υποψήφιες λύσεις εξελίσσονται ώσπου να ικανοποιηθεί ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων, ο οποίος συμβολίζει τις γενιές (generations) του αλγορίθμου.

Οι υποψήφιες λύσεις αποτελούν τους αναζητητές (agents) του πληθυσμού, οι οποίοι μετακινούνται στο χώρο λύσεων κατά την επαναληπτική διαδικασία. Σε κάθε επανάληψη δημιουργείται μια νέα λύση για τον κάθε αναζητητή, βασιζόμενη σε παλαιότερη λύση.

Κατά την εκκίνηση ενός αλγορίθμου πραγματοποιείται η αρχικοποίηση (initialization) των τιμών των προαναφερθέντων παραμέτρων, καθώς και των επιπλέον παραμέτρων που διαθέτει κάθε αλγόριθμος ξεχωριστά, όπως οι παράμετροι μάθησης της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και το ποσοστό μετάλλαξης του Γενετικού Αλγόριθμου. Επιπρόσθετα, κατά την αρχικοποίηση ορίζεται το σημείο εκκίνησης των αναζητητών του πληθυσμού στον χώρο λύσεων, όπου γίνεται τυχαία εντός του πεδίο ορισμού της εκάστοτε μεταβλητής απόφασης. Αν κάποια μεταβλητής απόφασης λαμβάνει συνεχείς τιμές, η αρχική τιμή της μπορεί να περιγραφεί από την σχέση:

$$x_{initial}^d = lower_bound^d + (upper_bound^d - lower_bound^d) \cdot rand(0,1) \quad (3.4)$$

όπου $rand$ είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1]$, $lower_bound^d$ και $upper_bound^d$ είναι το κάτω και άνω όριο για κάθε μεταβλητή απόφασης d . Αντίθετα, αν κάποια μεταβλητή απόφασης λαμβάνει διακριτές τιμές, η αρχική τιμή της μπορεί να ερμηνευθεί ως ακολούθως:

$$x_{initial}^d = randi \cdot (lower_bound^d, upper_bound^d) \quad (3.5)$$

όπου $randi$ είναι ένας τυχαίος ακέραιος αριθμός στο διάστημα $(lower_bound^d, upper_bound^d)$ για κάθε μεταβλητή απόφασης d .

Κατά συνέπεια η επιλογή των αλγορίθμων έγινε υιοθετώντας την λογική ότι ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm) (Yokota et al., 1996), η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Tabu Search) (Abido, 2002) και ο Αλγόριθμος Νυχτερίδας (Bat Algorithm) (Talafuse and Pohl, 2016) εμφανίζονται ως ισχυρές μέθοδοι για την προσέγγιση προβλημάτων διακριτού χώρου λύσεων. Παρομοίως, η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) (Q. Liang et al., 2016), ο Αλγόριθμος της Πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm) (Yang and He, 2013) και η Αναζήτηση Κούκου (Cuckoo Search) (Garg, 2015a) φαίνονται να αποτελούν ισχυρές μεθόδους προσέγγισης του προβλήματος συνεχούς χώρου λύσεων.

Επομένως, στα υβριδικά σχήματα που δημιουργήθηκαν (Σχήμα 3.1), για την προσέγγιση του στόχου κατανομής εφεδρείας (Αλγόριθμος 1 στο Σχήμα 3.1) χρησιμοποιήθηκαν ο Γενετικός Αλγόριθμος, η Αναζήτηση Νυχτερίδας και η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις. Συνεπώς οι αλγόριθμοι αυτοί δέχονται τις υποψήφιες λύσεις του στόχου κατανομής αξιοπιστίας ως πληροφορία σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3.1. Αντίστοιχα για την προσέγγιση του στόχου κατανομής εφεδρείας (Αλγόριθμος 2 στο Σχήμα 3.1) χρησιμοποιήθηκαν η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, ο Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας και η Αναζήτηση Κούκου, όπου ομοίως δέχονται τις υποψήφιες λύσεις του στόχου κατανομής εφεδρείας ως πληροφορία σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου.

Επιπρόσθετα, βασιζόμενοι στο ότι τα υβριδικά σχήματα που αναπτύχθηκαν θα αποτελέσουν τις μεθόδους που θα χρησιμοποιεί η εφαρμογή περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη (GUI), έναν ακόμη παράγοντα στην παραπάνω επιλογή αποτέλεσε η επιλογή μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση.

3.1.1 Γενετικός Αλγόριθμος

Ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm) βασίζεται στην εξέλιξη των ειδών, κάθε απόγονος έχει την γενετική πληροφορία από τους δύο γονείς τους οποίους παράχθηκε, ενώ ένα πολύ μικρό ποσοστό του πληθυσμού μπορεί να υποστεί μια τυχαία μετάλλαξη. Αποτελείται από τρία στάδια, την Επιλογή (Selection), την Διασταύρωση (Crossover) και την Μετάλλαξη (Mutation) (Hsieh, Chen and Bricker, 1998).

Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του αλγορίθμου. Επιλέγεται το Πλήθος Κλήσεων της Αντικειμενικής Συνάρτησης (ΠΚΑΣ) και όσον αφορά τις παραμέτρους του αλγορίθμου ορίζεται ένα αρκετά μικρό ποσοστό μετάλλαξης, το οποίο αποτελεί την πιθανότητα να λάβει τυχαία τιμή κάποια υποψήφια λύση του πληθυσμού, σε μια στιγμή της επαναληπτικής διαδικασίας. Η εν λόγω παράμετρος, συνήθως λαμβάνει τιμή μικρότερη του 1% (Whitley, 1994) επειδή μια υψηλή τιμή μετάλλαξης μετατρέπει τον αλγόριθμο σε μια τυχαία αναζήτηση. Στην πραγματικότητα, η παράμετρος μετάλλαξης διατηρεί την ποικιλομορφία του πληθυσμού εισάγοντας ένα επίπεδο τυχαιότητας, αποτρέποντας τις λύσεις να συγκλίνουν γρήγορα (premature convergence) και μειώνει την πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικό βέλτιστο (Whitley, 1994). Τέλος, ορίζεται τυχαία το σημείο εκκίνησης κάθε αναζητητή του πληθυσμού, ο οποίος περιγράφει τις υποψήφιες λύσεις της κατανομής της εφεδρείας.

Έπειτα ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε αναζητητή του πληθυσμού προκειμένου να προσδιοριστεί ο καλύτερος αναζητητής εφεδρείας, ο οποίος αντιπροσωπεύει τον γονέα που πρόκειται να διασταυρωθεί (crossover) με τους υπόλοιπους αναζητητές του πληθυσμού. Επιλέγοντας δύο τυχαίες λύσεις από τον πληθυσμό:

Γονέας 1	x_{i1}	x_{i2}	x_{i1}	...	x_{ik-1}	x_{ik}
Γονέας 2	$x_{i'1}$	$x_{i'2}$	$x_{i'3}$	...	$x_{i'k-1}$	$x_{i'k}$

Η διασταύρωση γίνεται σε ένα τυχαία επιλεγμένο σημείο (single point crossover) του διανύσματος της λύσης παράγοντας νέες υποψήφιες λύσεις (νέοι απόγονοι), που ονομάζονται παιδιά (children).

Παιδί 1	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	...	$x_{i'r}$	...	$x_{i'k-1}$	$x_{i'k}$
Παιδί 2	$x_{i'1}$	$x_{i'2}$	$x_{i'3}$	...	x_{ir}	...	x_{ik-1}	x_{ik}

Το διάνυσμα που περιγράφει τους εν λόγω απόγονους αποτελείται από τις μεταβλητές απόφασης του γονέα που διασταυρώνεται και αυτές του καλύτερου γονέα πριν ή μετά το τυχαίο σημείο (Whitley, 1994).

Ύστερα, με πιθανότητα ίση του ποσοστού μετάλλαξης κάθε αναζητητής μπορεί να μεταλλαχθεί, μεταβάλλοντας τυχαία μια από τις μεταβλητές απόφασης του διανύσματος της υποψήφιας λύσης που αντιπροσωπεύει. Επιλέγοντας ένα γονέα τυχαία από τον πληθυσμό:

Γονέας 1	x_{i1}	x_{i2}	x_{i1}	...	x'_{ir}	...	x_{ik-1}	x_{ik}
----------	----------	----------	----------	-----	-----------	-----	------------	----------

Ένας αναζητητής i με k διαστάσεις υπόκειται μετάλλαξη σε ένα τυχαίο σημείο r , λαμβάνοντας τιμή τυχαία εντός του πεδίου ορισμού της r -οστής μεταβλητής απόφασης.

Ψευδοκώδικας 3.1: Γενετικός Αλγόριθμος

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού εφεδρείας
 - 3: Αρχικοποίηση πληροφορίας κατανομής αξιοπιστίας
 - 4: **Για** γενιές από 1 έως K
 - 5: Επιλογή καλύτερου γονέα εφεδρείας
 - 6: Διασταύρωση καλύτερου γονέα εφεδρείας με τους υπόλοιπους γονείς του πληθυσμού
 - 7: **Για** λύση από 1 έως N
 - 8: **Εάν** $rand \leq$ ποσοστό μετάλλαξης
 - 9: Τυχαία μετάλλαξη ατόμου εφεδρείας
 - 10: **Τέλος**
 - 11: **Τέλος**
 - 12: Επιλογή νέου πληθυσμού με χρήση τουρνουά επιλογής (tournament selection)
 - 13: **Τέλος**
-

Το αποτέλεσμα της διασταύρωσης μεταξύ των μελών του πληθυσμού είναι η δημιουργία ενός νέου πληθυσμού που αποτελείται από τους γονείς και τους απογόνους. Προκειμένου να διατηρηθεί ο πληθυσμός του αλγόριθμου σταθερός, διεξάγεται ένα τουρνουά επιλογής (tournament selection) μεταξύ των αναζητητών. Κατά την διαδικασία του υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε αναζητητή του νέου πληθυσμού ώστε να προσδιοριστεί η ποιότητα της υποψήφιας λύσης που αντιπροσωπεύουν. Έπειτα επιλέγονται αυτοί που κατέχουν την καλύτερη ποιότητα, ώστε να αποτελέσουν τους γονείς της επόμενης γενιάς. Ο εν λόγω μηχανισμός βελτιώνει την ποιότητα των υποψήφιας λύσεων καθώς αυξάνονται οι γενιές και οδηγεί τον αλγόριθμο να συγκλίνει σε κάποια υποβέλτιστη λύση (Miller et al., 1995).

Έπειτα από το τουρνουά επιλογής έχοντας τους γονείς της επόμενης γενιάς, τα προαναφερθέντα βήματα του αλγόριθμου επαναλαμβάνονται, με σκοπό τη σταδιακή βελτίωση της απόδοσης των υποψήφιας λύσεων, ώσπου να ολοκληρωθούν οι γενιές. Ο εν λόγω αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικας 3.1.

3.1.2 Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις

Η λογική της μετα-ευρετικής μεθόδου Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Tabu Search) είναι η αποφυγή εξέτασης κάποιας υποψήφιας λύσης που έχει ελεγχθεί σε προηγούμενη επανάληψη της μεθόδου, με στόχο την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων (Kulturel-Konak, Smith and Coit, 2003). Η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Tabu Search) χρησιμοποιείται για την επίλυση του διακριτού μέρους, καθώς έχει αποδειχθεί ότι αντιμετωπίζει εύκολα τα προβλήματα διακριτού χώρου λύσεων και αποφεύγει τον εγκλωβισμό σε τοπικά βέλτιστα (Abido, 2002).

Ψευδοκώδικας 3.2: Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις

-
- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Αρχικοποίηση κατάστασης εφεδρείας
 - 3: Αρχικοποίηση πληροφορίας κατανομής αξιοπιστίας
 - 4: **Όσο** δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού
 - 5: **Εάν** ικανοποιείται η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων
 - 6: Υπολογισμός ποιότητας της νέας λύσης
 - 7: **Εάν** η ποιότητα της τρέχουσας λύσης είναι καλύτερη από την ποιότητα της καλύτερης λύσης
 - 8: Ενημέρωση καλύτερης λύσης
 - 9: Ενημέρωση ποιότητας καλύτερης λύσης
 - 10: **Τέλος**
 - 11: Ενημέρωση της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων
 - 12: **Τέλος**
 - 13: Επιλογή νέας κατάστασης εφεδρείας
 - 14: **Τέλος**
-

Κατά την επαναληπτική διαδικασία της μεθόδου, παράγεται μια νέα τυχαία υποψήφια λύση, επικαλούμενη ως κατάσταση (case), η οποία αποθηκεύεται στην μνήμη σε μια προσωρινή λίστα απαγορευμένων καταστάσεων, η οποία αντιπροσωπεύει έναν πληθυσμό λύσεων που έχουν ελεγχθεί σε προηγούμενη (ή προηγούμενες) επανάληψη(-εις) του αλγορίθμου. Η εν λόγω λίστα διατηρείται στην μνήμη για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων (tabu list memory), όπου είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό των γενιών.

Με την προϋπόθεση ότι η υποψήφια λύση μιας δεδομένης επανάληψης δεν έχει εμφανιστεί σε προηγούμενη επανάληψη, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και κατ' επέκταση η ποιότητα της. Σε διαφορετική περίπτωση δημιουργούνται τυχαίες νέες υποψήφιες λύσεις, ωστόσο να δημιουργηθεί μια που ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο για την επόμενη γενιά. Η λύση εκείνη με την καλύτερη ποιότητα αποθηκεύεται στην μνήμη έως ότου αντικατασταθεί από μια καλύτερης ποιότητας. Η μέθοδος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικας 3.2.

3.1.3 Αλγόριθμος της Νυχτερίδας

Ο Αλγόριθμος της Νυχτερίδας (Bat Algorithm) είναι μία εξελικτική μέθοδος η οποία βασίζεται στην συμπεριφορά των νυχτερίδων και συγκεκριμένα αντλεί έμπνευση από τον μηχανισμό ηχοεντοπισμού (echolocation), όπου επιτρέπει στις νυχτερίδες να εντοπίζουν το θήραμα τους. Κάθε νυχτερίδα εκπέμπει παλμούς σταθερής συχνότητας που αντανακλώνται στο γύρω περιβάλλον, επιτρέποντας της να αναγνωρίσει τα αντικείμενα και τα θηράματα που την περιβάλλουν (Yang, 2010). Η μέθοδος αποτελείται από ένα πληθυσμό νυχτερίδων, όπου κάθε νυχτερίδα ή αναζητητής (agent) έχει μια θέση x_i^t και ταχύτητα v_i^t στον χώρο λύσεων την χρονική στιγμή t .

$$v_{ij}^t = v_{ij}^{t-1} + (x_{ij}^{t-1} - x_*(j)) \cdot f_i \quad (3.6)$$

όπου $x_*(j)$ η καλύτερη θέση της j -οστής διάστασης και f_i η συχνότητα που εκπέμπει η i -οστή νυχτερίδα, η οποία υπολογίζεται ως:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot \beta \quad (3.7)$$

όπου, με β περιγράφεται ένα τυχαίο διάνυσμα j διαστάσεων που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Η εν λόγω παράμετρος f_i αποτελεί το μέγεθος της μεταβολής της ταχύτητας και καθορίζεται βασιζόμενη από το μέγεθος του προβλήματος (Yang, 2010).

Το διάνυσμα των αναζητητών (agents) περιγράφεται από τη σχέση (3.1) και αποτελούν τον πληθυσμό υποψήφιων λύσεων του επιμέρους στόχου αναζήτησης της κατανομής εφεδρείας. Προκειμένου να επιλύσουν τον επιμέρους στόχο αναζήτησης της κατανομής εφεδρείας, η θέση x_i^t της κάθε νυχτερίδας μετατρέπεται ώστε να δέχεται διακριτές τιμές:

$$x_{ij}^t = x_*(j) + k \quad (3.8)$$

όπου με k συμβολίζεται μια τυχαία διακριτή τιμή διάστημα $[-1, 1]$. Η εν λόγω μεταβλητή συμβολίζει την τοπική αναζήτηση στον διακριτό χώρο λύσεων γύρω από την καλύτερη θέση της της j -οστής διάστασης. Σύμφωνα με τους (Talafuse and Pohl, 2016) η νέα θέση της νυχτερίδας ενημερώνεται από τη σχέση (3.8) όταν ικανοποιείται το κριτήριο:

$$\rho < \left| \frac{\pi}{2} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot v_{ij}^t \right| \quad (3.9)$$

όπου ρ ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0, 1]$. Αντιθέτως, όταν ικανοποιείται το κριτήριο $\rho > r_i$, όπου r_i ο ρυθμός εκπομπής των παλμών (pulse rate emission), η νέα θέση x_{ij}^t της νυχτερίδας στην j -οστή διάσταση λαμβάνει την τιμή της καλύτερης θέσης $x_*(j)$.

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (3.10)$$

Η νέα θέση της νυχτερίδας (υποψήφιας λύσης) γίνεται αποδεκτή όταν η ποιότητα της λύσης βελτιωθεί και όταν ικανοποιείται το κριτήριο $\rho > A_i$, όπου A_i η ένταση (loudness) του εκπεμπόμενου παλμού, α ο ρυθμός μείωσης της έντασης και γ η παράμετρος μείωσης του ρυθμού εκπομπής των παλμών.

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t \quad (3.11)$$

Όταν η νέα θέση της νυχτερίδας αποτελεί μια εφικτή υποψήφια λύση τότε ο χρόνος (t), ο ρυθμός εκπομπής (r_i^t) των παλμών και η ένταση (A_i^t) επαναφέρονται στην αρχική τους τιμή. Η λογική του παραπάνω μηχανισμού είναι ότι όταν μειώνεται η ένταση της i -οστής νυχτερίδας, εκείνη κοντεύει να βρει το θήραμα της. Συνεπώς όταν η νέα θέση της αποτελεί μια εφικτή λύση, οι εν λόγω παράμετροι επαναφέρονται στην αρχική τους τιμή ώστε να αναζητήσουν μια νέα θέση (θήραμα) από την αρχή. Σε διαφορετική περίπτωση οι εν λόγω παράμετροι μειώνονται, σύμφωνα με τις σχέσεις (3.10) και (3.11), ώσπου να βρεθεί μια εφικτή θέση από το σημείο του χώρου στο οποίο βρίσκονται. Ο Αλγόριθμος της Νυχτερίδας μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 3.3.

Ψευδοκώδικας 3.3: Αλγόριθμος της Νυχτερίδας

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού νυχτερίδων εφεδρείας
 - 3: Αρχικοποίηση πληροφορίας κατανομής αξιοπιστίας
 - 4: **Όσο** δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού
 - 5: Εύρεση καλύτερη νυχτερίδας του πληθυσμού
 - 6: **Για** νυχτερίδα από 1 έως N
 - 7: Υπολογισμός συχνότητας εκπομπής
 - 8: Υπολογισμός ταχύτητας νυχτερίδας
 - 9: **Εάν** ικανοποιείται το κριτήριο (3.9)
 - 10: Ενημέρωση της θέσης βάσει της (3.8)
 - 11: **Τέλος**
 - 12: **Εάν** η ποιότητα της νυχτερίδας βελτιωθεί και ικανοποιείται το κριτήριο $\rho > r_i$
 - 13: Αποδοχή της νέας θέσης
 - 14: **Τέλος**
 - 15: **Εάν** η νέα θέση αποτελεί εφικτή λύση
 - 16: Επαναφορά $A = A_0, r_i = r_0$
 - 17: Επαναφορά χρόνου $t = 1$
 - 18: **Αλλιώς**
 - 19: Ενημέρωση ρυθμού εκπομπής παλμών (3.10) και έντασης (3.11)
 - 20: **Τέλος**
 - 21: Ενημέρωση χρόνου $t = t + 1$
 - 22: **Τέλος**
 - 23: **Τέλος**
-

3.1.4 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) βασίζεται στον τρόπο που κινείται ένα σμήνος πτηνών ή κοπάδι ψαριών, διατηρώντας σταθερό σχηματισμό και πιο συγκεκριμένα από την κοινωνική αλληλεπίδραση και επικοινωνία που παρατηρείται σε ένα σμήνος (Wu et al., 2011).

Η εν λόγω μέθοδος αποτελείται από αναζητητές (agents) ή σωματίδια που μετακινούνται στον χώρο λύσεων και περιγράφονται από την σχέση (3.2). Τα σωματίδια αποτελούν τον πληθυσμό ή σμήνος (3.3) και η θέση τους, που αποτελεί το διάνυσμα της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων του συστήματος, περιγράφεται από την σχέση:

$$s_k = [r_k^1, r_k^2, \dots, r_k^m] \quad (3.12)$$

όπου $k \in 1, 2, \dots, K$ είναι ο μέγιστος αριθμός των αναζητητών (agents), δηλαδή το πλήθος του σμήνους (πληθυσμός), m είναι ο αριθμός των υποσυστημάτων που διαθέτει το σύστημα ή ο αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος.

Κατά την εκκίνηση της επαναληπτικής διαδικασίας, ορίζεται το ΠΚΑΣ και έπειτα τα σωματίδια του σμήνους τοποθετούνται τυχαία στο (συνεχή) χώρο λύσεων. Στην συνέχεια υπολογίζεται η ποιότητα κάθε σωματιδίου του σμήνους, ώστε να βρεθεί αυτό που αντιπροσωπεύει το βέλτιστο όλου του σμήνους, καθώς η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα ταχύτητας για την ενημέρωση της τρέχουσας θέσης κάθε σωματιδίου στο σμήνος. Κατά τη διάρκεια της κίνησης, κάθε σωματίδιο προσαρμόζει τη θέση του σύμφωνα με τη δική του εμπειρία (καλύτερη προηγούμενη θέση) και την καλύτερη εμπειρία του σμήνους (καλύτερη θέση μεταξύ των σωματιδίων).

Ψευδοκώδικας 3.4: Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Αρχικοποίηση πληροφορίας κατανομής εφεδρείας
 - 3: Αρχικοποίηση θέσεων σμήνους σωματιδίων αξιοπιστίας
 - 4: Υπολογισμός αρχικής ποιότητας κάθε σωματιδίου
 - 5: Εύρεση του βέλτιστου σωματιδίου όλου του σμήνους
 - 6: **Για** 1 έως K επαναλήψεις εξέτασης πληροφορίας κατανομής εφεδρείας
 - 7: **Για** σωματίδιο 1 έως N
 - 8: Υπολογισμός της ταχύτητας του σωματιδίου
 - 9: Υπολογισμός της νέας θέσης του σωματιδίου
 - 10: Ενημέρωση της καλύτερης θέσης του σωματιδίου
 - 11: **Τέλος**
 - 12: Εύρεση του βέλτιστου σωματιδίου του σμήνους
 - 13: **Τέλος**
-

Καθώς εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, υπολογίζεται η ταχύτητα των σωματιδίων, η οποία αποτελεί ένα διάνυσμα κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, περιγράφεται από την σχέση:

$$v_{k+1}^i = c_1 \cdot rand_1 \cdot (x_{pbest}^i - x_k^i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (x_{gbest} - x_k^i) \quad (3.13)$$

όπου $rand$ είναι τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0, 1]$, με x_{pbest}^i συμβολίζεται η καλύτερη θέση του i -οστού αναζητητή ως την τρέχουσα επανάληψη, με x_{gbest} συμβολίζεται η θέση του βέλτιστου σωματιδίου όλου του σμήνους και c_1, c_2 είναι οι παράγοντες μάθησης που ελέγχουν την επιρροή των όρων $rand_1(x_{pbest}^i - x_k^i)$ και $rand_2(x_{gbest} - x_k^i)$. Αναλυτικότερα ο γνωστικός όρος (cognitive component) $c_1 \cdot rand_1 \cdot (x_{pbest}^i - x_k^i)$ κατευθύνει το σωματίδιο να μετακινηθεί προς με καλή περιοχή λύσεων που έχει βρεθεί σε προηγούμενη στιγμή της

επαναληπτικής διαδικασίας. Ο κοινωνικός όρος (social component) $c_2 \cdot rand_2 \cdot (x_{gbest} - x_k^i)$ κατευθύνει το σωματίδιο προς το καλύτερο όλου του σμήνους, με σκοπό να συγκλίνει στην θέση του. Ο Αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 3.4.

