



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Επιβλέπων: Δρ. Αλέξανδρος Τζανέτος

ΜΑΡΙΟΣ ΘΥΜΙΑΝΗΣ

**Ανάπτυξη Εφαρμογής Επίλυσης Προβλημάτων  
Αξιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων Με Νοήμονες  
Εξελικτικές Μεθόδους**

Χίος, Ιούλιος 2021

## 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. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Ο δηλών

Μάριος Θυμιάνης

## Στόχος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη νοημόνων εξελικτικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας. Επιπρόσθετα, στόχος είναι και η 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 μείωση του υπολογιστικού χρόνου και την βελτίωση της απόδοσης και της σταθερότητας των επιλεγμένων εξελικτικών μεθόδων που απαρτίζουν τα υβριδικά σχήματα.

Παράλληλα, ένα άλλο επίπεδο εργασίας της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η ανάπτυξη μιας εφαρμογής (application) περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη (Graphical User Interface). Η εν λόγω εφαρμογή, η οποία έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα Python, αποτελεί μια πρώιμη μορφή ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο θα δύναται να υπολογίσει την κατανομή της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και την εφεδρεία αυτών σε κάθε υποσύστημα, που αναλογεί στην βέλτιστη αξιοπιστία για κάποιο εκ των βασικών υποσυστημάτων που θα αποτελέσουν κάποιες από τις μελέτες περίπτωσης της διπλωματικής.

This Thesis aims at the development of intelligent evolutionary methods for solving reliability optimization problems. In addition, another goal is the development of hybrid schemes to approach reliability optimization problems that consist multiple goals and specifically the reliability - redundancy allocation problem. The overall goal is the reduction of computational time and the improvement in terms of efficiency and stability of the selected evolutionary methods that make up the hybrid schemes.

At the same time, in the current thesis, a Graphical User Interface (GUI) has been developed in Python. It constitutes an early form of a decision support system that can approach the allocation of the component reliability and their redundancy in each subsystem, corresponding to the optimal reliability for one of the basic subsystems that will constitute some of the case studies of this thesis.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των προβλημάτων της βιομηχανίας έχει φέρει στο προσκήνιο την εφαρμογή τεχνικών 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 διπλωματική εστιάζει στην προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης από το πεδίο της Αξιοπιστίας Συστημάτων, με χρήση νοημόνων εξελικτικών μεθόδων. Τα εν λόγω προβλήματα στοχεύουν στην επίτευξη του υψηλότερου επιπέδου αξιοπιστίας ενός συστήματος. Πιο συγκεκριμένα τα υπό μελέτη συστήματα αποτελούνται από ένα πλήθος υποσυστημάτων που περιέχουν ένα ή περισσότερα παράλληλα συνδεδεμένα εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας.

Έπειτα από μελέτη της βιβλιογραφίας συλλέχθηκαν 10 μελέτες περίπτωσης μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας (reliability allocation problem) κατά το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί η κατάλληλη προδιαγραφή αξιοπιστίας των εξαρτημάτων, το πρόβλημα κατανομής εφεδρείας (redundancy allocation problem) στο οποίο πρέπει να προσδιοριστεί το πλήθος των εξαρτημάτων για κάθε ένα από τα υποσυστήματα και το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας (reliability – redundancy allocation problem) το οποίο αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων. Ωστόσο, μια αύξηση στο πλήθος των εφεδρικών εξαρτημάτων και στην αξιοπιστία των εξαρτημάτων που αποτελούν τα υποσυστήματα, ανάγεται σε αύξηση του συνολικού κόστους, βάρους και όγκου. Συνεπώς