3.1.5 Αναζήτηση Κούκου

Η Αναζήτηση Κούκου (Cuckoo Search) βασίζεται στον τρόπο που συμπεριφέρονται μερικά είδη κούκου και ειδικότερα στην μηχανισμό με τον οποίο αναπαράγονται. Πιο συγκεκριμένα μερικά είδη κούκου γεννούν τα αυγά τους σε φωλιές που θυμίζουν την δική του, αντικαθιστώντας τα αυγά του ξενιστή (host), με σκοπό να τα κλωσήσει εκείνος (Yang and Deb, 2014).

Η προαναφερθείσα μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης του επιμέρους στόχου συνεχούς χώρου λύσεων, τότε ο πληθυσμός που περιέχει τις υποψήφιες λύσεις του στόχου διακριτού χώρου λύσεων θα πρέπει να αντλείται ως πληροφορία σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου. Κάθε κούκος αντιπροσωπεύει έναν αναζητητή (agent) του πληθυσμού που μετακινείται στον χώρο λύσεων. Η θέση του x_i^t , που αποτελεί την κατανομή της αξιοπιστίας του συστήματος, περιγράφεται από την σχέση (3.2). Όταν μια υποψήφια λύση γίνεται αποδεκτή, γίνεται η υπόθεση ότι η συγκεκριμένη λύση αποτελεί μια αρμόζουσα φωλιά για τον κούκο να γεννήσει το αυγό του.

Κάθε αυγό που γεννάται αποτελεί μια εφικτή λύση, οπότε για λόγους απλότητας γίνεται η υπόθεση ότι κάθε κούκος γεννάει ένα αυγό σε μια φωλιά σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, ώστε κάθε κούκος να αποτελείται μια υποψήφια λύση. Επιπρόσθετα υπάρχει πιθανότητα ο ξενιστής να βρει το αυγό, καταστρέφοντας το (Yang and Deb, 2014).

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό τυχαίων περιπάτων, όπου στην μια περίπτωση χρησιμοποιείται ο τυχαίος περίπατος Levy της παρακάτω εξίσωσης για την διερεύνηση (exploration) του χώρου λύσεων και την αποφυγή παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \cdot L(s, \lambda) \quad (3.14)$$

όπου ως α ορίζεται ο συντελεστής κλίμακας μεγέθους βήματος (step size scaling factor) του τυχαίου περιπάτου και ως L το τυχαίο βήμα που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \cdot \Gamma(\lambda) \cdot \sin(\pi \cdot \lambda/2)}{\pi} \cdot \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (3.15)$$

όπου με s συμβολίζεται το μέγεθος του βήματος (step size) και λ η παράμετρος της κατανομής Levy. Όσον αφορά την αναζήτηση τοπικά του χώρου λύσεων χρησιμοποιείται ένας τοπικός τυχαίος περίπατος (local random walk), ο οποίος ενεργοποιείται όταν ο ξενιστής ανακαλύψει

τα αυγά με αποτέλεσμα να καταστρέψει την φωλιά του, οδηγώντας τον κούκο σε μια άλλη κοντινή φωλιά. Ο τυχαίος αυτός περίπατος περιγράφεται από την παρακάτω σχέση.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \cdot s \otimes H(p_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (3.16)$$

όπου τα x_j^t και x_k^t είναι δύο τυχαία επιλεγμένες θέσεις, με $H(u)$ συμβολίζεται η συνάρτηση βήματος Heaviside (Heaviside step function) η οποία αναλύεται περαιτέρω στο Παράρτημα A1. Η εν λόγω συνάρτηση αποτελεί τον μηχανισμό ενεργοποίησης του τοπικού περιπάτου, όπου ως ϵ ορίζεται ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1]$ και με p_a η πιθανότητα αναγνώρισης του αυγού. Η προαναφερθείσα πιθανότητα συμβολίζει την αναλογία των τοπικών περιπάτων σε σχέση με τον αριθμό των συνολικών επαναλήψεων.

Κατά την επαναληπτική διαδικασία, υποθέτουμε η κατανομή της εφεδρείας δίνεται ως πληροφορία, στην συνέχεια αφού βρεθεί η αρχική θέση του καλύτερου κούκου, εκτελείται ο τυχαίος περίπατος Levy εξερευνώντας τον χώρο λύσεων. Τέλος, σε περίπτωση που το αυγό του κούκου ανακαλυφθεί, διεξάγεται ο τοπικός τυχαίος περίπατος οδηγώντας τον σε μια νέα κοντινή φωλιά. Η μέθοδος Αναζήτησης Κούκου μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 3.5.

Ψευδοκώδικας 3.5: Αναζήτηση Κούκου

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Αρχικοποίηση πληροφορίας κατανομής εφεδρείας
 - 3: Αρχικοποίηση θέσεων πληθυσμού κούκων αξιοπιστίας
 - 4: **Για** 1 έως K επαναλήψεις εξέτασης πληροφορίας κατανομής εφεδρείας
 - 5: Εύρεση του βέλτιστου κούκου όλου του πληθυσμού
 - 6: **Για** κούκο 1 έως N
 - 7: Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τυχαίο περίπατο Levy
(3.15)
 - 8: Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τοπικό τυχαίο περίπατο
(3.16), εάν ανακαλυφθεί το αυγό $H(p_a - \epsilon) = 1$
 - 9: **Τέλος**
 - 10: **Τέλος**
-

3.1.6 Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας

Ο Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm) βασίζεται στην μέθοδο ζευγαρώματος των πυγολαμπίδων και ειδικότερα στον τρόπο που προσελκύουν το ταίρι τους. Αναλυτικότερα και τα δύο μέλη της μεθόδου εκπέμπουν μια λάμψη, η οποία τα προσελκύει μεταξύ τους. Όσο πιο ισχυρή είναι η αυτή λάμψη αυξάνεται η ελκυστικότητα που διαθέτουν η μια για την άλλη με αποτέλεσμα να είναι πιο πιθανό να ζευγαρώσουν. Συνεπώς η απόσταση τους συμβάλλει στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου (Yang and He, 2013).

Ψευδοκώδικας 3.6: Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας

-
- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Αρχικοποίηση πληροφορίας κατανομής εφεδρείας
 - 3: Αρχικοποίηση θέσεων πληθυσμού πυγολαμπίδων αξιοπιστίας
 - 4: **Για** 1 έως K επαναλήψεις εξέτασης πληροφορίας κατανομής εφεδρείας
 - 5: Εύρεση ποιότητας των πυγολαμπίδων του πληθυσμού
 - 6: **Για** πυγολαμπίδα 1 έως N
 - 7: **Για** πυγολαμπίδα 1 έως N
 - 8: **Εάν** η ποιότητα της j -οστής \geq i -οστής
 - 9: Υπολογισμός της ελκυστικότητας (3.17)
 - 10: Υπολογισμός της νέας θέσης πυγολαμπίδας (3.18)
 - 11: **Τέλος**
 - 12: **Τέλος**
 - 13: **Τέλος**
 - 14: **Τέλος**
-

Η μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης του επιμέρους στόχου συνεχούς χώρου λύσεων, τότε ο πληθυσμός που περιέχει τις υποψήφιες λύσεις του στόχου διακριτού χώρου λύσεων θα πρέπει να αντλείται ως πληροφορία σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου. Κάθε πυγολαμπίδα είναι ένας αναζητητής (agent) του πληθυσμού που μετακινείται στον χώρο λύσεων. Η θέση του x_i^t , που αποτελεί την κατανομή της αξιοπιστίας του συστήματος, περιγράφεται από την σχέση (3.2).

Όπως αναφέρεται παραπάνω η νέα θέση της i -οστής πυγολαμπίδας εξαρτάται από την από την ελκυστικότητα που διαθέτουν ανά μεταξύ τους και κατά συνέπεια την απόσταση r από την j -οστή πυγολαμπίδα του σμήνους. Η ελκυστικότητα εκφράζει την φωτεινότητα που εκπέμπει μια πυγολαμπίδα ώστε να προσελκύσει μια άλλη και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (3.17)$$

όπου με β_0 συμβολίζεται η ελκυστικότητα όταν η απόσταση είναι μηδενική ($r = 0$) και γ είναι η παράμετρος μεταβολής της ελκυστικότητας κατά την αύξηση της απόστασης.

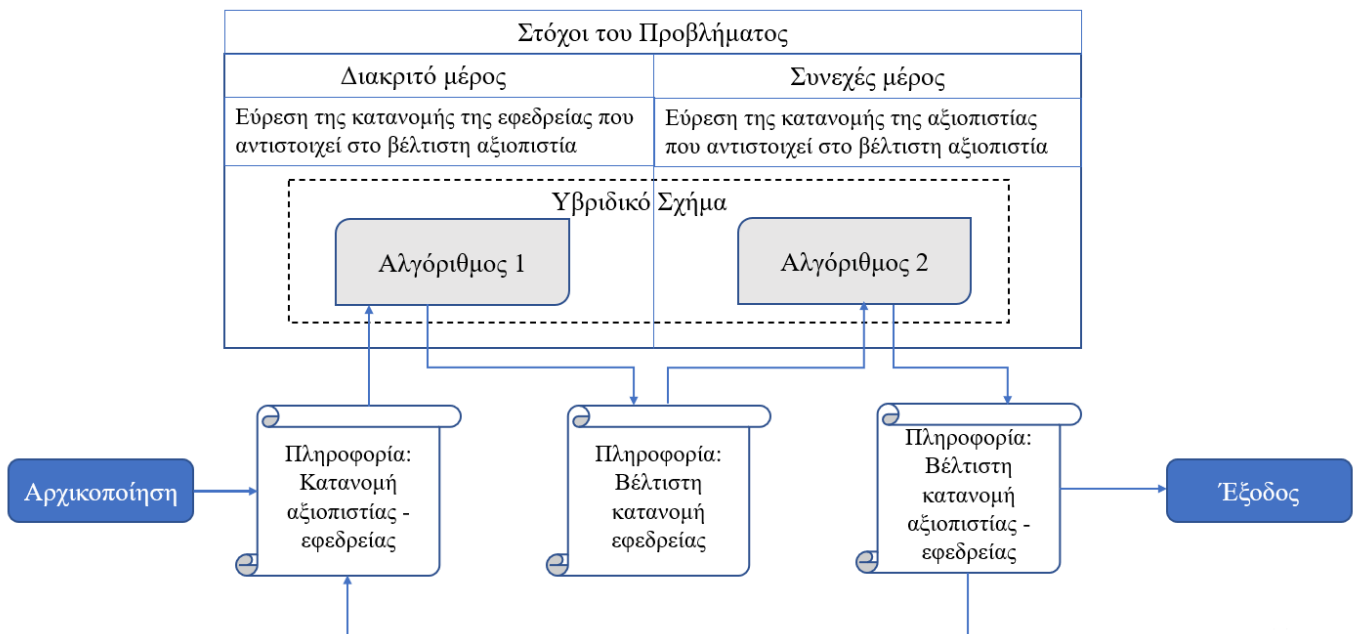
Η i -οστή πυγολαμπίδα ελκύεται και μετακινείται προς την j -οστή φωτεινότερη πυγολαμπίδα με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r_{ij}^2} \cdot (x_j^t - x_i^t) + a_t \cdot \epsilon_i^t \quad (3.18)$$

όπου ο δεύτερος όρος της (3.18) εκφράζει την ελκυστικότητα μεταξύ των δύο πυγολαμπίδων, ενώ ο τρίτος εκφράζει την τυχαιότητα στην κίνηση με ϵ_i^t ένα τυχαίο αριθμό στο διάστημα $[0,1]$ και a_t η παράμετρος της τυχαιότητας, η οποία μειώνεται με ρυθμό $a_t = a_{t-1} \cdot \delta$, με δ τον σταθερό ρυθμό μείωσης που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$.

Κατά την επαναληπτική διαδικασία, υπολογίζεται η ποιότητα των θέσεων των πυγολαμπίδων και διατηρείται στην μνήμη αυτή της καλύτερης. Έπειτα υπολογίζεται η τιμή της ελκυστικότητας κάθε πυγολαμπίδας σε σχέση με μια καλύτερης ποιότητας, όπου και μετακινείται προς το μέρος της. Η μέθοδος του Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 3.6.

3.2 Προτεινόμενο μοντέλο υβριδικών σχημάτων προσέγγισης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας



Σχήμα 3.1: Υβριδικό μοντέλο επίλυσης πολλαπλών στόχων προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας.

Για την προσέγγιση της βέλτιστης κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας, προτείνεται η χρήση υβριδικού σχήματος, που αποτελείται από τους εξελικτικούς αλγόριθμους που αναφέρονται παρακάτω. Η λογική του υβριδικού σχήματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, είναι ο διαχωρισμός του προβλήματος στους δύο επιμέρους στόχους του προβλήματος, την εύρεση της κατανομής της εφεδρείας και την εύρεση της κατανομής της αξιοπιστίας. Ο πρώτος αλγόριθμος του υβριδικού σχήματος δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα n , που περιέχει το πλήθος των εφεδρικών εξαρτημάτων σε κάθε υποσύστημα, και προτείνει το βέλτιστο διάνυσμα n εφεδρικών εξαρτημάτων. Στην συνέχεια το διάνυσμα n δίνεται ως είσοδος στον δεύτερο αλγόριθμο με σκοπό την αναζήτηση της αξιοπιστίας, διάνυσμα r , που πρέπει να έχουν τα εξαρτήματα, κατανομής n , κάθε υποσυστήματος. Τέλος το αποτέλεσμα που προκύπτει, δηλαδή το διάνυσμα $[r, n]$, δίνεται με την σειρά του στο πρώτο μέρος του σχήματος, όπου

Μάριος Θυμιάνης

Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

πλέον έχοντας διαθέσιμη την πληροφορία για την συνολική αξιοπιστία του συστήματος προτείνει ένα νέο διάνυσμα n και συνεχίζει την επαναληπτική διαδικασία.

4 Πειραματική Διαδικασία Προβλημάτων Κατανομής Αξιοπιστίας – Εφεδρείας

Όλα τα υβριδικά σχήμα έχουν αναπτυχθεί σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python 3.9 σε υπολογιστή με μνήμη 16GB, επεξεργαστή 3.60GHz AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor και λειτουργικό Windows 10 Enterprise. Κάθε αλγόριθμος εκτελέστηκε 50 ανεξάρτητες φορές για κάθε μια από τις παραπάνω μελέτες περίπτωσης.

4.1 Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Handling)

Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο η πολυπλοκότητα του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας βρίσκεται στην διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ της αξιοπιστίας και των διαθέσιμων πόρων. Αναλυτικότερα το πρόβλημα περιγράφεται από μη-γραμμικούς περιορισμούς, όπως τους (2.11), (2.12) και (2.13), με συνέπεια να αυξάνεται η πολυπλοκότητα του.

Προκειμένου να διαχειριστούμε προβλήματα που περιγράφονται από περιορισμούς, χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως αυτές που αναφέρει ο Yang (2014). Συγκεκριμένα, για μη-γραμμικούς περιορισμούς η πιο συνήθης μέθοδος είναι αυτή της ποινής (penalty method), όπου το πρόβλημα (2.3) που περιγράφεται από περιορισμούς (2.4) μετατρέπεται σε πρόβλημα κατά το οποίο οι περιορισμοί συμπεριλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση.

$$R'_s(r, n) = R_s(r, n) \cdot P(r, n) \quad (4.1)$$

όπου $P(r, n)$ είναι ο όρος της ποινής, ο οποίος για λόγους απλούστευσης λαμβάνει την τιμή $P(r, n) = 0$ όταν παραβιάζεται κάποιος από τους περιορισμούς και την τιμή $P(r, n) = 1$ όταν πρόκειται για εφικτή λύση.

Η λογική της μεθόδου ποινής είναι να γίνονται όλες οι λύσεις αποδεκτές, ακόμη και αυτές που δεν είναι εφικτές. Ως αποτέλεσμα, οι λύσεις που είναι εφικτές διατηρούν την τιμή της ποιότητας τους, ενώ οι μη εφικτές γίνονται αποδεκτές ως κατώτερες λύσεις, δίνοντας την δυνατότητα στην μέθοδο να αποκτάει πληροφόρηση για περιοχές του χώρου που αποτελούνται από μη εφικτές λύσεις.

4.2 Ρύθμιση Παραμέτρων

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη στατιστική απόδοση των υβριδικών σχημάτων, κατά την προσέγγιση του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας, είναι απαραίτητο να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων για τις οποίες επιτυγχάνεται η καλύτερη στατιστική απόδοση. Τέσσερα διαφορετικά σεντ παραμέτρων των 50 ανεξάρτητων εκτελέσεων

ελήφθησαν υπόψη. Οι παράμετροι του πρώτου σετ βασίζονται στη βιβλιογραφία, ενώ τα υπόλοιπα σετ παραμέτρων κυμαίνονται γύρω από το πρώτο σετ. Για τη συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των σετ παραμέτρων επιλέχθηκε η Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος. Επιπλέον, ο αριθμός των γενεών και του πληθυσμού διατηρείται σταθερός σε 100 και 50, αντίστοιχα. Κατά την διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων, οι τιμές των παραμέτρων επιλέχθηκαν με βάση την καλύτερη στατιστική απόδοση που επιτεύχθηκε. Ιδανικά, αναμένεται να παρατηρηθεί μέση απόδοση πλησίον της καλύτερης απόδοσης συνοδευόμενη από μια αρκετά μικρή τυπική απόκλιση και αρνητική λοξότητα. Αυτή η υπόθεση υποδηλώνει, αντίστοιχα, ότι η υπό εξέταση μέθοδος είναι ισχυρή και αποτελεσματική. Ο Πίνακας 2 περιέχει συγκεντρωτικά τις τιμές των παραμέτρων των υβριδικών σχημάτων, που προέκυψαν από τη διαδικασία ρύθμισης παραμέτρων.

Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων υβριδικών σχημάτων.

Παράμετρο ι	ΓΑ	ΑΝ	ΑΑΚ	ΓΑ- ΒΣΣ	ΓΑ- ΠΑ	ΓΑ- ΑΚ	ΑΝ- ΒΣΣ	ΑΝ- ΑΠ	ΑΝ- ΑΚ	ΑΑΚ -ΒΣΣ	ΑΑΚ -ΠΑ	ΑΑΚ -ΑΚ
Γενιές	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Πληθυσμός	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
% Μετάλλαξης	0.001	-	-	0.005	0.001	0.025	-	-	-	-	-	-
a_{BA}	-	0.9	-	-	-	-	0.9	0.9	1	-	-	-
γ_{BA}	-	0.3	-	-	-	-	0.3	0.3	1	-	-	-
r_0	-	0.05	-	-	-	-	0.05	0.05	0.25	-	-	-
A_0	-	5	-	-	-	-	5	5	8	-	-	-
f_{max}	-	4	-	-	-	-	4	4	8	-	-	-
f_{min}	-	0.1	-	-	-	-	0.1	0.1	2	-	-	-
Μνήμη	-	-	20	-	-	-	-	-	-	30	20	20
w	-	-	-	0.8	-	-	0.5	-	-	1.5	-	-
c_1	-	-	-	0.5	-	-	0.5	-	-	1.5	-	-
c_2	-	-	-	1.5	-	-	0.5	-	-	0.5	-	-
a_{FA}	-	-	-	-	0.2	-	-	0.2	-	-	0.2	-
β_0	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-
γ_{FA}	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-
δ	-	-	-	-	0.98	-	-	0.98	-	-	0.98	-
λ	-	-	-	-	-	0.5	-	-	0.5	-	-	1.5
s	-	-	-	-	-	2	-	-	2	-	-	0.5
a_{CS}	-	-	-	-	-	0.25	-	-	0.25	-	-	0.01
p_a	-	-	-	-	-	0.5	-	-	0.5	-	-	0.25

4.3 Δεδομένα Μελετών Περίπτωσης

Τα δεδομένα που αφορούν την μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος (ΜΠ1) και την μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας (ΜΠ3) επιλέχθηκαν από την εργασία των (Mellal and Zio, 2016) και αναδεικνύονται στον Πίνακα 3, ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη περίπτωσης σειριακού-παράλληλου συστήματος (ΜΠ2)

αναδεικνύονται στον Πίνακα 4. Πιο συγκεκριμένα κάθε γραμμή περιγράφει τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που αποτελούν το i -οστό υποσύστημα.

Πίνακας 3: Δεδομένα σειριακού και περίπλοκου συστήματος.

Υποσύστημα i	$10^5 a_i$	β_i	v_i	w_i
1	2.330	1.5	1	7
2	1.450	1.5	2	8
3	0.541	1.5	3	8
4	8.050	1.5	4	6
5	1.950	1.5	2	9

Πίνακας 4: Δεδομένα σειριακού - παράλληλου συστήματος.

Υποσύστημα i	$10^5 a_i$	β_i	v_i	w_i
1	2.500	1.5	2	3.5
2	1.450	1.5	4	4
3	0.541	1.5	5	4
4	0.541	1.5	8	3.5
5	2.100	1.5	4	4.5

Επιπρόσθετα τα δεδομένα που αφορούν την μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης (ΜΠ4) συλλέχθηκαν από την εργασία των (Kanagaraj, Ponnambalam and Jawahar, 2013) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Δεδομένα συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.

Υποσύστημα i	$10^5 a_i$	β_i	v_i	w_i
1	1.000	1.5	1	1
2	2.300	1.5	2	2
3	0.300	1.5	3	3
4	2.300	1.5	2	2

Στον Πίνακα 6 αναγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας (ΜΠ7) τα οποία αντλήθηκαν από την εργασία των (Zhang et al., 2013).

Στον Πίνακα 7 αναγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες περίπτωσης δέκα (ΜΠ8) και δεκαπέντε (ΜΠ9) υποσυστημάτων, τα οποία συλλέχθηκαν από την εργασία (Agarwal and Sharma, 2010). Πιο συγκεκριμένα C_i το κόστος και r_i η αξιοπιστία των εξαρτημάτων του i -οστού υποσυστήματος, που παράχθηκαν τυχαία στο διάστημα $[0,1]$.

Πίνακας 6: Δεδομένα συστήματος μεγάλης κλίμακας.

Υποσύστημα i	$10^5 a_i$	β_i	v_i	w_i
1	0.600	1.5	2	8
2	0.100	1.5	5	9
3	1.200	1.5	5	6
4	0.300	1.5	4	10
5	2.900	1.5	4	8
6	1.700	1.5	1	9
7	2.600	1.5	1	9
8	2.500	1.5	4	7
9	1.300	1.5	4	9
10	1.800	1.5	3	8
11	2.400	1.5	3	9
12	1.300	1.5	1	8
13	1.200	1.5	1	7
14	2.100	1.5	3	10
15	0.900	1.5	4	6
16	1.300	1.5	5	7
17	1.900	1.5	1	7
18	2.700	1.5	4	8
19	2.800	1.5	2	9
20	1.500	1.5	1	9

Πίνακας 7: Δεδομένα συστημάτων δομής δέκα και δεκαπέντε υποσυστημάτων.

Υποσύστημα i	r_i	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1	0.6796	33.2468	35.6054	13.7848	44.1345	10.9891
2	0.7329	27.5668	44.9520	96.7365	25.9855	68.0713
3	0.6688	13.3800	28.6989	85.8783	19.2621	1.0164
4	0.6102	0.4710	0.4922	63.0815	12.1687	29.4809
5	0.7911	51.2555	39.6833	78.5364	23.9668	59.5441
6	0.8140	82.9415	59.2294	11.8123	28.9889	46.5904
7	0.8088	51.8804	78.4996	97.1872	47.8387	49.6226
8	0.7142	77.9446	86.6633	45.0850	25.0545	59.2594
9	0.8487	26.8835	7.8195	3.6722	76.9923	87.4070
10	0.7901	85.8722	27.7460	55.3950	53.3007	55.3175
11	0.6972	41.8733	90.4377	75.7999	95.0057	54.1269
12	0.6262	61.6181	58.0131	98.5166	97.9127	59.1341
13	0.6314	90.0418	77.8206	60.6308	37.2226	40.9427
14	0.6941	75.5947	36.4524	70.4654	96.9179	40.2141
15	0.6010	88.5974	61.0591	18.8802	42.1222	80.0045
d		3.2150	3.4710	3.3247	2.6236	3.4288

Τέλος στον Πίνακα 8 αναγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων (ΜΠ10), τα οποία συλλέχθηκαν από την εργασία των (Garg and Sharma, 2013) και (Mellal and Zio, 2016).

Πίνακας 8: Δεδομένα συστήματος γραμμής παραγωγή εργοστασίου φαρμάκων.

Υποσύστημα i	$10^5 a_i$	β_i	v_i	w_i
1	0.611360	1.5	4	9
2	4.032464	1.5	5	7
3	3.578225	1.5	3	5
4	3.654303	1.5	2	9
5	1.163718	1.5	3	9
6	2.966955	1.5	4	10
7	2.045865	1.5	1	6
8	2.649522	1.5	1	5
9	1.982908	1.5	4	8
10	3.516724	1.5	4	6

Ο Πίνακας 9 περιέχει τα άνω όρια των περιορισμών για τις μελέτες περίπτωσης που εμφανίζουν περιορισμούς κόστους, όγκου και βάρους στον φορμαλισμό τους. Πιο συγκεκριμένα οι στήλες V , C , W και $T(h)$ περιγράφουν τα άνω όρια των περιορισμών όγκου, κόστους, βάρους και τον χρόνο λειτουργίας εξαρτημάτων του συστήματος, αντίστοιχα.

Πίνακας 9: Άνω όρια περιορισμών μελετών περίπτωσης.

Μελέτη Περίπτωσης	V	C	W	$T(h)$
ΜΠ1	110	175	200	1000
ΜΠ2	180	175	100	1000
ΜΠ3	110	175	200	1000
ΜΠ4	250	400	500	1000
ΜΠ5	-	-	-	-
ΜΠ6	-	-	-	-
ΜΠ7	600	700	900	1000
ΜΠ8	-	-	-	-
ΜΠ9	-	-	-	-
ΜΠ10	289	553	483	1000

Ωστόσο, όπως παρατηρείται στον Πίνακα 9, οι μελέτες περίπτωσης ΜΠ5, ΜΠ6, ΜΠ8 και ΜΠ9 δεν εμφανίζουν τα παραπάνω ανώτατα όρια. Αυτό συμβαίνει καθώς οι εν λόγω μελέτες περίπτωσης δεν εμφανίζουν περιορισμούς κόστους, όγκου και βάρους στον φορμαλισμό τους, άλλα υπόκεινται μονάχα σε περιορισμούς κατώτατης αξιοπιστίας. Πιο συγκεκριμένα αποτελούν προβλήματα ελαχιστοποίησης κόστους, όπου η συνολική αξιοπιστία δεν πρέπει να περιοριστεί κάτω από ένα όριο.

4.4 Αποτελέσματα

Οι Πίνακας 10-Πίνακας 19 περιέχουν τα αποτελέσματα των υβριδικών σχημάτων που σχηματίστηκαν για όλες τις μελέτες περίπτωσης που αναφέρονται παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα κάθε πίνακας περιέχει τις αποδόσεις συνολικής αξιοπιστίας (R_s) ή συνολικού κόστους (C_s) των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην εκάστοτε μελέτη περίπτωσης καθώς

την κατάταξη τους, από την καλύτερη προς την χειρότερη απόδοση, σε βαθμό. Περιέχει επίσης την κατανομή εφεδρείας (n_i) ή και της αξιοπιστίας (r_i) που περιγράφουν την καλύτερη λύση προσέγγισης της εκάστοτε μεθόδου, ανάλογα με το πρόβλημα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας που εξετάζεται σε κάθε μελέτη περίπτωσης. Επιπρόσθετα περιέχεται η μέση απόδοση (mean), η λοξότητα (skewness), η τυπική απόκλιση (standard deviation) προκειμένου να εξεταστούν οι μέθοδοι ως την σταθερότητα των αποδόσεων τους για τις 50 ανεξάρτητες εκτελέσεις. Επιπρόσθετα, περιέχουν το ΠΚΑΣ, που αποτελείται από τις παραμέτρους του πληθυσμού και των γενεών.

Στους εν λόγω πίνακες έχουν προστεθεί τα αποτελέσματα μεθόδων της βιβλιογραφίας, όπου επιλέχθηκαν εκείνες οι οποίες παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν η Βελτιωμένη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (BBSS) των (Wu et al., 2011), η Προσέγγιση Δύο Φάσεων Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (ΠΔΦΤΑΜ) των (Garg, Rani and Sharma, 2013), η Προσέγγιση Δύο Φάσεων Ανοσοποιητικού Συστήματος (ΠΔΦΑΣ) που πρότειναν οι (Hsieh and You, 2011), ο Τροποποιημένος Αλγόριθμος Ιμπεριαλιστικού Ανταγωνισμού με την μέθοδο Έλξης - Απόρριψης (ΑΙΑΑΕ) που προτάθηκε από τους (Afonso, Mariani and dos Santos Coelho, 2013) και η Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ με μέθοδο Ποινής (ΣΑΦΠ) των (Mellal and Zio, 2016).

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως οι παραπάνω μέθοδοι της βιβλιογραφίας χρησιμοποίησαν πολύ μεγαλύτερες παραμέτρους πληθυσμού και των γενεών, δηλαδή μεγαλύτερο ΠΚΑΣ. Όπως είναι αναμενόμενο, μια αύξηση στο ΠΚΑΣ έχει ως συνέπεια την βελτίωση της λύσης, ωστόσο αυξάνεται και ο χρόνος εκτέλεσης. Συνεπώς, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το ελάχιστο ΠΚΑΣ μεταξύ των μεθόδων της βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα 5000. Αναλυτικότερα ο αριθμός του πληθυσμού και των γενεών είναι 50 και 100 αντίστοιχα, σε αντίθεση με τις περισσότερες παραπάνω εργασίες που είναι αρκετά μεγαλύτερες, όπως η ΠΔΦΤΑΜ που χρησιμοποίησε 20000.

Οι παραπάνω μέθοδοι της βιβλιογραφίας χρησιμοποιούνται για την συγκριτική αξιολόγηση των υβριδικών σχημάτων και δεν υπάρχουν περαιτέρω δεδομένα για την πειραματική μελέτη κάθε μελέτης περίπτωσης. Έτσι, αυτές οι μέθοδοι δεν περιλαμβάνονται στο μη παραμετρικό Friedman Test που εφαρμόζεται.

Πίνακας 10: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού συστήματος.

Μέθοδος	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)$	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα α	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑ Σ	Κατάτ αξη
ΓΑ-ΒΣΣ	[3 2 2 3 3]	0.7545105	0.8800261	0.8711731	0.7202620	0.7787442	0.9238893	0.8004371	-4.8108	1.310e-1	44.472	5000	1
ΓΑ-ΑΠ	[2 2 3 3 3]	0.8745962	0.8510011	0.7763702	0.7050796	0.7413991	0.9112116	0.7955184	-0.22731	7.4582e-2	45.103	5000	4
ΓΑ-ΑΚ	[2 2 2 4 3]	0.8299399	0.8322508	0.8090354	0.6675312	0.7749415	0.8879875	0.7648962	-0.9910	8.2039e-2	50.534	5000	9
ΑΝ-ΒΣΣ	[3 4 4 2 3]	0.7322961	0.8339825	0.9278313	0.7078612	0.8165066	0.9194420	0.8890314	-1.4263	1.8539e-2	93.465	5000	3
ΑΝ-ΑΠ	[3 2 3 3 2]	0.7601601	0.8800017	0.8290766	0.7122300	0.8477050	0.9222039	0.8955521	-0.6620	1.6133e-2	109.411	5000	2
ΑΝ-ΑΚ	[4 2 3 4 2]	0.7875297	0.7936398	0.8138101	0.7203229	0.8509347	0.9063440	0.8537641	-0.2592	2.5593e-2	101.779	5000	7
ΑΑΚ-ΒΣΣ	[2 3 2 4 2]	0.8022818	0.7448302	0.9110573	0.6837565	0.8489308	0.9069099	0.8589195	-0.4199	2.7152e-2	18.235	5000	5
ΑΑΚ-ΑΠ	[3 2 2 3 3]	0.8007063	0.8928739	0.8219323	0.6652808	0.7998494	0.9066637	0.8060672	-0.5674	5.1492e-2	17.926	5000	6
ΑΑΚ-ΑΚ	[3 2 2 3 3]	0.7146244	0.8453011	0.9206000	0.7050329	0.6851439	0.8942485	0.8419700	0.1244	2.7663e-2	25.449	5000	8
Συγκρινόμενες Μέθοδοι													
ΒΒΣΣ	[3 2 2 3 3]	0.7803730	0.8717834	0.9024089	0.7114735	0.7873876	0.931680	-	-	5.2382e-3	-	13500	-
ΠΔΦΑΣ	[3 2 2 3 3]	0.7794623	0.8718834	0.9028008	0.7113501	0.7878615	0.9316823	-	-	1.3e-14	-	13500	-
ΠΔΤΑΜ	[3 2 2 3 3]	0.7794035	0.8718332	0.9028864	0.7113980	0.7878085	0.9316823	-	-	2.3721e-8	-	20000	-
ΑΙΑΑΕ	[3 2 2 3 3]	0.779874	0.872057	0.903426	0.710960	0.786902	0.9316793	-	-	1.8631e-2	-	13500	-
ΣΑΦΠ	[3 2 2 3 3]	0.7793988	0.8718370	0.902885	0.7114025	0.7877994	0.9316823	-	-	2.5e-16	-	-	-

Πίνακας 11: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού -παράλληλου συστήματος.

Μέθοδος	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)$	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα α	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑ Σ	Κατάτ αξη
ΓΑ-ΒΣΣ	[2 2 2 2 4]	0.7639756	0.8262501	0.8708464	0.8930783	0.8788979	0.9999658	0.9996717	-3.3443	5.2556e-4	42.033	5000	2
ΓΑ-ΑΠ	[3 2 1 3 3]	0.7870396	0.8742919	0.8815361	0.8583518	0.8880768	0.9999560	0.9990697	-5.5806	2.3110e-3	49.377	5000	4
ΓΑ-ΑΚ	[1 1 3 2 4]	0.7546282	0.8446259	0.9363299	0.5786509	0.8768008	0.9998998	0.9990727	-2.9797	1.1248e-3	48.628	5000	9
ΑΝ-ΒΣΣ	[2 2 3 2 3]	0.7932538	0.7771774	0.9136076	0.8875869	0.8661208	0.9999624	0.9999172	-0.8696	2.6998e-5	91.111	5000	3
ΑΝ-ΑΠ	[2 2 2 2 4]	0.8217028	0.8721355	0.8939017	0.9072473	0.8510911	0.9999719	0.9999480	-1.4857	2.0341e-5	112.502	5000	1
ΑΝ-ΑΚ	[3 1 2 1 1]	0.8003999	0.8555584	0.9264178	0.6690808	0.8617519	0.9999515	0.9998155	-1.0108	1.1e-4	97.931	5000	6
ΑΑΚ-ΒΣΣ	[2 2 2 2 4]	0.7932358	0.9043511	0.8158581	0.8648214	0.8531819	0.9999441	0.9998438	-0.27	5.8277e-5	17.728	5000	7
ΑΑΚ-ΑΠ	[3 2 2 3 3]	0.7195405	0.8573660	0.8577840	0.8876162	0.8964761	0.9999522	0.9998260	-2.4706	1.1354e-4	23.075	5000	5
ΑΑΚ-ΑΚ	[3 2 3 1 3]	0.7819565	0.8453889	0.8822145	0.5200343	0.8886565	0.9999263	0.9997746	-1.1464	1.1463e-4	24.517	5000	8
Συγκρινόμενες Μέθοδοι													
ΒΒΣΣ	[2 2 2 2 4]	0.8191852	0.8436642	0.8947299	0.8953762	0.8691272 4	0.9999766 4	-	-	1.3362e-5	-	13500	-
ΠΔΦΑΣ	[2 2 2 2 4]	0.8195915	0.8449510	0.8954285	0.8955223	0.8684902 29	0.9999766 49036520	-	-	3.0e-21	-	13500	-
ΠΔΦΤΑΜ	[2 2 2 2 4]	0.8197377	0.8449910	0.8955295	0.8954336	0.8684348 24469	0.9999766 49054	-	-	3.182e-11	-	20000	-
ΑΙΑΑΕ	[2 2 2 2 4]	0.8220126	0.8436564	0.8912909	0.8986988	0.8682493	0.9999766 1	-	-	2.58e-6	-	13500	-
ΣΑΦΠ	[2 2 2 2 4]	0.8196593	0.8449808	0.8955064	0.8955064	0.8684476	0.9999766 49066172	-	-	1.7e-25	-	5000	-

Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας.

Μέθοδος	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)$	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΓΑ-ΒΣΣ	[3 3 3 3 1]	0.8220289	0.8471774	0.8230227	0.7026795	0.8281983	0.99984643	0.9783320	-7.0688	1.4119e-1	44.636	5000	3
ΓΑ-ΑΠ	[3 3 3 2 2]	0.7281925	0.8676278	0.8268853	0.7730835	0.7700785	0.9997215	0.9975967	-3.9101	3.0628e-3	43.341	5000	8
ΓΑ-ΑΚ	[2 3 3 3 2]	0.8375571	0.8828445	0.8675870	0.5745204	0.8258592	0.99975339	0.9977016	-3.7896	2.52e-3	51.323	5000	6
ΑΝ-ΒΣΣ	[2 3 2 5 1]	0.8101999	0.8641083	0.8436629	0.6628550	0.8802721	0.99984543	0.9996511	-1.7162	1.38e-4	93.396	5000	4
ΑΝ-ΑΠ	[3 3 3 3 1]	0.7502560	0.8541662	0.8834046	0.7288871	0.8308446	0.99986044	0.9996825	-1.1921	1.2118e-4	105.488	5000	1
ΑΝ-ΑΚ	[3 3 2 4 1]	0.8570292	0.8092453	0.8803222	0.6271186	0.8310061	0.99979818	0.9993677	-1.4913	3.5902e-4	100.681	5000	5
ΑΑΚ-ΒΣΣ	[3 3 3 3 1]	0.7625709	0.8393140	0.8549111	0.7541376	0.7729449	0.99984982	0.9995126	-1.5907	2.1325e-4	18.055	5000	2
ΑΑΚ-ΑΠ	[3 3 3 2 2]	0.6910497	0.8503643	0.9053050	0.7553722	0.7876277	0.99969508	0.9989706	-1.2425	5.1193e-4	17.039	5000	9
ΑΑΚ-ΑΚ	[3 3 3 3 1]	0.8555359	0.8084809	0.7851991	0.7108977	0.5139537	0.99973264	0.9992896	-1.6332	3.0767e-4	25.113	5000	7
Συγκρινόμενες Μέθοδοι													
ΒΒΣΣ	[3 3 2 4 1]	0.8286836 1	0.8580256 7	0.9136461 6	0.6480340 7	0.7022759 5	0.99988963	-	-	4.0163e-5	-	13500	-
ΠΔΦΑΣ	[3 3 3 3 1]	0.8166241 76	0.8687673 96	0.8587487 81	0.7102793 79	0.7534292	0.99988935 05	-	-	4.0e-20	-	13500	-
ΠΔΦΤΑ Μ	[3 3 2 4 1]	0.8279702 76262	0.8578747 58586	0.9141864 04228	0.6483553 86813	0.7035753 11047	0.99988963 5809	-	-	8.667e-9	-	20000	-
ΑΙΑΑΕ	[3 3 2 4 1]	0.8276425 7	0.8574784 5	0.9141967 7	0.6492737 9	0.7040920 0	0.99988963	-	-	1.0371e-4	-	13500	-
ΣΑΦΠ	[3 3 2 4 1]	0.8281214 1729	0.8578134 1076	0.9142392 7822	0.6480768 0660	0.7042464 1245	0.99988963 7512067	-	-	3.7e-23	-	5000	-

Πίνακας 13: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.

Μέθοδος	(n_1, n_2, n_3, n_4)	r_1	r_2	r_3	r_4	R_5	Μέση Απόδοση	Λοξότητα α	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΓΑ-ΒΣΣ	[5 5 5 5]	0.911345	0.861644	0.939521	0.876066	0.999913	0.991016	-5.4598	2.2979e-2	42.114	5000	4
ΓΑ-ΑΠ	[4 5 5 6]	0.919585	0.877834	0.953599	0.834174	0.999909	0.978419	-5.2755	4.4697e-2	45.733	5000	5
ΓΑ-ΑΚ	[4 6 4 3]	0.842808	0.788520	0.889007	0.938336	0.998914	0.980482	-2.5148	2.6008e-2	48.538	5000	9
ΑΝ-ΒΣΣ	[5 4 6 4]	0.883722	0.881820	0.949113	0.864035	0.999942	0.999808	-1.9446	1.0095e-4	85.506	5000	2
ΑΝ-ΑΠ	[5 6 4 5]	0.897970	0.848433	0.939696	0.893112	0.999949	0.999921	-3.7330	2.5559e-5	117.529	5000	1
ΑΝ-ΑΚ	[5 6 6 7]	0.911518	0.866145	0.926235	0.867516	0.999916	0.998972	-1.3174	8.0806e-4	93.2763 9842033	5000	3
ΑΑΚ-ΒΣΣ	[5 5 5 5]	0.904075	0.908658	0.872234	0.83008	0.999809	0.998669	-0.7284	7.2104e-4	16.441	5000	6
ΑΑΚ-ΑΠ	[6 6 3 5]	0.912354	0.767947	0.974179	0.834662	0.999702	0.999009	-0.4271	5.2655e-4	27.284	5000	8
ΑΑΚ-ΑΚ	[6 6 4 4]	0.768580	0.857342	0.922411	0.918010	0.999756	0.997923	-0.5496	1.2609e-3	23.837	5000	7
Συγκρινόμενες Μέθοδοι												
ΒΒΣΣ	[5 6 4 5]	0.901631 64	0.849970 20	0.948218 28	0.888128 85	0.999954 67426440	-	-	1.3895e-5	-	13500	-
ΠΔΦΑΣ	[5 5 4 6]	0.901588 628	0.888192 380	0.948166 022	0.849969 792	0.999954 67455458	-	-	4.14e-18	-	13500	-
ΠΔΦΤΑΜ	[5 5 4 6]	0.901626 809561	0.888208 355883	0.948134 377884	0.849942 135673	0.999954 674663	-	-	3.3868e-11	-	20000	-
ΑΙΑΑΕ	[5 6 4 5]	0.901489 88	0.850035 26	0.948129 52	0.888238 33	0.999954 673	-	-	2.204e-5	-	13500	-
ΣΑΦΠ	[5 6 4 5]	0.901614 7331806	0.849921 1645063	0.948141 3898152	0.888222 8732368	0.999954 67467678	-	-	2.8e-20	-	5000	-

Πίνακας 14: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου.

Μέθοδος	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	C_s	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΒΣΣ	0.9259632	0.9379067	0.7922623	0.9478121	0.9313917	5.02049	0.99	5.02297	0.6674	1.4653e-3	12.104	5000	1
ΑΠ	0.9413146	0.9442424	0.8449202	0.9417047	0.9104224	5.02097	0.99	2602.4111	-0.0825	2520.8251	19.080	5000	2
ΑΚ	0.9280782	0.9573253	0.8333633	0.9432654	0.9244147	5.02231	0.99	2802.2353	-0.2492	2504.5852	12.810	5000	3
Συγκρινόμενες Μέθοδοι													
ΠΔΦΤΑΜ	0.9354525	0.9343896	0.7904110	0.9354104	0.9344815	5.0199187 54645	0.99	-	-	7.51e-6	-	20000	-
ΣΑΦΠ	0.9348956 8729	0.9348956 7889	0.7920412 0018	0.9348956 7384	0.9348957 3430	5.0199181 27360	0.99	-	-	1.6e-11	-	5000	-

Πίνακας 15: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.

Μέθοδος	r_1	r_2	r_3	r_4	C_s	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΒΣΣ	0.776528 78	0.877546 51	0.688148 55	0.813771 75	414.923	0.99	400.873	0.9595	5.3775	10.183	5000	1
ΑΠ	0.852702 92	0.961681 46	0.715983 53	0.564758 95	671.524	0.99	429.164	4.7509	39.8289	46.118	5000	3
ΑΚ	0.848259 55	0.940265 02	0.668185 31	0.847563 68	609.233	0.99	474.003	0.5376	52.1644	10.063	5000	2
Συγκρινόμενες Μέθοδοι												
ΣΑΦΠ	0.825582 31742311	0.890154 65267833	0.627662 61897607	0.728849 47949575	390.570	-	-	-	7.3e-10	-	5000	-

Πίνακας 16: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας.

Μέθοδος	($n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10}, n_{11}, n_{12}, n_{13}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{17}, n_{18}, n_{19}, n_{20}$)	($r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}, r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}, r_{16}, r_{17}, r_{18}, r_{19}, r_{20}$)	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΑΣΑΠ	Κατάταξη
ΓΑ-ΒΣΣ	[2 3 1 4 3 2 2 1 2 4 2 2 2 4 3 2 1 4 3 2]	[0.86574354, 0.89018776, 0.93963789, 0.81850635, 0.84902692, 0.87637503, 0.8353498, 0.92669115, 0.79082697, 0.67161307, 0.82545395, 0.79165361, 0.85218146, 0.82145363, 0.9175641, 0.75659148, 0.85217732, 0.82493542, 0.74533937, 0.84998274]	0.5367924	0.3801731	-0.2421	9.4758e-2	54.302	5000	5
ΓΑ-ΑΠ	[4 2 2 4 4 2 2 3 2 3 1 3 2 2 3 1 1 4 3 2]	[0.70686068, 0.74630297, 0.94064688, 0.83034868, 0.82538642, 0.77885667, 0.85062287, 0.75354722, 0.74118726, 0.80190077, 0.90787765, 0.82797434, 0.88939714, 0.83014905, 0.88723875, 0.91688771, 0.90336858, 0.8302043, 0.79592354, 0.80344801]	0.5346837	0.351652	0.1620	9.4433e-2	48.079	5000	6
ΓΑ-ΑΚ	[3 2 2 3 4 2 3 1 4 2 3 2 4 2 2 4 2 2 3 2]	[0.80539154, 0.81701332, 0.60793345, 0.58412179, 0.78053565, 0.94866856, 0.75335853, 0.91343736, 0.70015184, 0.67891714, 0.70718875, 0.86209682, 0.8404816, 0.72341942, 0.86010423, 0.87266856, 0.6489483, 0.79875493, 0.77884733, 0.75934497]	0.4070495	0.233134	0.4333	6.2994e-2	55.171	5000	9
ΑΝ-ΒΣΣ	[4 2 2 1 3 4 2 3 3 3 2 2 4 2 1 3 3 4 3 1]	[0.72575717, 0.8845563, 0.80771045, 0.91630873, 0.74692078, 0.72476402, 0.82141717, 0.68021576, 0.83268491, 0.73563423, 0.74611708, 0.83740609, 0.79745784, 0.83541751, 0.96515861, 0.88619476, 0.67577041, 0.70206758, 0.78981277, 0.96471012]	0.6049446	0.450661	0.1675	6.2446e-2	214.979	5000	3
ΑΝ-ΑΠ	[3 3 3 3 3 4 2 3 3 1 2 2 2 2 2 2 2 3 3 3]	[0.71538598, 0.86378195, 0.7370027, 0.83643078, 0.77899421, 0.78337297, 0.77549499, 0.83148188, 0.89599692, 0.91030873, 0.83447931, 0.68920899, 0.77329324, 0.8808367, 0.90169734, 0.86329297, 0.81941893, 0.82172456, 0.87911167, 0.91217296]	0.6190610	0.4617257	-0.0927	6.9825e-2	213.956	5000	1
ΑΝ-ΑΚ	[3 1 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 2 4 2]	[0.60336163, 0.9177108, 0.74743676, 0.79032498, 0.85134551, 0.76721316, 0.9190047, 0.63268491, 0.87204781, 0.85000289, 0.52363877, 0.87573567, 0.72417866, 0.64041656, 0.77930755, 0.88899148, 0.72957953, 0.90586257, 0.75584965, 0.83470421]	0.5250984	0.304205	0.8904	6.8903e-2	218.545	5000	7
ΑΑΚ-ΒΣΣ	[4 3 1 3 3 3 4 2 3 2 3 2 2 2 3 3 2 2 2 3]	[0.86688302, 0.76938663, 0.85830831, 0.86679386, 0.75780897, 0.86073827, 0.79573814, 0.75476958, 0.78033016, 0.89786796, 0.78573698, 0.900175, 0.77992969, 0.90631403, 0.83086075, 0.80098236, 0.80450257, 0.75721642, 0.82711622, 0.82743254]	0.6089167	0.412952	0.7908	5.9515e-2	37.567	5000	2
ΑΑΚ-ΑΠ	[3 3 1 2 4 2 3 2 3 3 1 3 3 3 4 3 1 3 2 3]	[0.80603994, 0.95349097, 0.87006338, 0.8921912, 0.73943083, 0.85373055, 0.67880364, 0.89203083, 0.91360912, 0.83100699, 0.88014307, 0.80028078, 0.87904355, 0.8585309, 0.76827467, 0.76097322, 0.88720125, 0.73835901, 0.85736891, 0.85826701]	0.574914	0.374449	0.5976	6.5278e-2	28.660	5000	4

ΑΑΚ-ΑΚ	[3 1 3 3 4 3 3 2 2 4 1 3 2 2 2 3 4 2 4 1]	[0.83942843, 0.96252112, 0.92318938, 0.76830515, 0.59703232, 0.89708798, 0.81564311, 0.72001291, 0.64363978, 0.5136451, 0.90689995, 0.67862193, 0.70523164, 0.80721216, 0.75929246, 0.75170938, 0.56819798, 0.86390341, 0.75802347, 0.96739337]	0.453632	0.2978466	0.8886	4.8273e-2	37.998	5000	8
--------	----------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	-----------	--------	-----------	--------	------	---

Συγκρινόμενες Μέθοδοι

ΒΒΣΣ	-	-	0.8842325 77	-	-	2.27e-2	-	40000	-
ΣΑΦΠ	[2 2 3 2 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3]	[0.920682125899, 0.952579760087, 0.840370879766, 0.934499487329, 0.806884188682, 0.895206390582, 0.811801524606, 0.814181963158, 0.83622022357, 0.827983638973, 0.814585208335, 0.837346324449, 0.841065088128, 0.821075460589, 0.850117124276, 0.838491056144, 0.823073269011, 0.80995645884, 0.807719250830, 0.897948276899]	0.8905173 0902	-	-	3.5e-8	-	5000	-

Πίνακας 17: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων.

Μέθοδος	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10})$	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΓΑ	[1 6 3 3 2 2 3 3 1 1]	0.997519670 2036736	0.6465741 46988974	-0.7726	0.4496	43.790	5000	3
ΑΝ	[2 3 5 3 1 3 2 4 1 3]	0.999998840 724242	0.8198980 99819781	-1.7178	0.3880	133.304	5000	1
ΑΑΚ	[1 3 4 3 1 1 4 4 2 3]	0.998388798 0954228	0.5747198 05216780	-0.4102	0.4748	6.926	5000	2
Συγκρινόμενες Μέθοδοι								
ΣΑΦΠ	[4 4 5 6 1 1 2 3 2 2]	0.998721878 906043	-	-	7.2e-19	-	5000	-

Πίνακας 18: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων.

Μέθοδος	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10}, n_{11}, n_{12}, n_{13}, n_{14}, n_{15})$	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΓΑ	[2 3 4 5 5 3 3 5 4 2 1 3 3 1 2]	0.985167772 820719	0.2357551 06097489 0.039963	1.0743	0.3857	10.060	5000	2
ΑΝ	[8 6 7 10 6 5 1 1 3 2 1 1 1 1 3]	0.999109034 3530084	17440476 5	4.8413	0.1977	191.412	5000	1
ΑΑΚ	[3 2 3 7 3 5 1 1 2 4 1 2 1 1 5]	0.966222266 7915392	0.1878235 43799345	1.4477	0.3599	10.075	5000	3
Συγκρινόμενες Μέθοδοι								
ΣΑΦΠ	[8 5 7 9 6 7 1 1 3 2 1 1 1 1 1]	0.999259685 931657	-	-	1.4e-9	-	5000	-

Πίνακας 19: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων.

Μέθοδος	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10})$	$(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10})$	R_s	Μέση Απόδοση	Λοξότητα	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Κατάταξη
ΓΑ-ΒΣΣ	[3 3 3 3 2 3 3 4 3]	[0.82600773, 0.7482216, 0.80190019, 0.80174165, 0.85355347, 0.86207137, 0.8411962, 0.83169037, 0.81800845, 0.89083162]	0.9318870	0.7968349	-0.1669	6.4175e-2	45.644	5000	1
ΓΑ-ΑΠ	[2 2 2 2 3 4 3 4 4 3]	[0.85855769, 0.86719334, 0.89734336, 0.8323445, 0.86002955, 0.78619046, 0.8911746, 0.71377276, 0.71134815, 0.7831308]	0.8983551	0.7486226	-0.6046	8.2428e-2	44.396	5000	4
ΓΑ-ΑΚ	[2 3 3 4 3 4 1 2 3 3]	[0.84334543, 0.73219092, 0.69335335, 0.64180959, 0.64567942, 0.76079926, 0.93618873, 0.92604846, 0.8551598, 0.72688616]	0.7914198	0.6720130	-0.8972	7.2735e-2	51.056	5000	9
ΑΝ-ΒΣΣ	[3 3 2 4 3 2 4 2 3 3]	[0.85168408, 0.79133323, 0.8723485, 0.84274274, 0.69974684, 0.82223188, 0.71170001, 0.83930191, 0.87115064, 0.86388812]	0.9043594	0.8362851	-0.7303	4.8144e-2	132.664	5000	3
ΑΝ-ΑΠ	[3 2 4 3 2 3 2 3 3 4]	[0.85588228, 0.85235332, 0.71501577, 0.7831789, 0.89461506, 0.88399237, 0.89202705, 0.81504916, 0.84671203, 0.75088281]	0.9229569	0.8763177	-0.6480	2.6322e-2	142.282	5000	2
ΑΝ-ΑΚ	[4 3 3 3 2 2 5 4 5]	[0.96195427, 0.75822017, 0.67626597, 0.81191284, 0.90160527, 0.77712475, 0.83297502, 0.73416031, 0.63158939, 0.71898525]	0.8523010	0.7448431	-0.6062	4.9934e-2	138.771	5000	7
ΑΑΚ-ΒΣΣ	[2 2 3 3 4 2 3 4 4 2]	[0.87856893, 0.83212248, 0.79434866, 0.75999592, 0.78625587, 0.76960511, 0.81506182, 0.8478998, 0.80220467, 0.92003644]	0.8714830	0.8028079	-0.2433	3.7553e-2	24.866	5000	5
ΑΑΚ-ΑΠ	[2 4 4 4 2 3 2 2 2 3]	[0.9236325, 0.84904853, 0.75712529, 0.81869038, 0.82314991, 0.76446428, 0.8518805, 0.80987079, 0.86761887, 0.81516929]	0.8703320	0.7798588	-0.0161	4.0863e-2	25.788	5000	6
ΑΑΚ-ΑΚ	[3 2 3 3 2 3 2 4 4]	[0.7876769, 0.93313662, 0.80466996, 0.79724322, 0.6570911, 0.83596149, 0.74261031, 0.84273892, 0.75761519, 0.63399629]	0.8502795	0.7506321	0.1536	3.96e-2	29.181	5000	8

Συγκρινόμενες Μέθοδοι

ΣΑΦΠ	[3 3 3 3 3 3 4 3 3]	[0.88380942954, 0.82401235102, 0.82854756196, 0.82778491734, 0.86606546371, 0.83549324163, 0.84838122612, 0.77741531196, 0.84940798704, 0.8292440869]	0.9622918 216	-	-	2.8e-12	5000	-
------	---------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------	---	---	---------	------	---

Αναφορικά με την μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος, στον Πίνακα 10, το υβριδικό σχήμα ΓΑ-ΒΣΣ φαίνεται να υπερνικά των υπόλοιπων σχημάτων με μέγιστη συνολική αξιοπιστία 0.923889, ενώ παράλληλα παρουσιάζει την καλύτερη μέση απόδοση 0.800437 και την μικρότερη τυπική απόκλιση $1.310e-1$ με αρνητική λοξότητα -4.8108 , δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται προς το μέγιστο αυτών. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία, παρά το μικρό ΠΚΑΣ, το υβριδικό σχήμα φαίνεται να αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με την ΣΑΦΠ (Mellal and Zio, 2016), η οποία υπερνικά των υπολοίπων με μέγιστη συνολική αξιοπιστία 0.9316823 και τυπική απόκλιση $2.5e-16$.

Σχετικά με τον Πίνακα 11 το AN-ΑΠ εμφανίζει μέγιστη απόδοση 0.999971 για την μελέτη περίπτωσης σειριακού-παράλληλου συστήματος, ενώ επίσης παρουσιάζει την καλύτερη μέση απόδοση 0.999948 σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αναφορικά με την τυπική απόκλιση παρατηρείται το ΑΑΚ-ΒΣΣ να κατέχει την μικρότερη $5.8277e-5$ σε σύγκριση με του AN-ΑΠ ($2.0341e-5$). Τα παραπάνω υβριδικά σχήματα φαίνονται να αποδίδουν ικανοποιητική συνολική αξιοπιστία σε σχέση με τις μεθόδους της βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα την ΣΑΦΠ 0.999976, εν 'τούτης τα επίπεδα τυπικής απόκλισης είναι χαμηλά συγκριτικά με την ΣΑΦΠ $1.7e-25$, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στην μικρό ΠΚΑΣ.

Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας και μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 και Πίνακα 13 αντίστοιχα, ανέδειξαν το AN-ΑΠ να υπερνικά ως προς συνολική αξιοπιστία 0.999860 και 0.999949. Επίσης, το AN-ΑΠ φαίνεται να παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα ως προς την απόδοση των λύσεων, καθώς και στις δύο περιπτώσεις, καθώς εμφανίζει τυπική απόκλιση $1.2118e-4$ και $2.5559e-5$. Η καλύτερες αποδόσεις έχουν επιτευχθεί από την ΣΑΦΠ με συνολική αξιοπιστία 0.999889 και 0.999954 αντίστοιχα, με αποτέλεσμα το AN-ΑΠ να είναι πλησίον της ΣΑΦΠ ως προς την απόδοση της μέγιστης συνολική αξιοπιστίας.

Οι Πίνακας 14-Πίνακας 15 περιέχουν τα αποτελέσματα των μελετών περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου και συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα οι οποίες παρουσιάζουν το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους. Συνεπώς η προσέγγιση τους έγινε από τις επιμέρους μεθόδους των υβριδικών σχημάτων που προσεγγίζουν τον στόχο συνεχούς χώρου λύσεων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ΒΣΣ απόδωσε το ελάχιστο κόστος 5.02049 και 414.923. Επίσης, η ΒΣΣ απέφερε τις μικρότερες τυπικές αποκλίσεις μεγέθους $1.4653e-3$ και 5.3775 σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους που αναπτύχθηκαν. Ωστόσο, η ΣΑΦΠ παρουσιάζει ελάχιστο κόστος 5.019918 και 390.570 με πολύ χαμηλή τυπική απόκλιση $1.6e-11$ και $7.3e-10$.

Ωστόσο οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν κατάφεραν να αποφέρουν λύσεις κοντά σε αυτές των ΣΑΦΠ και ΠΔΦΤΑΜ, παρόλο του μικρού ΠΚΑΣ.

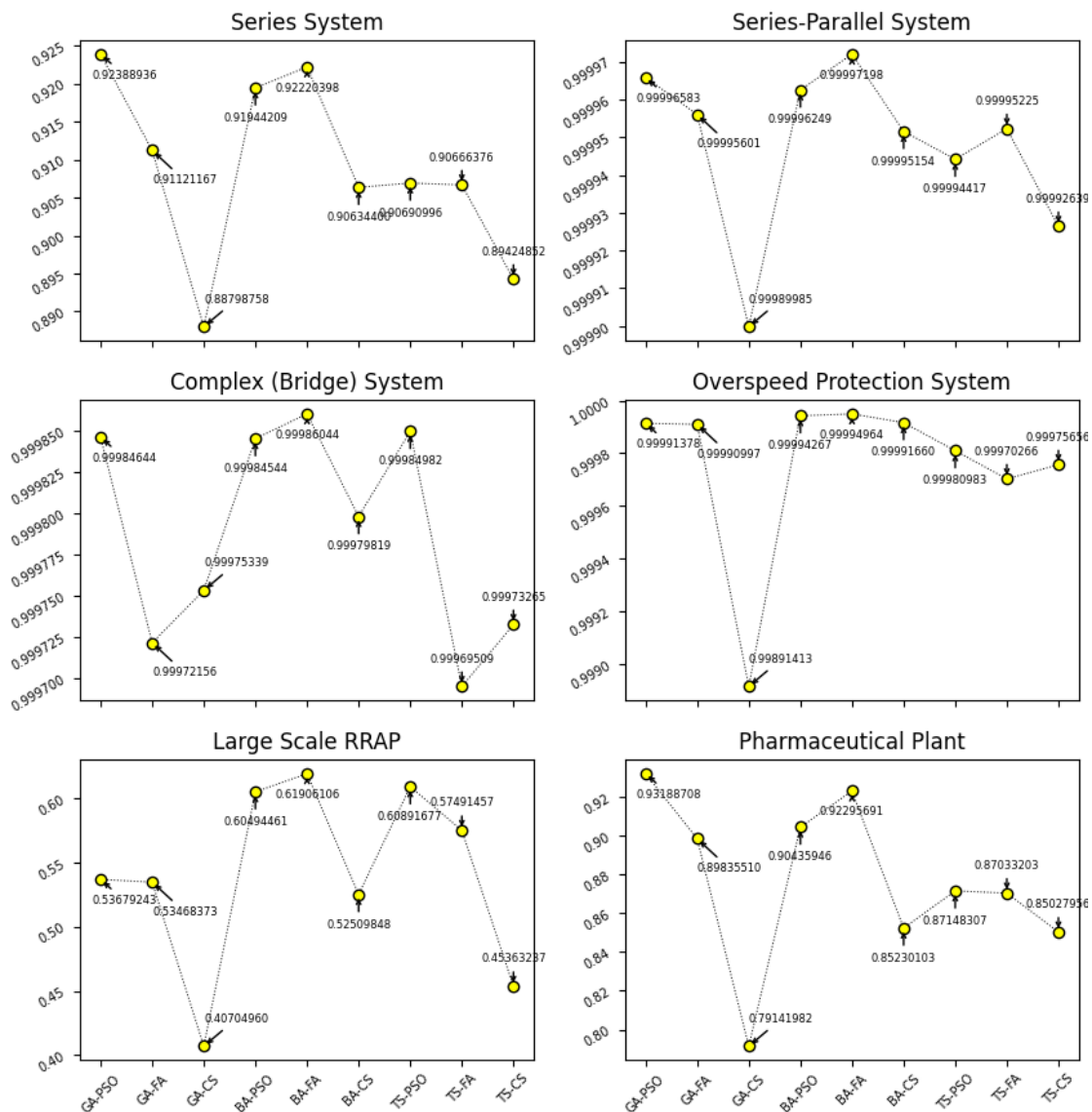
Σχετικά με την μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας τα αποτελέσματα που περιέχονται στον Πίνακας 16 ανέδειξαν την ΑΝ-ΑΠ να υπερνικά των υπολοίπων υβριδικών σχημάτων με μέγιστη συνολική αξιοπιστία 0.619061. Επιπρόσθετα εμφανίζει την καλύτερη μέση απόδοση 0.461725 με ικανοποιητική τυπική απόκλιση $6.9825e-2$ καθορίζοντας την σταθερή ως προς την απόδοση της. Συγκρίνοντας το με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας φαίνεται να παρουσιάζει κατώτερη στατιστική απόδοση σε σχέση με την ΒΒΣΣ και την ΣΑΦΠ που επέφεραν συνολική αξιοπιστία 0.884232 και 0.890517 με τυπική απόκλιση $2.27e-2$ και $3.5e-8$ αντίστοιχα. Ωστόσο, το ΠΚΑΣ που χρησιμοποιεί η ΒΒΣΣ είναι πολύ μεγαλύτερος και συγκεκριμένα 40000 έναντι των υβριδικών σχημάτων που είναι 5000.

Οι Πίνακας 17-Πίνακας 18 περιέχουν τα αποτελέσματα των μελετών περίπτωσης συστημάτων δομής δέκα και δεκαπέντε υποσυστημάτων οι οποίες παρουσιάζουν το πρόβλημα κατανομής εφεδρείας με στόχο την μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας. Συνεπώς η προσέγγιση τους έγινε από τις επιμέρους μεθόδους των υβριδικών σχημάτων που προσεγγίζουν τον στόχο διακριτού χώρου λύσεων. Και στις δύο περιπτώσεις, η ΑΝ επιφέρει την μέγιστη συνολική αξιοπιστία μεγέθους 0.999998 και 0.999109 αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, στην μελέτη περίπτωσης δέκα υποσυστημάτων φαίνεται αρκετά καλή ως προς την σταθερότητα απόδοσης λύσεων καθώς εκφέρει την μεγαλύτερη μέση απόδοση μεγέθους 0.819898 με τυπική απόκλιση 0.3880. Συγκρίνοντας το με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από την ΣΑΦΠ στην περίπτωση των δέκα υποσυστημάτων που επέφερε συνολική αξιοπιστία 0.998721, ενώ στην περίπτωση δεκαπέντε υποσυστημάτων φαίνεται να την προσεγγίζει. Ωστόσο η ΣΑΦΠ παρουσιάζει πολύ μεγάλη σταθερότητα ως προς την απόδοση των λύσεων σε σχέση με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν, καθώς εμφανίζει αρκετά μικρές τυπικές αποκλίσεις μεγέθους $7.2e-19$ και $1.4e-9$ αντίστοιχα.

Τέλος, ο Πίνακας 19 περιέχει τα αποτελέσματα για την μελέτη περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων όπου το ΓΑ-ΒΣΣ εμφάνισε την μέγιστη συνολική αξιοπιστία μεγέθους 0.931887. Ωστόσο, η ΑΝ-ΑΠ παρουσιάζει καλύτερη μέση απόδοση μεγέθους 0.876317, έναντι του ΓΑ-ΒΣΣ που εμφανίζει μέση απόδοση μεγέθους 0.796834. Συγκριτικά με την ΣΑΦΠ που έχει προσεγγίσει το πρόβλημα αποδίδοντας συνολική αξιοπιστία μεγέθους 0.96229, το αποτέλεσμα του ΓΑ-ΒΣΣ είναι ικανοποιητικό, όμως δεν είναι τόσο σταθερό ως προς την απόδοση των λύσεων καθώς η ΣΑΦΠ παρουσιάζει μια αρκετά χαμηλή τυπική απόκλιση μεγέθους $2.8e-12$.

Προκειμένου να συνοψιστούν τα πειραματικά αποτελέσματα, το Διάγραμμα 1 απεικονίζει την απόδοση που επιτυγχάνεται από τα υβριδικά σχήματα. Συγκεκριμένα, τα

διαγράμματα παρουσιάζουν την καλύτερη επιτευχθείσα συνολική αξιοπιστία για τις μελέτες περίπτωσης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας. Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την συνολική αξιοπιστία, ενώ ο οριζόντιος τα ανεπτυγμένα υβριδικά σχήματα. Η σειρά που αναγράφονται τα υβριδικά σχήματα απεικονίζονται στα διαγράμματα των μελετών περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας και γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων, δηλαδή Large Scale RRAP και Pharmaceutical Plant στο διάγραμμα.



Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα υβριδικών σχημάτων σε κάθε μελέτη περίπτωσης κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα και όσον αφορά την εφαρμογή των υβριδικών σχημάτων στις μελέτες περίπτωσης βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, το υβριδικό σχήμα AN-ΑΠ ξεπέρασε σε απόδοση όλα τα υπόλοιπα υβριδικά σχήματα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, ενώ παρουσιάζει ικανοποιητική στατιστική απόδοση σε σύγκριση με της μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί στην βιβλιογραφία.

Επιπρόσθετα, προκειμένου να προσδιοριστεί αν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς (αποτελεσμάτων) των υβριδικών σχημάτων, εφαρμόστηκε το Friedman τεστ το οποίου τα αποτελέσματα του περιέχονται στον Πίνακα 20. Με επίπεδο σημαντικότητας 5%, το υβριδικό σχήμα AN-ΑΠ διαθέτει την καλύτερη στατιστική απόδοση, καταλαμβάνοντας την πρώτη θέση μεταξύ των υβριδικών σχημάτων (Πίνακας 20).

Πίνακας 20: Τεστ Friedman αποτελεσμάτων υβριδικών σχημάτων.

Μέθοδος	Friedman
ΓΑ-ΒΣΣ	2.67
ΓΑ-ΑΠ	5.16
ΓΑ-ΑΚ	8.50
ΑΝ-ΒΣΣ	3.00
ΑΝ-ΑΠ	1.34
ΑΝ-ΑΚ	5.83
ΑΑΚ-ΒΣΣ	4.50
ΑΑΚ-ΑΠ	6.33
ΑΑΚ-ΑΚ	7.67
Statistic	1173.9484
p-value	4.0762e-248

Επιπλέον παρατηρείται ότι τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από την ΑΑΚ, παρουσιάζουν την χαμηλότερη στατιστική απόδοση. Αυτό πιθανώς οφείλεται στη φύση του προβλήματος. Η προσέγγιση της ΑΑΚ είναι να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός σε τοπικό βέλτιστο επιβάλλοντας ποινή σε λύσεις που έχουν εξεταστεί σε προηγούμενη επανάληψη του αλγορίθμου (Glover, 1989). Ωστόσο, στα προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας η ποιότητα μιας λύσης εξαρτάται από τον συνδυασμό των δύο επιμέρους στόχων. Ως εκ τούτου, μια λύση κατανομής εφεδρείας που έχει εξεταστεί σε προηγούμενη επανάληψη, μπορεί να αποτελεί μια καλή λύση που έχει απορριφθεί. Έτσι, ο αριθμός των επαναλήψεων που μια προηγούμενη λύση βρίσκεται στη μνήμη της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων, μπορεί να θεωρηθεί εξαρτώμενος από το πρόβλημα.

Μια ακόμη τέτοια περίπτωση αποτελεί αυτή των υβριδικών σχημάτων που απαρτίζονται από την ΑΚ. Εφόσον η ΑΚ πραγματοποιεί πρόωρη σύγκλιση και έχει υψηλή ικανότητα εξερεύνησης του χώρου λύσεων (Valian et al., 2013), αναμενόταν να εμφανίσει υψηλότερη απόδοση σε τέτοια πολύπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις παραμέτρους του ΑΚ, όπου εξαρτώνται από την φύση του αλγορίθμου και στο γεγονός ότι η ρύθμιση αυτών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του αλγορίθμου (Yang and Deb, 2014). Ως αποτέλεσμα, η ίδια η ρύθμιση των παραμέτρων γίνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Ωστόσο, το τεστ Friedman μπορεί να ανιχνεύσει μόνο στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των πολλαπλών συγκρίσεων (multiple comparisons), με αποτέλεσμα να αδυνατεί στον

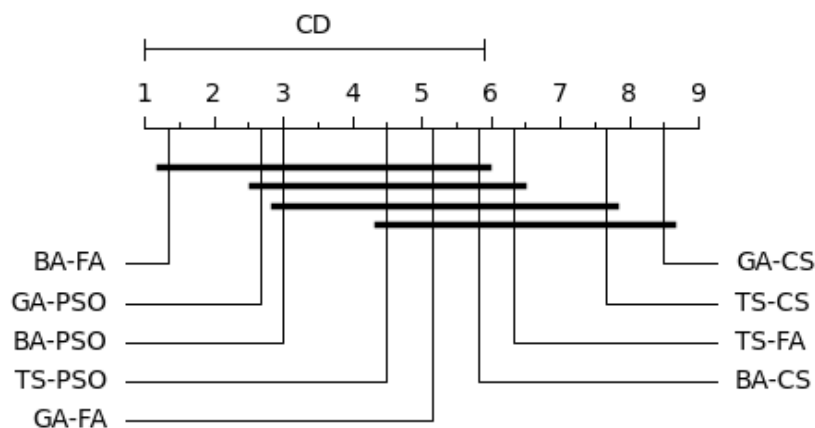
προσδιορισμό μιας ορθής σύγκρισης των μεθόδων. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το μειονέκτημα, εφαρμόζεται η post-hoc διαδικασία Nemenyi (Derrac et al., 2011). Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία Nemenyi είναι ένα post-hoc τεστ (Nemenyi, 1963; Derrac et al., 2011) το οποίο εφαρμόζεται σε συνέχεια από ένα στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα του Friedman τεστ, συγκρίνοντας όλα τα πιθανά ζεύγη των αλγορίθμων (pair-wise comparison). Επιπλέον, οι τιμές p-value του πολλαπλού ελέγχου προσαρμόζονται. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχεται η πιθανότητα να γίνει ένα σφάλμα τύπου I (Type I error) σε μια οικογένεια υποθέσεων. Επομένως, μπορεί να ειπωθεί ότι εάν η τιμή p-value μιας σύγκρισης κατά ζεύγος (Πίνακας 21) είναι μικρότερη από το επίπεδο σημαντικότητας, τότε υπάρχει διαφορά μεταξύ του μέσου όρου κατάταξης των υβριδικών σχημάτων. Χρησιμοποιώντας επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$, παρατηρείται ότι το AN-ΑΠ (έχει καταταχθεί πρώτο) παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα ΓΑ-ΑΚ, ΑΚΚ-ΑΠ και ΑΚΚ-ΑΠ, σύμφωνα με τον Πίνακας 21. Τα παραπάνω μπορούν να παρατηρηθούν στο Διάγραμμα 2 όπου οι μέσοι βαθμοί κατάταξης των υβριδικών σχημάτων απεικονίζονται ως διάγραμμα κρίσιμης απόστασης (Critical Difference Diagram)

Πίνακας 21: Τιμές p-value τεστ Nemenyi για σύγκριση κάθε πιθανού ζεύγους αλγορίθμων.

Μέθοδος	ΓΑ- ΒΣΣ	ΓΑ- ΑΠ	ΓΑ- ΑΚ	ΑΝ- ΒΣΣ	ΑΝ- ΑΠ	ΑΝ- ΑΚ	ΑΑΚ- ΒΣΣ	ΑΑΚ- ΑΠ	ΑΑΚ- ΑΚ
ΓΑ-ΒΣΣ	-	0.7912	0.0069	0.9	0.9	0.5353	0.9	0.3304	0.0417
ΓΑ-ΑΠ	-	-	0.4697	0.9	0.2705	0.9	0.9	0.9	0.7912
ΓΑ-ΑΚ	-	-	-	0.0148	0.001	0.7272	0.2175	0.9	0.9
ΑΝ-ΒΣΣ	-	-	-	-	0.9	0.6632	0.9	0.4697	0.0773
ΑΝ-ΑΠ	-	-	-	-	-	0.1022	0.5353	0.0417	0.0002
ΑΝ-ΑΚ	-	-	-	-	-	-	0.9	0.9	0.9
ΑΑΚ- ΒΣΣ	-	-	-	-	-	-	-	0.9	0.5353
ΑΑΚ-ΑΠ	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9
ΑΑΚ-ΑΚ	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Η ερευνητική υπόθεση της παρούσας μελέτης είναι ότι ένα αποτελεσματικό υβριδικό σχήμα προκύπτει από τον υβριδισμό (μεμονωμένων) μεθόδων που παρουσιάζουν καλή απόδοση κατά την προσέγγιση των επιμέρους στόχων, ενός προβλήματος πολλαπλών στόχων. Προκειμένου να υποστηριχθεί η εν λόγω υπόθεση οι μελέτες περίπτωσης κατανομής αξιοπιστίας προσεγγίστηκαν από τις μεθόδους ΒΣΣ, ΑΠ και ΑΚ, ενώ αυτές της κατανομής εφεδρείας από τις ΓΑ, ΑΝ και ΑΑΚ. Όπως αναφέρεται παραπάνω, το υβριδικό σχήμα ΑΝ-ΑΠ

πέτυχε την καλύτερη στατιστικά απόδοση σε προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας. Σύμφωνα με την αρχική υπόθεση η μέθοδος AN και ΑΠ αναμένεται να παρουσιάσουν την καλύτερη απόδοση κατά την προσέγγιση προβλημάτων κατανομής εφεδρείας και κατανομής αξιοπιστίας, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Κρίσιμης Απόστασης (Critical Difference Diagram) σύγκρισης προτεινόμενων υβριδικών σχημάτων.

Σχετικά με τις μελέτες περίπτωσης προβλήματος κατανομής εφεδρείας, η μέθοδος AN υπερνικά των υπολοίπων μεθόδων. Εντούτοις, όσον αφορά τις μελέτες περίπτωσης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας, η μέθοδος ΒΣΣ πετυχαίνει την καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, και οι τρεις μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, φαίνονται να επιτυγχάνουν παρόμοια στατιστική απόδοση. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα των εν λόγω μελετών περίπτωσης δεν ήταν τα αναμενόμενα, με αποτέλεσμα να απορρίπτεται η ερευνητική υπόθεση.

Συγκριτικά με τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στην βιβλιογραφία, το υβριδικό σχήμα AN-ΑΠ παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με την ΒΒΣΣ (Wu et al., 2011), την ΠΔΦΤΑΜ (Garg, Rani and Sharma, 2013) και την ΑΙΑΑΕ (Afonso, Mariani and dos Santos Coelho, 2013). Οι εν λόγω μέθοδοι της βιβλιογραφίας έχουν εφαρμοστεί με ΠΚΑΣ μεγέθους 13500 και παραπάνω, σε αντίθεση με τις 5000 του AN-ΑΠ. Σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους όπως τον ΓΑ (Hsieh, Chen and Bricker, 1998, p.1) και την ΒΣΣ (Huang, 2015), όλα τα υβριδικά σχήματα φαίνεται να τις ξεπερνούν παρά το μικρό ΠΚΑΣ. Έτσι, μπορεί να ειπωθεί ότι, ο υβριδισμός μπορεί να θεωρηθεί ένας αποτελεσματικός τρόπος προσέγγισης προβλημάτων με πολλαπλούς στόχους.

Το αρνητικό είναι ότι οι μέθοδοι που εφαρμόζονται στη βιβλιογραφία επιτυγχάνουν καλύτερη τυπική απόκλιση στις περισσότερες περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, είναι πιο σταθεροί όσον αφορά την απόδοση σε σύγκριση με τα υβριδικά συστήματα που αναπτύχθηκαν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν καταβλήθηκε προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα των επιμέρους αλγορίθμων που απαρτίζουν τα υβριδικά σχήματα. Ωστόσο, η ιδέα πίσω από τα

υβριδικά σχήματα ήταν να διαχωριστεί το πρόβλημα σε δύο επιμέρους στόχους και να προσεγγιστούν με τον κατάλληλο μεμονωμένο αλγόριθμο, αντίστοιχα.

Πίνακας 22: Μέσοι χρόνοι εκτέλεσης (sec) υβριδικών σχημάτων στις μελέτες περίπτωσης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας.

Μέθοδος	Σειριακό	Σειριακό-Παράλληλο	Περίπλοκο	Προστασίας Υπερτάχυνσης	Μεγάλης Κλίμακας	Εργοστασίου Φαρμάκων
ΓΑ-ΒΣΣ	44.472	42.033	44.636	42.114	54.302	45.644
ΓΑ-ΑΠ	45.103	49.377	43.341	45.733	48.079	44.396
ΓΑ-ΑΚ	50.534	48.628	51.323	48.538	55.171	51.056
ΑΝ-ΒΣΣ	93.465	91.111	93.396	85.506	214.979	132.664
ΑΝ-ΑΠ	109.411	112.502	105.488	117.529	213.956	142.282
ΑΝ-ΑΚ	101.779	97.931	100.681	93.2764	218.545	138.771
ΑΑΚ-ΒΣΣ	18.235	17.728	18.055	16.441	37.567	24.866
ΑΑΚ-ΑΠ	17.926	23.075	17.039	27.284	28.66	25.788
ΑΑΚ-ΑΚ	25.449	24.517	25.113	23.837	37.998	29.181

Επιπλέον, ο Πίνακας 22 περιέχει τον μέσο χρόνο εκτέλεσης των υβριδικών σχημάτων σε κάθε μελέτη περίπτωσης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας. Από τον εν λόγω πίνακα παρατηρείται ότι τα υβριδικά σχήματα που απαρτίζονται από την μέθοδο ΑΚΚ απαιτούν τον λιγότερο χρόνο. Αυτή η παρατήρηση ήταν αναμενόμενη λόγω της απλουστευμένης δομής της ΑΑΚ, καθώς βελτιώνει τον τρέχοντα καλύτερο υποψήφιο (candidate) σε κάθε επανάληψη αντί να αναζητά τον καλύτερο ανάμεσα σε όλες τις υποψήφιες λύσεις (πληθυσμός). Συνεπώς, τα υβριδικά σχήματα που απαρτίζονται από την ΑΝ και τον ΓΑ, τα οποία βασίζονται σε πληθυσμό, απαιτούν περισσότερο χρόνο κατά την εκτέλεση τους. Επιπρόσθετα, το υβριδικό σχήμα ΓΑ-ΒΣΣ (κατατάχθηκε στην δεύτερη θέση) φαίνεται να απαιτεί λιγότερο χρόνο εκτέλεσης σε σύγκριση με το υβριδικό σχήμα ΑΝ-ΑΠ (κατατάχθηκε στην πρώτη θέση). Ακόμη μια σημαντική παρατήρηση αποτελεί ότι, τα επιπλέον βήματα στην αλγοριθμική διαδικασία της μεθόδου ΑΝ έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του υβριδικού σχήματος.

4.5 Συμπεράσματα

Η εργασία στοχεύει να διερευνήσει εάν ο υβριδισμός είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος προσέγγισης προβλημάτων με πολλαπλούς στόχους. Πιο συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από νοήμονες εξελικτικές μεθόδους για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και ειδικότερα του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας. Ο στόχος αυτού του προβλήματος είναι να μεγιστοποιήσει τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος εντός των περιορισμών πόρων, ανεξάρτητα από τις διαμορφώσεις

των υποσυστημάτων και το πεδίο των μεταβλητών απόφασης (συνεχείς, διακριτές ή μικτές). Επιπλέον, διατυπώθηκε η ερευνητική υπόθεση, ότι ένα αποτελεσματικό υβριδικό σχήμα είναι το αποτέλεσμα του υβριδισμού (μεμονωμένων) μεθόδων που παρουσιάζουν καλή απόδοση κατά την προσέγγιση των επιμέρους στόχων. Ανασκοπήθηκαν δέκα μελέτες περίπτωσης της βιβλιογραφίας, συμπεριλαμβανομένου του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας και των επιμέρους προβλημάτων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι μελέτες περίπτωσης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας προσεγγίστηκαν με τη χρήση υβριδικών σχημάτων, ενώ οι μελέτες περίπτωσης των επιμέρους στόχων προσεγγίστηκαν χρησιμοποιώντας τις (μεμονωμένες) μεθόδους που απαρτίζουν τα υβριδικά σχήματα.

Αναπτύχθηκαν εννέα υβριδικά σχήματα, από τα οποία τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το AN-ΑΠ ξεπερνά τα υπόλοιπα. Επομένως, με βάση την ερευνητική υπόθεση, οι AN και ΑΠ αναμένονταν να επιτύχουν την καλύτερη απόδοση όταν προσεγγίζουν κάθε πρόβλημα ξεχωριστά (δηλαδή, κατανομή αξιοπιστίας και κατανομή εφεδρείας, αντίστοιχα). Ωστόσο, όσον αφορά την προσέγγιση των προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας και κατανομής εφεδρείας ξεχωριστά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ΒΣΣ και το AN παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση, απορρίπτοντας την ερευνητική υπόθεση.

Σε σύγκριση με μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στη βιβλιογραφία, η AN-ΑΠ κατάφερε να ξεπεράσει ορισμένες από τις κλασικές μεθόδους και ανεξάρτητα από το χαμηλό ΠΚΑΣ αποδίδουν κοντά σε αυτές που δείχνουν υπεροχή στη βιβλιογραφία. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο υβριδισμός μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος προσέγγισης προβλημάτων με πολλαπλούς στόχους. Επιπλέον, είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί και να συγκριθεί η απόδοση των επιμέρους μεθόδων (που συνθέτουν τα υβριδικά σχήματα) στο πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας. Εφόσον ένα πακέτο python, με το όνομα NiaPy (Vrbancić et al., 2018), το οποίο συμβιβάζει πολλούς αλγόριθμους εμπνευσμένους από τη φύση έχει ήδη εφαρμοστεί, μια πιθανή επέκταση της τρέχουσας εργασίας θα ήταν να συμπεριληφθούν τα υβριδικά σχήματα που μελετώνται εδώ στο NiaPy. Μια άλλη επιλογή θα ήταν η υλοποίηση μιας αντίστοιχης βιβλιοθήκης, εστιασμένης στο πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας, όπου περιλαμβάνονται οι διαθέσιμοι κώδικες των υβριδικών σχημάτων.

Δεδομένου ότι τα υβριδικά σχήματα αναπτύχθηκαν για την προσέγγιση προβλημάτων ενός και μόνο στόχου, θα ήταν ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα να προσαρμοστούν έτσι ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλαπλών στόχων. Επιπλέον, είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί η απόδοση των υβριδικών σχημάτων για πολύ υψηλότερο ΠΚΑΣ. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα κάθε μεμονωμένου αλγορίθμου επηρεάζουν τη συνολική απόδοση των υβριδικών σχημάτων. Μερικές από τις παρατηρήσεις που έγιναν σε αυτή την εργασία ήταν ότι το ΑΑΚ μπορεί να απορρίψει καλές λύσεις και έτσι,

η μνήμη της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι εξαρτάται από το πρόβλημα. Επίσης, οι παράμετροι που εξαρτώνται από τον αλγόριθμο της ΑΚ επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοσή του. Τέλος, η ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης και της εκμετάλλευσης στη συμπεριφορά της ΑΠ φάνηκε να έχει θετικό αντίκτυπο στην απόδοση. Επιπλέον, μια μελλοντική εργασία μπορεί να αφιερωθεί στην περαιτέρω μελέτη κάθε (μεμονωμένης) μεθόδου που συνθέτει τα υβριδικά σχήματα, προκειμένου να συναντηθούν και αντιμετωπιστούν πιθανές αδυναμίες (π.χ. πρόωρη σύγκλιση του ΒΣΣ).

5 Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΠΔΗΟ)

Τα τελευταία έτη, παράγοντες όπως περιβαλλοντικοί κανονισμοί, αύξηση κόστους των καυσίμων και η αυξημένη ζήτηση της αγοράς για οικολογικά προϊόντα οδήγησαν στην εξέλιξη της πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας (Kleindorfer, Singhal and Van Wassenhove, 2005). Με την διανομή προϊόντων να αποτελεί την μεγαλύτερη δραστηριότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, τα προβλήματα δρομολόγησης παρουσιάζουν αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον (Schneider, Stenger and Goeke, 2014).

Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem) αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα δρομολόγησης (Toth and Vigo, 2002) και αποτελεί μια γενίκευση του προβλήματος πλανόδιου πωλητή (Traveling Salesman Problem) (Gutin and Punnen, 2006). Το εν λόγω πρόβλημα στοχεύει στην εξυπηρέτηση γεωγραφικά διασκορπισμένων πελατών από έναν στόλο ομογενών οχημάτων. Κάθε όχημα εκτελεί μια διαδρομή (μονοπάτι), το οποίο ξεκινάει και τελειώνει από τον εναρκτήριο κόμβο. Ο λήπτης απόφασης, καλείται να αναθέσει σε κάθε όχημα τους πελάτες που θα επισκεφθεί καθώς και την αλληλουχία αυτών, ικανοποιώντας την απαιτούμενη ζήτηση αυτών με τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος δρομολόγησης (διανομής) (Erdelić and Carić, 2019).

Το αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον, και οι εφαρμογές του σε πραγματικά προβλήματα, έχουν οδηγήσει στην διαμόρφωση αρκετών παραλλαγών, όπως το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά περιθώρια (Vehicle Routing Problem With Time Windows) (Bräysy and Gendreau, 2005), το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμένη χωρητικότητα (Capacitated Vehicle Routing Problem) ή το ανοιχτό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Open Vehicle Routing Problem). Ωστόσο, τα παραπάνω προβλήματα στοχεύουν από κοινού στον προσδιορισμό των μονοπατιών διανομής εκείνων που αντιστοιχούν στο ελάχιστο συνολικό κόστος εξυπηρέτησης των πελατών. Οι διαφορές μεταξύ των παραλλαγών βρίσκονται στα χαρακτηριστικά όπως την εξυπηρέτηση των πελατών σε συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο, την χωρητικότητα ή την κατανάλωση κάθε οχήματος και αρκετά άλλα.

Η συνεχώς αναπτυσσόμενη πράσινη εφοδιαστική, έχει στρέψει το ενδιαφέρον προς την χρήση οχημάτων τα οποία λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια, αντί καυσίμων. Τα εν λόγω ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν μια λύση στην μείωση των εκπομπών άνθρακα, καθώς η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να αντληθεί από πιο καθαρές πηγές ενέργειας. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν απαιτούν τόσο συχνή συντήρηση και προξενούν λιγότερο θόρυβο σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα (Ou et al., 2017). Εντούτοις, τα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν μικρότερη αυτονομία οδήγησης, με αποτέλεσμα να απαιτούν συχνότερες στάσεις σε σταθμούς φόρτισης (Recharging Stations). Οι συχνές αυτές στάσεις αποτελούν σημαντικό παράγοντα στα χρονικά περιθώρια εξυπηρέτησης που ορίζουν οι πελάτες, καθώς ο χρόνος φόρτισης είναι

σημαντικά μεγαλύτερος σε σύγκριση με τον ανεφοδιασμό καυσίμων ενός συμβατικού οχήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, έχει καθιερωθεί μια νέα παραλλαγή του ΠΔΟ, η οποία ονομάζεται πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem) (Ralphs et al., 2001). Η ιδιαιτερότητα του εν λόγω προβλήματος συγκριτικά με το ΠΔΟ, είναι ότι ο στόλος των οχημάτων αποτελείται από οχήματα τα οποία διαθέτουν περιορισμένη ενεργεία και κατά συνέπεια περιορισμένη αυτονομία οδήγησης.

5.1 Εξελικτικές και Μετα-ευρετικές Μέθοδοι στο Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Τελευταία, πολλές εξελικτικές και μετα-ευρετικές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την προσέγγιση διαφορετικών εκδοχών του Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΠΔΗΟ), παρά την πρόσφατη εμφάνιση τους. Μεταξύ των μετα-ευρετικών μεθόδων είναι η Προσαρμοστική Αναζήτηση Μεγάλης Γειτονιάς (Adaptive Large Neighborhood Search), η οποία έχει εφαρμοστεί στο βασικό ΠΔΗΟ (Zhao and Lu, 2019) και σε διάφορες εκδοχές του. Μεταξύ των εφαρμογών του περιλαμβάνονται το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με χρονικά περιθώρια (Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows) (Keskin and Çatay, 2016), το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με χρονικά περιθώρια και μικτό στόλο οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Mixed Fleet) (Goeke and Schneider, 2015), το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με χρονικά περιθώρια και σταθμούς γρήγορης φόρτισης (Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Fast Chargers) (Keskin and Çatay, 2018), το χρονικά εξαρτημένο πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με κυκλοφοριακή συμφόρηση (Time-Dependent Electric Vehicle Routing Problem With Congestion Tolls) (Zhang, Guo and Wang, 2020).

Επιπρόσθετα, η εν λόγω μέθοδος έχει εφαρμοστεί στο Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων με Ευστάθεια, Χρονικά Περιθώρια και Μερική Φόρτιση (Robust Electric Location-Routing Problem with Time Windows and Partial Recharging) (Schiffer and Walther, 2018), το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με αβέβαιη ενεργειακή κατανάλωση (Electric Vehicle Routing Problem with Energy Consumption Uncertainty) (Pelletier, Jabali and Laporte, 2019), το περιοδικό πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Periodic Electric Vehicle Routing Problem) (Oulad Kouider, Ramdane Cherif-Khettaf and Oulamara, 2019; 2020) και το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με ελαστικά χρονικά περιθώρια και επιβολή χρόνου αναμονής στους σταθμούς φόρτισης (Electric Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Time-Dependent Waiting Times at Recharging Stations) (Keskin, Laporte and Çatay, 2019).

Επιπλέον, η Επαναληπτική Τοπική Αναζήτηση με την μέθοδο Ευρετικής Συγκέντρωσης (Iterated Local Search combined with Heuristic Concentration method) έχει εφαρμοστεί στο ΠΔΗΟ με μη-γραμμικές συναρτήσεις φόρτισης (EVRP with Nonlinear Charging Function) (Montoya et al., 2017). Επίσης, για την προσέγγιση του ΠΔΗΟ έχει εφαρμοστεί η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Tabu Search) βασισμένη στην κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων (Preis, Frank and Nachtigall, 2014). Ομοίως, η Επαναλαμβανόμενη Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Iterated Tabu Search) και η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις με Περιορισμένες Γειτονιές (Granular Tabu Search) έχουν χρησιμοποιηθεί στην προσέγγιση του ΠΔΗΟ με μικτό στόλο ετερογενών οχημάτων (Mix Fleet Vehicle Routing Problem with Heterogenous Electric Vehicles) (Sassi, Cherif-Khettaf and Oulamara, 2015) και του προβλήματος παραλαβής και παράδοσης ηλεκτρικών οχημάτων με χρονικά περιθώρια (Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Electric Vehicles) (Goeke, 2019), αντίστοιχα.

Οι Schneider, Stenger και Goeke (2014) προτείνουν μια τεχνική βασισμένη στην Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και την Αναζήτηση Μεταβλητής Γειτνίασης (Variable Neighborhood Search) για την προσέγγιση του ΠΔΗΟ με χρονικά περιθώρια και σταθμούς φόρτισης (EVRP with Time Windows and Recharging Stations). Επίσης, οι Zhu et al. (2020) προτείνουν ένα ακόμη υβριδικό σχήμα το οποίο αποτελείται από την Αναζήτηση Μεταβλητής Γειτνίασης και τον Ευρετικό Αλγόριθμο Εξοικονόμησης Χώρου (Variable Neighborhood Search with Space Saving Heuristic Algorithm), ώστε να προσεγγίσουν το δυσδιάστατο ΠΔΗΟ με πολλαπλούς εναρκτήριους κόμβους (two-dimensional Multi Depot EVRP).

Μερικές ακόμη μετα-ευρετικές προσεγγίσεις αποτελούν τα υβριδικά σχήματα που περιέχουν την τεχνική της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing). Ένα από τα εν λόγω υβριδικά σχήματα αποτελείται από την Προσομοιωμένη Ανόπτωση, τον Κατασκευαστικό και τον Ευρετικό Αλγόριθμο Προσθήκης από Τοπική Αναζήτηση (Simulated Annealing with Insertion Local Search Heuristic and a Constructive Heuristic). Το παραπάνω υβριδικό σχήμα προσεγγίζει το ΠΔΗΟ με χρονικά περιθώρια (Erdoğan and Karabulut, 2020). Επιπρόσθετα το υβριδικό σχήμα που αποτελείται από την Προσομοιωμένη Ανόπτωση και την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Simulated Annealing and Tabu Search) εφαρμόστηκε για την επίλυση του Προβλήματος Ηλεκτρικού Περιοδού Πωλητή με Χρονικά Περιθώρια και Μικτούς Ρυθμούς Φόρτισης (Electric Travelling Salesman Problem with Time Windows and Mixed Charging Rates) (Küçükoglu, Dewil and Cattrysse, 2019).

Πέραν των παραπάνω μετα-ευρετικών μεθόδων, αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην επίλυση του ΠΔΗΟ με την χρήση εξελικτικών μεθόδων και συγκεκριμένα Αλγορίθμων Εμπνευσμένων από την Φύση (Nature Inspired Algorithms). Πιο συγκεκριμένα,

μια από της εν λόγω μεθόδους αποτελεί η τεχνική της Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution), η οποία εφαρμόστηκε στην εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης μιας πραγματικής περίπτωσης ΠΔΗΟ (Alesiani and Maslekar, 2014). Μια ακόμη προσέγγιση εξελικτικής μεθόδου αποτελεί ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm), ο οποίος έχει εφαρμοστεί στο ΠΔΗΟ (Shao, Guan and Bi, 2018a) και το ΠΔΗΟ με χρόνο φόρτισης και μεταβλητό χρόνο μετακίνησης (EVRP with Charging Time and Variable Travel Time) (Shao, Guan and Bi, 2018b).

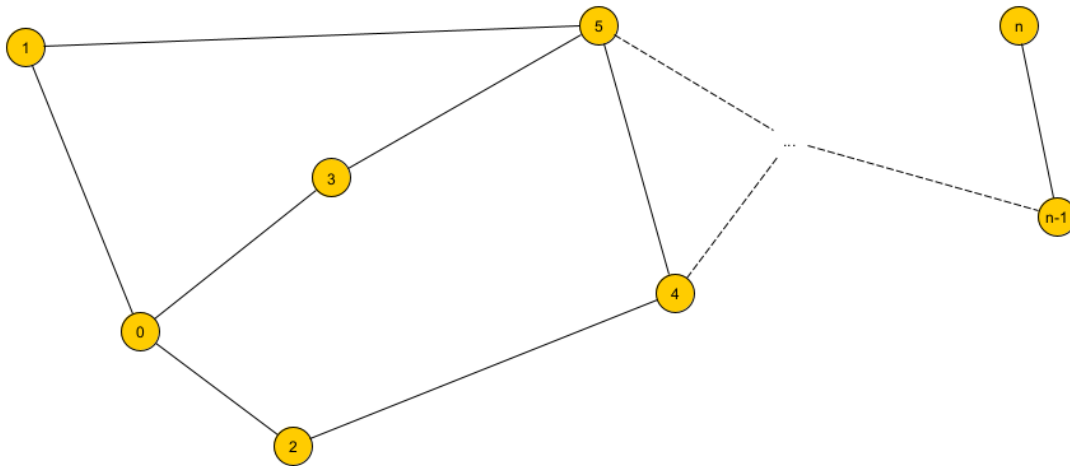
Επιπρόσθετα, οι Hiermann et al. (2019) προτείνουν το υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου με Τοπική Αναζήτηση (Genetic Algorithm with Local Search) για την προσέγγιση του Προβλήματος Δρομολόγησης Υβριδικού Ετερογενούς Στόλου με Χρονικά Περιθώρια και Σταθμούς Φόρτισης (Hybrid Heterogeneous Electric Fleet Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations). Επιπρόσθετα, προτείνονται διάφορα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και πολλαπλούς μηχανισμούς (Hybrid Genetic Algorithms) για την αντιμετώπιση του προβλήματος ΠΔΗΟ με χρονικά περιθώρια και χωρητικότητα (Capacitated EVRP) και του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων με Καύσιμα, Χρονικά Περιθώρια και Χωρητικότητα (Capacitated Fuel Vehicle Routing Problem with Time Windows) (Liao, Liu and Fu, 2019).

Ένας γνωστός αλγόριθμος εμπνευσμένος από την φύση που χρησιμοποιείται σε προβλήματα δρομολόγησης είναι αυτός της Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization). Η εν λόγω μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση τόσο του βασικού ΠΔΗΟ (Mavrouniotis et al., 2019; Muriel and Fotouhi, 2020) όσο διαφορετικών εκδοχών του. Οι Joo και Lim (2018) εξέτασαν την συνάρτηση που περιγράφει την ανάκτηση ενέργειας (energy recuperation) των ηλεκτρικών οχημάτων και τροποποίησαν την εν λόγω μέθοδο, ώστε να μεγιστοποιούν την συνολική ενεργειακή απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή κατανάλωση και ταχύτητα των οχημάτων. Επιπλέον, οι Manogaran et al. (2019) πρότειναν μια τροποποιημένη αντικειμενική συνάρτηση για την βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (Fitness - Ant Colony Optimization). Πιο συγκεκριμένα, διατηρεί μια ισορροπία μεταξύ της ενέργειας και του χρόνου φόρτισης, με σκοπό την ενίσχυση της αυτονομίας οδήγησης.

5.2 Φορμαλισμός του Προβλήματος

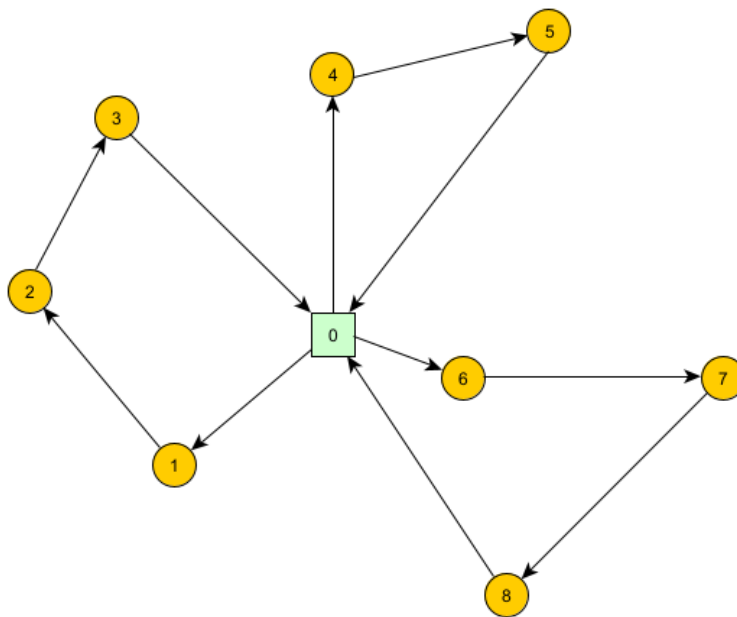
Όπως αναφέρεται παραπάνω ένα πρόβλημα δρομολόγησης αποτελείται από ένα σύνολο πελατών με γνωστή ζήτηση και έναν στόλο ομοιογενών ηλεκτρικών οχημάτων. Τα εν λόγω οχήματα διαθέτουν καθορισμένη χωρητικότητα φορτίου για την κάλυψη της ζήτησης καθώς και περιορισμένη χωρητικότητα μπαταρίας. Ως αποτέλεσμα, οι ιδιότητες αυτές των οχημάτων να αναλογούν σε περιορισμένη αυτονομία οδήγησης.

Ένα πρόβλημα δρομολόγησης συχνά περιγράφεται από ένα γράφο της μορφής $G = (V, A)$, όπου $V = \{0, N\}$ αποτελεί το σύνολο των κόμβων του γράφου που αντιπροσωπεύουν τους πελάτες που πρόκειται να εξυπηρετηθούν και $A = (i, j | i, j \in V, i \neq j)$ το σύνολο των ακμών (arcs) από τον κόμβο i στον κόμβο j του γράφου. Επιπρόσθετα, στο σύνολο V , ο εναρκτήριο κόμβος συμβολίζεται 0 και ως N το πλήθος των πελατών. Στην Εικόνα 1 φαίνεται ένας σχετικός γράφος.



Εικόνα 1: Παράδειγμα γράφου.

Το ΠΔΟ αποτελεί επέκταση του προβλήματος περιοδεύοντος πωλητή (Dantzig and Ramser, 1959), με την διαφορά ότι υπάρχει ένας στόλος οχημάτων διαθέσιμος για την εξυπηρέτηση των πελατών, τα οποία έχουν ως σημείο εκκίνησης και τερματισμού τον εναρκτήριο κόμβο 0 , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Παράδειγμα γράφου δρομολόγησης οχημάτων.

Ο στόχος του ΠΔΟ είναι ο προσδιορισμός των διαδρομών που θα ακολουθήσει κάθε όχημα ώστε να επισκεφτούν όλοι οι κόμβοι (εξυπηρετηθούν όλοι πελάτες), με τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος δρομολόγησης (διανομής). Το πρόβλημα μπορεί περιγραφεί ως:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (5.1)$$

όπου ως c_{ij} συμβολίζεται το κόστος μετακίνησης από τον κόμβο i στον κόμβο j και ως x_{ij} οι δυαδικές μεταβλητές απόφασης, οι οποίες λαμβάνουν τις τιμές:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{εάν επιλεγθεί η ακμή από τον κόμβο } i \text{ στον } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.2)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος περιγράφονται ως:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (5.3)$$

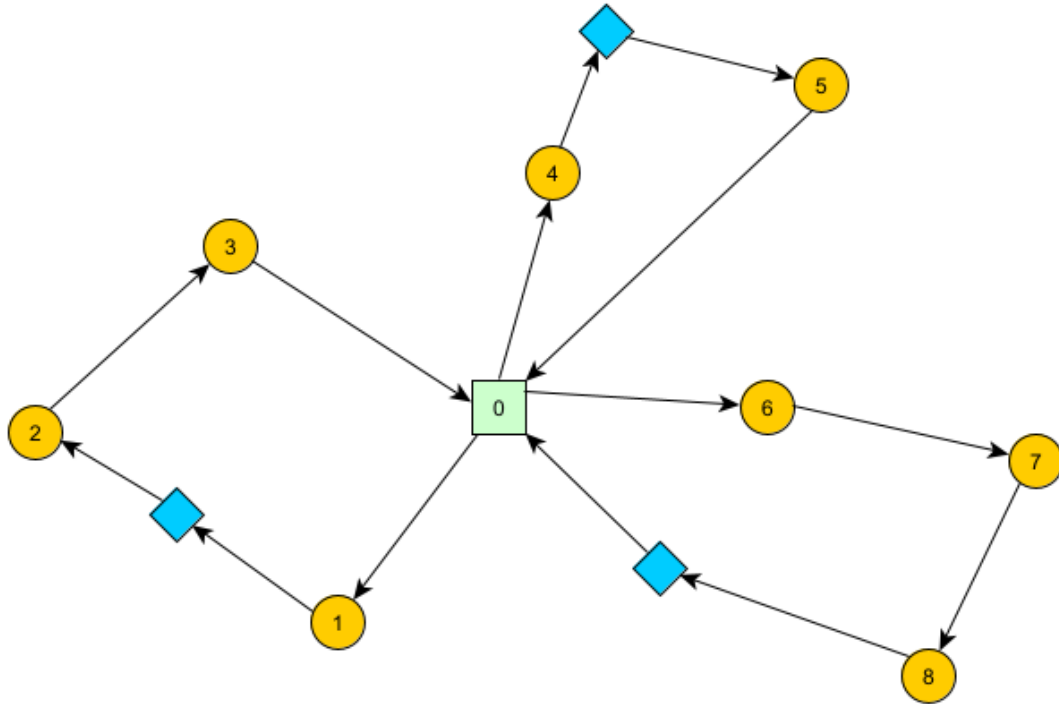
$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (5.6)$$

όπου K είναι το πλήθος των διαθέσιμων οχημάτων. Οι σχέσεις (5.3) και (5.4) διασφαλίζουν ότι οι κόμβοι στο σύνολο V επισκέπτονται μια φορά κατά την ολοκλήρωση του δρομολογίου. Επιπρόσθετα, οι σχέσεις (5.5) και (5.6) διασφαλίζουν ότι όλα τα οχήματα ξεκινούν από τον εναρκτήριο κόμβο και τερματίζουν σε αυτόν, αντίστοιχα.

Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΠΔΗΟ) αποτελεί μια εκδοχή του ΠΔΟ κατά την οποία ο γράφος G επεκτείνεται σε $G = (V'_0, A)$ (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3), όπου $V'_0 = \{0\} \cup M \cup F$ αποτελείται από τον εναρκτήριο κόμβο 0, το σύνολο πελατών $M = \{1, 2, \dots, N\}$ και το σύνολο των σταθμών φόρτισης (Recharging Stations) $F = \{1, 2, \dots, S\}$, όπου S το πλήθος των διαθέσιμων σταθμών φόρτισης των οχημάτων.



Εικόνα 3: Παράδειγμα γράφου δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων.

Κατά την εκκίνηση των οχημάτων από τον εναρκτήριο κόμβο (ο οποίος συνήθως είναι κάποια κεντρική αποθήκη - depot) θεωρείται ότι η μπαταρία των οχημάτων είναι πλήρως φορτισμένη, με συνέπεια ο εναρκτήριο κόμβος θεωρείται ως σταθμός φόρτισης. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό e_r . Η απαιτούμενη ενέργεια ec_{ij} για την μετακίνηση του οχήματος από τον κόμβο i στο κόμβο j είναι ανάλογη της απόστασης c_{ij} των δύο κόμβων και υπολογίζεται ως:

$$ec_{ij} = e_r \times c_{ij} \quad (5.7)$$

Ο διαθέσιμος στόλος αποτελείται από ομοιογενή οχήματα, χωρητικότητας μπαταρίας Q και μέγιστης χωρητικότητας φορτίου C .

Ο φορμαλισμός του ΠΔΗΟ μπορεί να περιγράψει ως:

$$\min \sum_{i \in V'_0} \sum_{j \in V'_0} c_{ij} x_{ij} \quad (5.8)$$

όπου το σύνολο V'_0 περιλαμβάνει τα υποσύνολα των πελατών, σταθμών φόρτισης και την επιστροφή στον εναρκτήριο κόμβο 0. Οι περιορισμοί του προβλήματος μπορούν να περιγραφούν ως:

$$\sum_{j \in V'_0} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V, i \neq j \quad (5.9)$$

$$\sum_{j \in V'_0} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in F, i \neq j \quad (5.10)$$

$$\sum_{i \in V'_0} x_{ij} - \sum_{j \in V'_0} x_{ij} = 0 \quad \forall j \in V', i \neq j \quad (5.11)$$

$$0 \leq u_j \leq u_i - q_i x_{ij} + C(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_0, i \neq j \quad (5.12)$$

$$0 \leq u_0 \leq C \quad (5.13)$$

$$0 \leq y_j \leq y_i - ec_{ij} x_{ij} + Q(1 - x_{ij}) \quad \forall j \in V'_0, \forall i \in V, i \neq j \quad (5.14)$$

$$0 \leq y_j \leq Q - ec_{ij} x_{ij} \quad \forall j \in V'_0, \forall i \in F'_0, i \neq j \quad (5.15)$$

όπου ως u_i και y_i συμβολίζονται η υπολειπόμενη χωρητικότητα φορτίου και μπαταρίας του οχήματος, αντίστοιχα κατά την αναχώρηση του από τον κόμβο i . Επιπλέον, ως q_i η γνωστή ζήτηση του πελάτη i και ως C η μέγιστη χωρητικότητα φορτίου του οχήματος.

Η σχέση (5.9) διασφαλίζει ότι κάθε πελάτης επισκέπτεται μια φορά, ενώ αντίστοιχα η (5.10) διασφαλίζει πως κάθε σταθμός φόρτισης επισκέπτεται μια φορά κατά το δρομολόγιο ενός οχήματος. Επιπλέον ο περιορισμός (5.11) εγγυείται ότι το πλήθος των εξερχόμενων ακμών (arcs) ισούται με αυτό των εισερχόμενων, για κάθε κόμβο.

Όσον αφορά τους περιορισμούς (5.12) και (5.13) ανταποκρίνονται στην ζήτηση των πελατών, βεβαιώνοντας ότι το υπολειπόμενο φορτίο του οχήματος είναι επαρκές κατά την άφιξη του σε οποιοδήποτε κόμβο. Τέλος οι περιορισμοί (5.14) και (5.15) προλαμβάνουν ένα όχημα να μετακινηθεί σε επόμενο κόμβο αν το φορτίο της μπαταρίας του δεν είναι επαρκές.

5.3 Εφαρμογές σε Περιπτώσεις Συγκριτικής Αξιολόγησης Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η πλειοψηφία των εργασιών της βιβλιογραφίας αφορούν εφαρμογές σε δεδομένα που έχουν αναπαραχθεί για ερευνητικούς σκοπούς, καθώς υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα πραγματικών προβλημάτων δρομολόγησης που σχετίζονται με ηλεκτρικά οχήματα. Ένα από τα πιο γνωστά σύνολα δεδομένων είναι αυτό του προτάθηκε από τον Solomon, (1987). Τα εν λόγω δεδομένα αφορούν Προβλήματα Δρομολόγησης και Χρονοπρογραμματισμού με περιορισμούς χρονικών περιθωρίων (Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints). Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές του Προβλήματος

Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων με Χρονικά Περιθώρια, καθώς επίσης στην δημιουργία μελετών περίπτωσης για το Πρόβλημα Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω δεδομένα, οι Schneider, Stenger και Goeke (2014) καθιέρωσαν μελέτες περίπτωσης για το ΠΔΗΟ με χρονικά περιθώρια, οι οποίες αποτελούνται από 36 μικρού και 56 μεγάλου μεγέθους μελέτες περίπτωσης. Οι εν λόγω μελέτες περίπτωσης έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερο στην βιβλιογραφία.

Πιο συγκεκριμένα, οι μελέτες περίπτωσης μεγάλου μεγέθους περιλαμβάνουν τρεις βασικές κλάσεις του προβλήματος, όπου 100 πελάτες και 21 σταθμοί φόρτισης (κόμβοι) είναι τοποθετημένοι σε μια δυσδιάστατη περιοχή (two-dimensional grid) μεγέθους 100×100. Οι εν λόγω κλάσεις περιγράφουν τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι. Συγκεκριμένα οι κόμβοι μπορούν να είναι ομαδοποιημένοι (clustered – C), τυχαία διανεμημένοι (randomly distributed – R) και σε συνδυασμό των δύο (clustered and randomly distributed – RC). Επιπρόσθετα, τα δεδομένα που αφορούν τις εν λόγω μελέτες περίπτωσης χωρίζονται στις κατηγορίες τύπου 1 και τύπου 2. Οι παραπάνω κατηγορίες διαφέρουν στο μέγεθος των χρονικών περιθωρίων, τη χωρητικότητα φορτίου και μπαταρίας των οχημάτων. Όσον αφορά τις μελέτες περίπτωσης μικρού μεγέθους, περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες 12 προβλημάτων, οι οποίες αποτελούνται από 5, 10 και 15 τυχαία επιλεγμένα πελάτες από τις μελέτες περίπτωσης μεγάλου μεγέθους.

Οι Schiffer και Walther (2018) παρουσιάζουν μελέτες περίπτωσης, οι οποίες σχεδιάστηκαν έπειτα από την χαρτογράφηση πραγματικών δεδομένων (Schiffer, Walther and Stütz, 2017), σύμφωνα με τις μελέτες περίπτωσης του Solomon, (1987). Επιπρόσθετα, οι Erdoğan και Miller-Hooks (2012) καθιέρωσαν τέσσερις νέες μελέτες περίπτωσης του Πράσινου Προβλήματος Δρομολόγησης Οχήματος. Οι εν λόγω περιπτώσεις αφορούν 20 τυχαία κατανομημένους πελάτες, σε μια περιοχή (grid) 330 επί 300 μιλίων, όπου ο εναρκτήριο κόμβος να βρίσκεται περίπου στο κέντρο. Παρόλα αυτά οι παραπάνω μελέτες περίπτωσης μπορούν να εφαρμοστούν στο ΠΔΗΟ θεωρώντας τους σταθμούς εναλλακτικού καυσίμου ως τους αντίστοιχους σταθμούς φόρτισης.

Επιπλέον, περαιτέρω μελέτες περίπτωσης σχηματίστηκαν (Goeke and Schneider, 2015) σύμφωνα με τις μελέτες περίπτωσης του Προβλήματος Δρομολόγησης βασιζόμενο στις Εκπομπές Ρύπων (Pollution-Routing Problem) (Demir, Bektaş and Laporte, 2012). Στις εν λόγω μελέτες περίπτωσης οι πελάτες αναπαριστούν πραγματικές πόλεις του Ηνωμένου Βασιλείου, ενώ η ζήτηση των πελατών και χρονικά περιθώρια είναι τυχαία. Οι μελέτες περίπτωσης διαχωρίζονται σε 9 σετ των 20 μελετών περίπτωσης, ομαδοποιημένα ανάλογα με το μέγεθος της μελέτης περίπτωσης (10-200 πελάτες).

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά των πελατών που εφαρμόστηκαν στο ΠΔΗΟ με μη-γραμμικές συναρτήσεις φόρτισης (Montoya et al., 2017), αναπαράχθηκαν μελέτες περίπτωσης που ορίζονται σε μια γεωγραφική περιοχή 120 επί 120 χιλιομέτρων (Pelletier, Jabali and Laporte, 2019). Μια ακόμη μελέτη περίπτωσης αποτελεί η υπηρεσία μετακίνησης (shuttle service) με ηλεκτρικό στόλο λεωφορείων του αεροδρομίου της Μπογκοτά της Κολομβίας (Barco et al., 2013), η οποία περιλαμβάνει έξι κόμβους όπως το ξενοδοχείο και θέσεις αποβίβασης/επιβίβασης επιβατών. Αντίστοιχα, μια ρεαλιστική μελέτη περίπτωσης μεγάλου μεγέθους, αναλογεί σε αστική περιοχή στο Πεκίνο (Alesiani and Maslekar, 2014).

Οι Zhao και Lu (2019) σχηματίζουν μια μελέτη περίπτωσης βασιζόμενοι σε πραγματικά δεδομένα που παρείχε μια εταιρεία υπηρεσιών logistics από την Γουχάν της Κίνας. Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από 100 πελάτες και 10 σταθμούς φόρτισης γύρω από ένα κέντρο διανομής, που αποτελεί τον εναρκτήριο κόμβο. Τέλος, μια παρόμοια περίπτωση αποτελεί αυτή ενός απλού δικτύου δρόμων της πόλης Σιου Φολς στην Νότια Ντακότα των Ηνωμένων Πολιτειών. Ωστόσο τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα λόγω περιορισμών από την αρμόδια υπηρεσία.

6 Προτεινόμενη Προσέγγιση Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η έρευνα που παρουσιάζεται περιστρέφεται γύρω από δύο διαφορετικές πτυχές τη διεξαγωγή μιας σύντομης βιβλιογραφικής επισκόπησης των μετα-ευρετικών και εξελικτικών προσεγγίσεων που εφαρμόζονται στο ΠΔΗΟ και την παρουσίαση ορισμένων μελετών περίπτωσης. Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της έρευνας προτείνεται μια νέα προσέγγιση επίλυσης που βασίζεται σε μια Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization).

Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η εισαγωγή ενός πρόσθετου όρου στο πιθανοτικό μοντέλο της προτεινόμενης μεθόδου, που παρουσιάζεται παρακάτω. Αυτός ο όρος, ο οποίος ονομάζεται πληροφορία κατανάλωσης ενέργειας (energy consumption information), λαμβάνει υπόψη την υπολειπόμενη ενέργεια του εξεταζόμενου οχήματος, έτσι ώστε να επισκέπτεται κάποιον σταθμό φόρτισης όταν χρειάζεται κατά την διαδρομή του. Η εν λόγω προσέγγιση διασφαλίζει ότι παράγονται πάντα εφικτές λύσεις.

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης θα πραγματοποιηθεί ένας πειραματισμός σε γνωστές μελέτες περίπτωσης της βιβλιογραφίας που θα επιλεχθούν. Επιπλέον, για σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου θα αναπαραχθεί η μέθοδος της Αναζήτησης Γειννίαςης Μεταβλητών (Variable Neighborhood Search) (Mladenović and Hansen, 1997), η οποία αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη μετα-ευρετική μέθοδο για προβλήματα δικτύων.

6.1 Εξεταζόμενη Μέθοδος: Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

Στις αρχές τις δεκαετίας του 1990, ο Dorigo (1992) παρουσίασε την Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) ως έναν αλγόριθμο εμπνευσμένο από την φύση, με σκοπό την επίλυση προβλημάτων δικτύων, όπως το Πρόβλημα Περιοδεύοντος Πωλητή (Travelling Salesman Problem).

Η Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (BAM) πηγάζει έμπνευση από την διαδικασία αναζήτησης τροφής των μυρμηγκιών. Πιο συγκεκριμένα, όταν αναζητούν τροφή, τα μυρμηγκία ξεκινούν αρχικά από την φωλιά τους προς διάφορες τυχαίες κατευθύνσεις. Μόλις ένα μυρμηγκί βρει μια πηγή τροφής, αξιολογεί την ποσότητα και την ποιότητα της τροφής και μεταφέρει μια μικρή ποσότητα πίσω στη φωλιά. Κατά τη διάρκεια της επιστροφής του, το μυρμηγκί αφήνει πίσω του μια ποσότητα φερομόνης. Η ποσότητα της φερομόνης που έχει αφήσει μπορεί εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα της τροφής. Σταδιακά, όλα τα μυρμηγκία θα ακολουθήσουν το μονοπάτι εκείνο με την μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης, δηλαδή την κατεύθυνση που πιθανόν υπάρχει τροφή. Ωστόσο η φερομόνη εξατμίζεται με την

πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα τα μονοπάτια εκείνα με μικρή ποσότητα φερομόνης να μην αποτελούν πλέον επιλογή για τα μυρμήγκια.

Ψευδοκώδικας 6.1: Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
 - 2: Υπολογισμός ευρετικής πληροφορίας για κάθε ακμή του γράφου
 - 3: Αρχικοποίηση της φερομόνης για κάθε ακμή του γράφου
 - 4: Αρχικοποίηση πληθυσμού
 - 5: **Όσο** δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού
 - 6: **Για** μυρμήγκι 1 έως N
 - 7: **Όσο** δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδρομή
 - 8: Επιλογή επόμενου κόμβου που θα επισκεφθεί στην διαδρομή του το μυρμήγκι
 - 9: Υπολογισμός ποιότητας της τρέχουσας λύσης
 - 10: **Τέλος**
 - 11: **Τέλος**
 - 12: Εξάτμιση φερομόνης
 - 13: Ενημέρωση της φερομόνης
 - 14: **Τέλος**
-

Συνεπώς, σε πρόβλημα δρομολόγησης όπως το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem) κάθε αναζητητής ξεκινάει το μονοπάτι του από τον εναρκτήριο κόμβο. Η επιλογή της μετακίνησης του αναζητητή από τον κόμβο i στον επόμενο κόμβο j γίνεται με πιθανότητα:

$$p_{ij} = \frac{[t_{ij}]^\alpha [n_{ij}]^\beta}{\sum_{l=1}^M [t_{il}]^\alpha [n_{il}]^\beta} \quad (6.1)$$

όπου M είναι το σύνολο των κόμβων και ως n_{ij} συμβολίζεται η ευρετική πληροφορία, η οποία εκφράζει την επιθυμία ο αναζητητής (όχημα) να μεταβεί από τον κόμβο i στον κόμβο j . Ως τ_{ij} συμβολίζεται η φερομόνη, η οποία αντιπροσωπεύει την επιθυμία ενός αναζητητή να μεταβεί από τον κόμβο i στον κόμβο j . Οι παράμετροι α και β καθορίζουν σε τι βαθμό επηρεάζουν η φερομόνη και η ευρετική πληροφορία. Η ευρετική πληροφορία είναι αντιστρόφως ανάλογη του κόστους μετακίνησης c_{ij} και μπορεί να υπολογιστεί από:

$$n_{ij} = 1/c_{ij} \quad (6.2)$$

Όταν όλοι οι αναζητητές ολοκληρώσουν τα μονοπάτια τους, η φερομόνη εξατμίζεται (μειώνεται) σε όλες τις ακμές (i, j) σύμφωνα με την σχέση:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} \quad (6.3)$$

όπου το $0 < \rho < 1$ είναι ο συντελεστής εξάτμισης της φερομόνης. Η φερομόνη για κάθε ακμή (i, j) που έχει επιλεγθεί ενημερώνεται χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{\tau_{ij}}^k \quad (6.4)$$

όπου το $\Delta\tau_{\tau_{ij}}^k$ είναι η ποσότητα φερομόνης που αφήνει ο k -οστός αναζητητής και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\Delta\tau_{\tau_{ij}}^k = \begin{cases} 1/C^k & \text{εάν η ακμή } (i, j) \text{ έχει επιλεγεί από τον αναζητητή } k \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.5)$$

όπου το C^k είναι το συνολικό κόστος της διαδρομής του k -οστού αναζητητή. Όσο μικρότερο το κόστος της διαδρομής (καλύτερη ποιότητα) τόσο μεγαλύτερη η ποσότητα της φερομόνης που αφήνει ο k -οστός αναζητητής. Ο αλγόριθμος που περιγράφει την BAM μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 6.1.

6.2 Προτεινόμενη Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στην μέθοδο της Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (BAM) και είναι σχεδιασμένο για την αντιμετώπιση του Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΠΔΗΟ).

Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο στην BAM η επιλογή της μετακίνησης του αναζητητή από τον κόμβο i στον επόμενο κόμβο j χρησιμοποιεί τον πιθανότικο (probabilistic) κανόνα που περιγράφεται από την σχέση (6.1). Η εν λόγω σχέση στην βασική BAM επηρεάζεται από την φερομόνη τ_{ij} και την ευρετική πληροφορία n_{ij} . Στην προτεινόμενη τροποποιημένη BAM προστίθεται η πληροφορία κατανάλωσης ενέργειας (energy consumption information) h_{ij} στον πιθανότικο κανόνα, η οποία εκφράζει το γεγονός ότι η επιθυμία του αναζητητή να μεταβεί από τον κόμβο i στον κόμβο j , είναι αντιστρόφως ανάλογη της υπολειπόμενης ενέργειας του οχήματος. Ο τροποποιημένος πιθανοτικός κανόνας μπορεί να περιγραφεί από την σχέση:

$$p_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [n_{ij}]^\beta [h_{ij}]^\gamma}{\sum_{l=1}^M [\tau_{il}]^\alpha [n_{il}]^\beta [h_{il}]^\gamma} \quad (6.6)$$

όπου $\gamma \geq 0$ είναι η παράμετρος που καθορίζει σε τι βαθμό επηρεάζει η πληροφορία κατανάλωσης ενέργειας.

Κάθε φορά που ο αναζητητής μετακινείται από τον κόμβο i στον επόμενο κόμβο j η εν λόγω πληροφορία κατανάλωσης ενέργειας μεταβάλλεται, σύμφωνα με την ενέργεια που έχει καταναλωθεί για την άφιξη στον i -οστό κόμβο και τον τύπο του προηγούμενου κόμβου. Πιο

συγκεκριμένα αν ο προηγούμενος κόμβος είναι πελάτης ($i \in M$) τότε η εν λόγω πληροφορία ενημερώνεται ως:

$$h_{ij, i \in M} \leftarrow \begin{cases} h_{ij} + \frac{1}{y_{i-1}} & \forall j \in F \\ h_{ij} - \frac{1}{y_{i-1}} & \forall j \in M \end{cases} \quad (6.7)$$

ωστόσο, αν ο προηγούμενος κόμβος είναι σταθμός φόρτισης ($i \in F$) τότε η πληροφορία ενημερώνεται ως:

$$h_{ij, i \in F} \leftarrow \begin{cases} 0 & \forall j \in F \\ h_{ij}^0 & \forall j \in M \end{cases} \quad (6.8)$$

όπου ως h_{ij}^0 συμβολίζεται η αρχική τιμή της πληροφορίας κατανάλωσης ενέργειας και υπολογίζεται από την σχέση:

$$h_{ij}^0 = \frac{1}{ec_{ij}} \quad (6.9)$$

όπου ec_{ij} είναι η απαιτούμενη ενέργεια για την μετακίνηση του οχήματος από τον κόμβο i στο κόμβο j .

7 Πειραματική Διαδικασία Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων

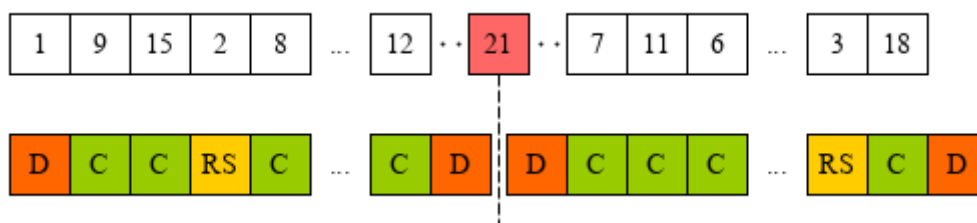
Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python 3.9 σε υπολογιστή με μνήμη 16GB, επεξεργαστή 3.60GHz AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor και λειτουργικό Windows 10 Enterprise. Επιπλέον, για την συγκριτική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου επιλέχθηκαν 20 μελέτες περίπτωσης συγκριτικής αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, οι εν λόγω μελέτες περίπτωσης επιλέχθηκαν τυχαία από τις διαδεδομένες μελέτες περίπτωσης που παρουσίασαν οι Schneider, Stenger και Goeke (2014).

7.1 Αναδιατύπωση της Λύσης

Προκειμένου να διατυπωθούν αποτελεσματικά οι υποψήφιες λύσεις του ΠΔΗΟ, το διάνυσμα της λύσης πρέπει να διαχωριστεί σε υποδιανύσματα (subvectors), τα οποία αντιπροσωπεύουν την διαδρομή κάθε οχήματος που χρησιμοποιείται. Επιπρόσθετα, η εν λόγω αναδιατύπωση της λύσης περιλαμβάνει βουβά διανύσματα (dummy vertices) τα οποία αντιπροσωπεύουν τιμές στο διάστημα $[N + 1, \min_N_of_Vehicles]$. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, όπου το πλήθος των κόμβων N ισούται με 20, ο $21^{ος}$ κόμβος εκπροσωπεί ένα βουβό διάνυσμα. Το άνω όριο του παραπάνω διαστήματος αποτελεί ο ελάχιστος αριθμός των οχημάτων, ο οποίος υπολογίζεται από το ανάλογο της συνολικής ζήτησης ως προς την μέγιστη χωρητικότητα φορτίου των οχημάτων:

$$\min_N_of_Vehicles = \frac{\sum q_i}{C} \quad (7.1)$$

Τα εν λόγω βουβά διανύσματα συμβολίζουν την απασχόληση ενός επιπλέον οχήματος. Συνεπώς, κατά την αναδιατύπωση της λύσης, ο εναρκτήριο κόμβος προστίθεται στο τέλος της διαδρομής του τελευταίου οχήματος και στην έναρξη της διαδρομής του επόμενου οχήματος.



Εικόνα 4: Στρατηγική αναδιατύπωσης λύσης.

7.2 Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Handling)

Προκειμένου να αποφευχθούν μη εφικτές περιοχές του χώρου λύσεων κατά την εκτέλεση της αλγοριθμικής διαδικασίας, η αντικειμενική συνάρτηση επεκτείνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\min [D_{cost} + LC + penalty + AV \cdot penalty] \quad (7.2)$$

όπου ως D_{cost} συμβολίζεται το κόστος μετακίνησης, το οποίο αποτελεί την αρχική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5.8). Επιπλέον, ως LC συμβολίζεται η εκτίμηση της απόστασης (Length Consideration). Συγκεκριμένα, αποτελεί έναν παράγοντα, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του το μήκος της διαδρομής, προκειμένου να αποφευχθούν διαδρομές μεγάλου μήκους. Συνήθως, οι διαδρομές μεγάλου μήκους είναι αποτέλεσμα πολλαπλών περιττών επισκέψεων σε σταθμούς φόρτισης. Με $penalty$ συμβολίζεται η συνολική ποινή (penalty) που εφαρμόζεται για παραβίαση οποιουδήποτε περιορισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος της συνολικής ποινής εμφανίζεται δύο φορές στην παραπάνω εξίσωση. Στη δεύτερη εμφάνιση του εφαρμόζεται ως ποινή για κάθε πρόσθετο όχημα (Additional Vehicle) που χρησιμοποιείται. Ο παραπάνω παράγοντας AV έχει μοντελοποιηθεί ώστε να αποφεύγεται η υπέρβαση του μέγιστου αριθμού των επιτρεπτών οχημάτων και υπολογίζεται ως:

$$AV = \begin{cases} 1 & \text{εάν το επιτρεπτό πλήθος οχημάτων} \leq \text{σύνολο οχημάτων} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (7.3)$$

Επιπρόσθετα, ο παράγοντας LC υπολογίζεται ως:

$$LC = D_{cost} \cdot \frac{length_{sol}}{100} \quad (7.4)$$

όπου $length_{sol}$ αντιπροσωπεύει το συνολικό μήκος της διαδρομής, των πραγματικών και βουβών διανυσμάτων.

Όσον αφορά την συνολική ποινή $penalty$ αποτελεί ένα μέτρο το οποίο μειώνει την ποιότητα της λύσης και υπολογίζεται ως:

$$penalty = D_{cost} \cdot \sum_{i=1} cr_i \quad \forall cr_i \text{ που παραβιάζεται} \quad (7.5)$$

όπου το cr_i περιγράφεται από την σχέση:

$$cr_i = \begin{cases} 1 & \text{αν παραβιάζεται ο } i - \text{οστός περιορισμός} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (7.6)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (7.5), η ποιότητα κάθε λύσης μειώνεται ανάλογα με το πλήθος των περιορισμών που παραβιάζονται.

7.3 Ρύθμιση Παραμέτρων

Πίνακας 23: Τιμές παραμέτρων προτεινόμενης BAM.

Παράμετροι	Προτεινόμενη BAM
Γενιές	200
Πληθυσμός	50
a	1
β	1.5
γ	2.5

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη στατιστική απόδοση της προτεινόμενης Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (BAM), κατά την προσέγγιση του προβλήματος δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων, είναι απαραίτητο να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων για τις οποίες επιτυγχάνεται η καλύτερη στατιστική απόδοση. Η επιλογή των παραμέτρων της εν λόγω μεθόδου, έγινε έπειτα από μια εξαντλητική εμπειρική διαδικασία. Ο Πίνακας 23 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων την προτεινόμενης BAM, που προέκυψαν από τη διαδικασία ρύθμισης παραμέτρων.

7.4 Αποτελέσματα

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της προτεινόμενης BAM, εξετάστηκαν δύο προσεγγίσεις Αναζήτησης Μεταβλητής Γειτνίασης (Variable Neighborhood Search) (Mladenović and Hansen, 1997), οι οποίες βασίζονται στις τεχνικές (operators) 2-opt και 3-opt, αντίστοιχα. Επιπλέον, για την ενίσχυση της απόδοσης των εν λόγω προσεγγίσεων, εφαρμόστηκαν μερικές τεχνικές καταστροφής (destroy operators) και επιδιόρθωσης (repair operators). Συγκεκριμένα, μεταξύ των τεχνικών καταστροφής περιλαμβάνονται αυτή του Χειρότερου Πελάτη (Worst Customer) (Ropke and Pisinger, 2006), του Πλήρες Σταθμού Φόρτισης (Full Recharging Station) και του Χειρότερου Σταθμού Φόρτισης (Worst Charge Station) (Keskin and Çatay, 2016). Επιπλέον, οι τεχνικές επιδιόρθωσης που εφαρμόστηκαν περιλαμβάνουν τις τεχνικές Άπληστου Πελάτη (Greedy Customer) και Άπληστου Σταθμού Φόρτισης (Greedy Station) (Pisinger and Ropke, 2007).

Ο Πίνακας 24 περιέχει τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου BAM καθώς και των δύο προσεγγίσεων Αναζήτησης Μεταβλητής Γειτνίασης (AMΓ). Για κάθε μια εξεταζόμενη μέθοδο, παρουσιάζεται η μέση απόδοση και η καλύτερη απόδοση που

επιτεύχθηκε κατά τις ανεξάρτητες εκτελέσεις τους. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μέση σύγκλιση, δηλαδή ο μέσος αριθμός επαναλήψεων στις οποίες οι μέθοδοι έχουν επιτύχει την καλύτερη λύση, σε κάθε ανεξάρτητη εκτέλεση. Τέλος, παρουσιάζεται το ποσοστό των ανεξάρτητων εκτελέσεων όπου οι μέθοδοι κατάφεραν να αποδώσουν εφικτή λύση. Προκειμένου να αποφευχθεί σύγχυση, οι δύο προσεγγίσεις της ΑΜΓ συμβολίζονται με X-opt ώστε να είναι διακριτές στον εν λόγω πίνακα. Εκτός αυτού, περιλαμβάνουν επίσης τις τεχνικές καταστροφής και επιδιόρθωσης, όπως αναφέρεται παραπάνω.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον εν λόγω πίνακα, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη ΒΑΜ υπερνικά τις δύο προσεγγίσεις ΑΜΓ στην πλειονότητα των μελετών περίπτωσης, τόσο όσον αφορά την μέση απόδοση όσο και την καλύτερη απόδοση που έχει επιτευχθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσθήκη της πληροφορίας κατανάλωσης ενέργειας (energy consumption information) στον πιθανοτικό κανόνα της ΒΑΜ, εξασφάλισε την επιστροφή εφικτής λύσης σε κάθε ανεξάρτητη εκτέλεση της μεθόδου. Η παραπάνω παρατήρηση εμφανίζεται σε όλες τις μελέτες περίπτωσης, σε αντίθεση με τις δύο προσεγγίσεις ΑΜΓ, όπου εμφανίζουν χαμηλό ποσοστό εφικτών λύσεων. Επιπρόσθετα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ΑΜΓ (3-opt) δεν κατάφερε να επιτύχει εφικτή λύση σε καμία ανεξάρτητη εκτέλεση.

Επιπλέον, παρατηρείται πως η προτεινόμενη ΒΑΜ συνέκλινε αρκετά γρήγορα σε μια λύση. Στις δύο περιπτώσεις όπου παρατηρείται σύγκλιση σχεδόν στην αρχή του αλγορίθμου (δηλ. μελέτες περίπτωσης c106C15 και r102C10), ήταν αναμενόμενο, αφού οι εν λόγω μελέτες περίπτωσης αποτελούνται από λίγους πελάτες. Ωστόσο, η προτεινόμενη ΒΑΜ πέτυχε καλύτερη απόδοση σε αυτές τις μελέτες περίπτωσης συγκριτικά με τις δύο προσεγγίσεις ΑΜΓ.

Πίνακας 24: Αποτελέσματα BAM και των δύο AMΓ σε μελέτες περίπτωσης ΠΔΗΟ.

Μελέτη Περίπτωσης	Μέθοδος											
	BAM				AMΓ (3-opt)				AMΓ (2-opt)			
	Μέση Απόδοση	Καλύτερη Απόδοση	Μέση Σύγκλιση	Εφικτ. %	Μέση Απόδοση	Καλύτερη Απόδοση	Μέση Σύγκλιση	Εφικτ.%	Μέση Απόδοση	Καλύτερη Απόδοση	Μέση Σύγκλιση	Εφικτ. %
c102_21	1165.06	1019.68	21.32	100	990.78	987.03	22.72	12	988.72	984.51	30.96	8
c106C15	260.73	240.41	6.64	100	384.59	321.22	1.40	48	353.86	322.22	34.09	44
c108_21	1158.90	1066.99	55.61	100	1003.03	997.30	56.58	8	991.19	990.40	31.54	8
c201_21	819.63	727.43	36.40	100	864.67	838.15	1.50	16	1137.04	842.07	1.00	8
c202C15	356.35	346.66	21.64	100	475.23	432.11	7.75	24	440.67	419.06	129.00	32
c203_21	810.19	736.07	40.16	100	855.33	844.67	110.00	8	851.03	826.50	3.25	12
c208_21	805.77	735.70	36.24	100	844.28	832.86	1.00	8	836.58	826.50	1.70	12
r102C10	232.01	222.87	7.28	100	321.23	295.23	25.00	20	313.30	276.04	2.00	36
r103_21	1222.07	1166.19	19.76	100	1077.70	1077.73	2.00	4	1092.77	1092.76	48.00	4
r109_21	1233.04	1156.96	25.52	100	1097.39	1084.60	6.33	12	1108.11	1074.64	1.00	8
r202C15	300.62	294.13	30.40	100	364.78	330.77	9.80	36	320.95	289.28	16.50	20
r203C10	224.81	219.06	14.00	100	270.40	230.43	32.93	60	273.41	230.43	1.80	60
r203_21	811.21	779.36	30.16	100	1068.35	864.32	56.67	12	1182.43	826.32	47.26	32
r209C15	266.11	255.80	21.64	100	319.42	237.53	15.00	36	368.08	258.22	85.75	12
r211_21	806.85	770.06	31.32	100	1064.81	807.39	51.40	40	1162.95	811.94	5.00	52
rc201_21	822.10	764.81	34.96	100	1168.45	1016.66	26.67	12	1374.01	919.22	78.00	20
rc203_21	816.62	747.22	34.44	100	1149.63	946.74	33.50	16	2048.78	1079.44	124.80	12
rc206_21	809.14	753.35	32.24	100	1365.24	945.66	116.25	16	1205.95	963.49	337.00	20
rc207_21	826.58	781.41	27.96	100	1381.23	895.79	67.25	32	1099.02	958.88	192.24	24
rc208_21	856.78	812.63	35.40	100	-	-	-	0	954.99	927.99	60.48	8

Επιπρόσθετα, προκειμένου να ελεγχθεί αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ όλων των εξεταζόμενων μεθόδων, εφαρμόστηκε το Friedman τεστ το οποίου τα αποτελέσματα του περιέχονται στον Πίνακας 25. Με επίπεδο σημαντικότητας 5%, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για τις μελέτες περίπτωσης που εξετάστηκαν, η προτεινόμενη BAM έχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις δύο προσεγγίσεις AMΓ.

Πίνακας 25: Τεστ Friedman αποτελεσμάτων ΠΔΗΟ.

Μέθοδος	Friedman
BAM	1.50
AMΓ (2-opt)	2.23
AMΓ (3-opt)	2.22
Statistic	7.6202
p-value	0.0221

7.5 Συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα περιστρέφεται γύρω από δύο διαφορετικές κατευθύνσεις, τη διεξαγωγή μιας σύντομης και συστηματικής ανασκόπησης των μετα-ευρετικών προσεγγίσεων που εφαρμόζονται στο ΠΔΗΟ και την παρουσίαση των διαθέσιμων δεδομένων των μελετών περίπτωσης της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, να διεξαχθεί ένας προκαταρκτικός πειραματισμός με στόχο τη σύγκριση διαφορετικών μετα-ευρετικών προσεγγίσεων σε διάφορες γνωστές μελέτες περίπτωσης του ΠΔΗΟ. Προκειμένου αυτό να υλοποιηθεί, έχει αναπτυχθεί μια νέα προσέγγιση επίλυσης που βασίζεται στην Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (BAM). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή ενός επιπλέον όρου στο πιθανοτικό μοντέλο του προτεινόμενου BAM. Αυτός ο όρος, που ονομάζεται πληροφορία κατανάλωσης ενέργειας, λαμβάνει υπόψη την υπολειπόμενη ενέργεια του οχήματος, έτσι ώστε οι σταθμοί φόρτισης να επισκέπτονται από το όχημα όταν αυτό χρειάζεται κατά την διαδρομή του. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι παράγονται πάντα εφικτές λύσεις.

Προκειμένου να γίνει έλεγχος της απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε 20 γνωστές περιπτώσεις συγκριτικής αξιολόγησης που επιλέχθηκαν. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν δύο προσεγγίσεις AMΓ, στις οποίες ενσωματώθηκαν τεχνικές καταστροφής και επιδιόρθωσης ώστε να αντιμετωπίσουν το ΠΔΗΟ. Συνολικά, η BAM ξεπερνά και τις δύο αυτές προσεγγίσεις AMΓ. Επίσης, κατάφερε να παρέχει εφικτή λύση σε όλες τις ανεξάρτητες εκτελέσεις κάθε περίπτωσης συγκριτικής αξιολόγησης, ενώ οι προσεγγίσεις AMΓ είχαν πολύ χαμηλό ποσοστό εφικτών λύσεων, παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές για την αποφυγή αυτής της κατάστασης. Όσον αφορά τη σύγκλιση της προτεινόμενης μεθόδου, φαίνεται ότι η BAM είναι σε θέση να συγκλίνει πολύ γρήγορα σε μια λύση. Έτσι, ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα αποτελεί η βελτιστοποίηση του προτεινόμενου αλγόριθμου, ώστε να μην συγκλίνει πολύ γρήγορα και να δύναται να

εξερευνήσει περισσότερες λύσεις. Εκτός από τη ρύθμιση των παραμέτρων του, ένας άλλος τρόπος για να επιτευχθεί αυτή η συμπεριφορά είναι η ενσωμάτωση τεχνικών που θα παρέχουν μεγαλύτερη ποικιλομορφία (diversity) στον πληθυσμό της προτεινόμενης ΒΑΜ.

Επιπλέον, επέκταση της έρευνας αποτελεί η μελέτη περισσότερων εκδόσεων του ΠΔΗΟ. Συγκεκριμένα, μπορούν να ληφθούν υπόψη χρονικά περιθώριο και πολλαπλές τοποθεσίες εναρκτηρίων κόμβων, ενώ μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη πρόσθετοι περιορισμοί. Επίσης, στην παρούσα έρευνα, κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων δεν συμπεριλήφθηκαν οι καλύτεροι αλγόριθμοι για την επίλυση του ΠΔΗΟ, καθώς παρέχεται ένας προκαταρκτικός πειραματισμός σχετικά με την προτεινόμενη μέθοδο. Ως εκ τούτου, η μελλοντική έρευνα θα αφιερωθεί στην επέκταση της σύγκρισης των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις μεθόδους επίλυσης.

8 Γενικά Συμπεράσματα

Η αυξημένη πολυπλοκότητα σε προβλήματα λήψης απόφασης της βιομηχανίας, οδήγησε στην εμφάνιση πολλών εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης. Ωστόσο, προκύπτει το ερώτημα, κατά πόσο αυτές οι νοήμονες μεθοδολογίες είναι αποτελεσματικές κατά την επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

Στην παρούσα έρευνα αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν νοήμονες μεθοδολογίες για την προσέγγιση πολύπλοκων προβλημάτων από τον χώρο της Μηχανικής Αξιοπιστίας και της Εφοδιαστικής Αλυσίδας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν νοήμονα υβριδικά σχήματα που απαρτίζονται από αλγορίθμους εμπνευσμένους από την φύση, προκειμένου να επιλύσουν προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας-εφεδρείας. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια νέα καινοτόμος μεθοδολογία Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών για την επίλυση του Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων.

Για να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων νοημόνων μεθοδολογιών, συλλέχθηκαν, μελετήθηκαν και επιλύθηκαν γνώστες μελέτες περίπτωσης από το πεδίο των δύο προβλημάτων. Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες συγκρίθηκαν σε κάποιες περιπτώσεις με άλλες νοήμονες μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας αλλά κυρίως με κλασσικές μεθοδολογίες που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία.

Σχετικά με τον υβριδισμό, αποδείχθηκε ότι αυτοί αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση τέτοιων καθώς φάνηκε να υπερνικά τις κλασσικές μεθόδους όσον αφορά τα προβλήματα από τον χώρο της Μηχανικής Αξιοπιστίας. Επιπλέον, συγκριτικά με τις νοήμονες μεθοδολογίες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία αποτελεί ένα εργαλείο το οποίο αποδίδει λύσεις συντομότερα κοντά στις υπάρχουσες ισχυρές μεθοδολογίες.

Όσον αφορά την νέα τροποποιημένη Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών, αποδείχθηκε εξίσου μια αποτελεσματική προσέγγιση, καθώς κατάφερε να αντιμετωπίσει την υψηλή πολυπλοκότητα του Προβλήματος Δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων. Σε αντίθεση με τις κλασσικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν, κατάφερε να αποδώσει εφικτές λύσεις σε όλες τις ανεξάρτητες εκτελέσεις για κάθε μελέτη περίπτωσης που επιλέχθηκε.

Συνολικά, φαίνεται πως οι νοήμονες μεθοδολογίες αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης λήψης απόφασης για προβλήματα γύρω από τον χώρο της Μηχανικής αλλά και προβλήματα που καλείται να λύσει ένας Μηχανικός Οικονομίας και Διοίκησης.

9 Βιβλιογραφία

Abido, M.A., 2002. Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 30(5), pp.469–483. <https://doi.org/10.1080/15325000252888425>.

Abouei Ardakan, M. and Zeinal Hamadani, A., 2014. Reliability–redundancy allocation problem with cold-standby redundancy strategy. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 42, pp.107–118. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.12.013>.

Afonso, L.D., Mariani, V.C. and dos Santos Coelho, L., 2013. Modified imperialist competitive algorithm based on attraction and repulsion concepts for reliability-redundancy optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(9), pp.3794–3802. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.093>.

Agarwal, M. and Sharma, V.K., 2010. Ant colony approach to constrained redundancy optimization in binary systems. *Applied Mathematical Modelling*, 34(4), pp.992–1003. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.07.016>.

Ai, T.J. and Kachitvichyanukul, V., 2009. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Selected papers presented at the Tenth International Symposium on Locational Decisions (ISOLDE X)*, 36(5), pp.1693–1702. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.04.003>.

Alesiani, F. and Maslekar, N., 2014. Optimization of charging stops for fleet of electric vehicles: A genetic approach. *IEEE Intelligent transportation systems magazine*, 6(3), pp.10–21.

Barco, J., Guerra, A., Munoz, L. and Quijano, N., 2013. Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles: A case study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.

Birolini, A., 2010. *Reliability engineering*. 6th ed. [online] Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14952-8>.

Brady, M., 1984. Artificial Intelligence and Robotics. In: M. Brady, L.A. Gerhardt and H.F. Davidson, eds. *Robotics and Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp.47–63.

Bräysy, O. and Gendreau, M., 2005. Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation science*, 39(1), pp.104–118.

Carbonell, J.G., Michalski, R.S. and Mitchell, T.M., 1983. Machine Learning: A Historical and Methodological Analysis. *AI Magazine*, 4(3), p.69. <https://doi.org/10.1609/aimag.v4i3.406>.

Chen, T.-C., 2006. IAs based approach for reliability redundancy allocation problems. *Applied Mathematics and Computation*, 182(2), pp.1556–1567. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.05.044>.

Chern, M.-S., 1992. On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. *Operations Research Letters*, 11(5), pp.309–315. [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(92\)90008-Q](https://doi.org/10.1016/0167-6377(92)90008-Q).

Coelho, L. dos S., 2009. An efficient particle swarm approach for mixed-integer programming in reliability–redundancy optimization applications. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(4), pp.830–837. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.09.001>.

D. Zou, J. Wu, L. Gao, and Xin Wang, 2010. A modified particle swarm optimization algorithm for reliability problems. In: *2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*. 2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA). pp.1098–1105. <https://doi.org/10.1109/BICTA.2010.5645107>.

Dantzig, G.B. and Ramser, J.H., 1959. The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), pp.80–91.

Demir, E., Bektaş, T. and Laporte, G., 2012. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), pp.346–359.

Derrac, J., García, S., Molina, D. and Herrera, F., 2011. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), pp.3–18. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.02.002>.

Dhingra, A.K., 1992. Optimal Apportionment of Reliability & Redundancy in Series Systems Under Multiple Objectives. *IEEE Transactions on Reliability*, 41(4), pp.576–582. <https://doi.org/10.1109/24.249589>.

Dorigo, M., 1992. Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano*.

Dorigo, M., Birattari, M. and Stutzle, T., 2006. Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4), pp.28–39.

E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, 2007. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In: *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. pp.4661–4667. <https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4425083>.

Erdelić, T. and Carić, T., 2019. A survey on the electric vehicle routing problem: variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.

Erdoğan, S. and Miller-Hooks, E., 2012. A green vehicle routing problem. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48(1), pp.100–114.

Erdoğan, K. and Karabulut, K., 2020. Distance and energy consumption minimization in electric traveling salesman problem with time windows. In: *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. IEEE. pp.160–164.

Fogel, L.J., Owens, A.J. and Walsh, M.J., 1966. Intelligent decision making through a simulation of evolution. *Behavioral Science*, 11(4), pp.253–272. <https://doi.org/10.1002/bs.3830110403>.

Garg, H., 2015a. An approach for solving constrained reliability-redundancy allocation problems using cuckoo search algorithm. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(1), pp.14–25. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2015.02.003>.

Garg, H., 2015b. An efficient biogeography based optimization algorithm for solving reliability optimization problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 24, pp.1–10. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.05.001>.

Garg, H., Rani, M. and Sharma, S.P., 2013. An efficient two phase approach for solving reliability–redundancy allocation problem using artificial bee colony technique. *Computers & Operations Research*, 40(12), pp.2961–2969. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.07.014>.

Garg, H. and Sharma, S.P., 2013. Reliability-redundancy allocation problem of pharmaceutical plant. *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(2), pp.190–198.

Glover, F., 1989. Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing*, 1(3), pp.190–206.

Goeke, D., 2019. Granular tabu search for the pickup and delivery problem with time windows and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 278(3), pp.821–836.

Goeke, D. and Schneider, M., 2015. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), pp.81–99.

Gutin, G. and Punnen, A.P., 2006. *The traveling salesman problem and its variations*. Springer Science & Business Media.

Hiermann, G., Hartl, R.F., Puchinger, J. and Vidal, T., 2019. Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272(1), pp.235–248.

Hikita, M., Nakagawa, Y., Nakashima, K. and Narihisa, H., 1992. Reliability Optimization of Systems by a Surrogate-Constraints Algorithm. *IEEE Transactions on Reliability*, 41(3), pp.473–480. <https://doi.org/10.1109/24.159825>.

Hsieh, Y.-C., Chen, T.-C. and Bricker, D.L., 1998. Genetic algorithms for reliability design problems. *Microelectronics Reliability*, 38(10), pp.1599–1605. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(98\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(98)00028-6).

Hsieh, Y.-C. and You, P.-S., 2011. An effective immune based two-phase approach for the optimal reliability–redundancy allocation problem. *Applied Mathematics and Computation*, 218(4), pp.1297–1307. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2011.06.012>.

Huang, C.-L., 2015. A particle-based simplified swarm optimization algorithm for reliability redundancy allocation problems. *Reliability Engineering & System Safety*, 142, pp.221–230. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.06.002>.

Joo, H. and Lim, Y., 2018. Ant colony optimized routing strategy for electric vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.

Kanagaraj, G., Ponnambalam, S.G. and Jawahar, N., 2013. A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability–redundancy allocation problems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), pp.1115–1124. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.08.003>.

Keskin, M. and Çatay, B., 2016. Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation research part C: emerging technologies*, 65, pp.111–127.

Keskin, M. and Çatay, B., 2018. A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers. *Computers & operations research*, 100, pp.172–188.

Keskin, M., Laporte, G. and Çatay, B., 2019. Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 107, pp.77–94.

Kim, H.-G., Bae, C.-O. and Park, D.-J., 2006. Reliability-redundancy optimization using simulated annealing algorithms. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(4), pp.354–363. <https://doi.org/10.1108/13552510610705928>.

Kleindorfer, P.R., Singhal, K. and Van Wassenhove, L.N., 2005. Sustainable operations management. *Production and operations management*, 14(4), pp.482–492.

Konar, A., 2005. *Computational Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/b138935>.

Küçükoğlu, İ., Dewil, R. and Cattrysse, D., 2019. Hybrid simulated annealing and tabu search method for the electric travelling salesman problem with time windows and mixed charging rates. *Expert Systems with Applications*, 134, pp.279–303.

Kulturel-Konak, S., Smith, A.E. and Coit, D.W., 2003. Efficiently Solving the Redundancy Allocation Problem Using Tabu Search. *IIE Transactions*, 35(6), pp.515–526. <https://doi.org/10.1080/07408170304422>.

Levitin, G., 2007. *Computational Intelligence in Reliability Engineering*. [online] Springer. Available at: <<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-37368-1>>.

Liao, W., Liu, L. and Fu, J., 2019. A comparative study on the routing problem of electric and fuel vehicles considering carbon trading. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(17), p.3120.

M. Hikita, Y. Nakagawa, K. Nakashima, and H. Narihisa, 1992. Reliability optimization of systems by a surrogate-constraints algorithm. *IEEE Transactions on Reliability*, 41(3), pp.473–480.

Manogaran, G., Shakeel, P.M., Priyan R, V., Chilamkurti, N. and Srivastava, A., 2019. Ant colony optimization-induced route optimization for enhancing driving range of electric vehicles. *International Journal of Communication Systems*, p.e3964.

Mavrovouniotis, M., Li, C., Ellinas, G. and Polycarpou, M., 2019. Parallel ant colony optimization for the electric vehicle routing problem. In: *2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. IEEE. pp.1660–1667.

McCarthy, J., Minsky, M.L., Rochester, N. and Shannon, C.E., 1955. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955. *AI Magazine*, 27(4), p.12. <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>.

Mellal, M.A. and Zio, E., 2016. A penalty guided stochastic fractal search approach for system reliability optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 152, pp.213–227. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.03.019>.

Miller, B.L., Miller, B.L., Goldberg, D.E. and Goldberg, D.E., 1995. Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise. *Complex Systems*, 9, pp.193–212.

Mladenović, N. and Hansen, P., 1997. Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), pp.1097–1100.

Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J.E. and Villegas, J.G., 2017. The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B: Methodological*, 103, pp.87–110.

Muriel, J.B. and Fotouhi, A., 2020. Electric vehicle fleet management using ant colony optimisation. *International Journal of Strategic Engineering (IJoSE)*, 3(1), pp.1–16.

Nemenyi, P.B., 1963. *Distribution-free multiple comparisons*. Princeton University.

Ou, S., Lin, Z., Wu, Z., Zheng, J., Lyu, R., Przesmitzki, S. and He, X., 2017. A study of China's explosive growth in the plug-in electric vehicle market. *Knoxville TN*.

Oulad Kouider, T., Ramdane Cherif-Khettaf, W. and Oulamara, A., 2019. Metaheuristics for the Generalised Periodic Electric Vehicle Routing Problem. In: *International Conference on Computational Logistics*. Springer. pp.219–232.

Oulad Kouider, T., Ramdane Cherif-Khettaf, W. and Oulamara, A., 2020. Metaheuristics for Periodic Electric Vehicle Routing Problem. In: G.H. Parlier, F. Liberatore and M. Demange, eds. *Operations Research and Enterprise Systems*, Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer International Publishing. pp.156–170. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37584-3_8.

Ouyang, H., Gao, L., Li, S. and Kong, X., 2015. Improved novel global harmony search with a new relaxation method for reliability optimization problems. *Information Sciences*, 305, pp.14–55. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.01.020>.

Pelletier, S., Jabali, O. and Laporte, G., 2019. The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, pp.225–255.

Pisinger, D. and Ropke, S., 2007. A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & operations research*, 34(8), pp.2403–2435.

Preis, H., Frank, S. and Nachtigall, K., 2014. Energy-optimized routing of electric vehicles in urban delivery systems. In: *Operations research proceedings 2012*. Springer. pp.583–588.

Q. Liang, H. Dong, X. Yi, B. Qin, and X. Yang, 2016. A reliability optimization allocation method for multifunctional systems using new hybrid particle swarm optimization. In: *2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*. 2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). pp.1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRMS.2016.8050064>.

Ralphs, T., Kopman, L., Pulleyblank, W. and Trotter Jr, L., 2001. On the capacitated vehicle routing problem.

Ravi, V., Reddy, P.J. and Zimmermann, H.-J., 2000. Fuzzy global optimization of complex system reliability. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(3), pp.241–248. <https://doi.org/10.1109/91.855914>.

Ravikumar Pandi, V. and B. K., P., 2008. An improved adaptive particle swarm optimization approach for multi-modal function optimization. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 29(2), pp.359–375. <https://doi.org/10.1080/02522667.2008.10699810>.

Rojas, R., 1996. The Biological Paradigm. In: R. Rojas, ed. *Neural Networks: A Systematic Introduction*. [online] Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp.3–27. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61068-4_1.

Ropke, S. and Pisinger, D., 2006. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation science*, 40(4), pp.455–472.

Salimi, H., 2015. Stochastic Fractal Search: A powerful metaheuristic algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 75, pp.1–18. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.07.025>.

Sassi, O., Cherif-Khettaf, W.R. and Oulamara, A., 2015. Iterated tabu search for the mix fleet vehicle routing problem with heterogenous electric vehicles. In: *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*. Springer. pp.57–68.

Schiffer, M. and Walther, G., 2018. Strategic planning of electric logistics fleet networks: A robust location-routing approach. *Omega*, 80, pp.31–42.

Schiffer, M., Walther, G. and Stütz, S., 2017. *Are ECVs breaking even?: Competitiveness of electric commercial vehicles in retail logistics*. GERAD, École des hautes études commerciales.

Schneider, M., Stenger, A. and Goeke, D., 2014. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation science*, 48(4), pp.500–520.

Shao, S., Guan, W. and Bi, J., 2018a. Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(3), pp.202–212.

Shao, S., Guan, W. and Bi, J., 2018b. Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(3), pp.202–212.

Solomon, M.M., 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), pp.254–265.

Talafuse, T.P. and Pohl, E.A., 2016. A bat algorithm for the redundancy allocation problem. *Engineering Optimization*, 48(5), pp.900–910. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2015.1076402>.

Toth, P. and Vigo, D., 2002. *The vehicle routing problem*. SIAM.

Ursem, R.K., 2002. Diversity-Guided Evolutionary Algorithms. In: J.J.M. Guervós, P. Adamidis, H.-G. Beyer, H.-P. Schwefel and J.-L. Fernández-Villacañás, eds. *Parallel Problem Solving from Nature — PPSN VII*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp.462–471.

V. Ravi, B. S. N. Murty, and J. Reddy, 1997. Nonequilibrium simulated-annealing algorithm applied to reliability optimization of complex systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 46(2), pp.233–239.

Valian, E., Tavakoli, S., Mohanna, S. and Haghi, A., 2013. Improved cuckoo search for reliability optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), pp.459–468. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.07.011>.

Vrbančič, G., Brezocnik, L., Mlakar, U., Fister, D. and Fister Jr., I., 2018. NiaPy: Python microframework for building nature-inspired algorithms. *Journal of Open Source Software*, [online] 3(23). <https://doi.org/10.21105/joss.00613>.

W. Kuo, H. Lin, Z. Xu, and W. Zhang, 1987. Reliability Optimization with the Lagrange-Multiplier and Branch-and-Bound Technique. *IEEE Transactions on Reliability*, R-36(5), pp.624–630. <https://doi.org/10.1109/TR.1987.5222487>.

Wang, L. and Li, L., 2012. A coevolutionary differential evolution with harmony search for reliability–redundancy optimization. *Expert Systems with Applications*, 39(5), pp.5271–5278. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.012>.

Whitley, D., 1994. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4(2), pp.65–85. <https://doi.org/10.1007/BF00175354>.

Wu, P., Gao, L., Zou, D. and Li, S., 2011. An improved particle swarm optimization algorithm for reliability problems. *ISA Transactions*, 50(1), pp.71–81. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.08.005>.

Xu, Z., Kuo, W. and Lin, H.-H., 1990. Optimization Limits in Improving System Reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, 39(1), pp.51–60. <https://doi.org/10.1109/24.52612>.

Y. Nakagawa and S. Miyazaki, 1981. An Experimental Comparison of the Heuristic Methods for Solving Reliability Optimization Problems. *IEEE Transactions on Reliability*, R-30(2), pp.181–184. <https://doi.org/10.1109/TR.1981.5221026>.

Yang, X.-S., 2010. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In: J.R. González, D.A. Pelta, C. Cruz, G. Terrazas and N. Krasnogor, eds. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*. [online] Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp.65–74. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6.

Yang, X.-S., 2014. Chapter 13 - How to Deal with Constraints. In: X.-S. Yang, ed. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. [online] Oxford: Elsevier. pp.183–196. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416743-8.00013-0>.

Yang, X.-S. and Deb, S., 2014. Cuckoo search: recent advances and applications. *Neural Computing and Applications*, 24(1), pp.169–174. <https://doi.org/10.1007/s00521-013-1367-1>.

Yang, X.S. and He, X., 2013. Firefly algorithm: recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), p.36. <https://doi.org/10.1504/ijsi.2013.055801>.

Yeh, W.-C. and Hsieh, T.-J., 2011. Solving reliability redundancy allocation problems using an artificial bee colony algorithm. *Computers & Operations Research*, 38(11), pp.1465–1473. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.10.028>.

Yokota, T., Gen, M., Li, Y. and Kim, C.E., 1996. A genetic algorithm for interval nonlinear integer programming problem. *18th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 31(3), pp.913–917. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(96\)00263-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(96)00263-X).

Zhang, H., Hu, X., Shao, X., Li, Z. and Wang, Y., 2013. IPSO-based hybrid approaches for reliability-redundancy allocation problems. *Science China Technological Sciences*, 56(11), pp.2854–2864. <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5372-5>.

Zhang, R., Guo, J. and Wang, J., 2020. A time-dependent electric vehicle routing problem with congestion tolls. *IEEE Transactions on Engineering Management*.

Zhao, M. and Lu, Y., 2019. A heuristic approach for a real-world electric vehicle routing problem. *Algorithms*, 12(2), p.45.

Zhu, X., Yan, R., Huang, Z., Wei, W., Yang, J. and Kudratova, S., 2020. Logistic optimization for multi depots loading capacitated electric vehicle routing problem from low carbon perspective. *IEEE Access*, 8, pp.31934–31947.

Σκαρλατάκης, Χ.Π., 2006. Σύστημα ελέγχου αεροστρόβιλου στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου 'Ενεργειακής Θεσσαλονίκης'. [Διπλωματική Εργασία] Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχ. Υπολογιστών. Available at: <<http://ikee.lib.auth.gr/record/291066/files/text.pdf>>.

Τζανέτος, Α., 2020. *Νοήμονες υπολογιστικές μέθοδοι εμπνευσμένες από τον φυσικό κόσμο για την βελτιστοποίηση συστημάτων: βελτιστοποίηση εμπνευσμένη από τον ηχοεντοπισμό*. [online] Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης. Available at: <<http://hdl.handle.net/10442/hedi/47419>>.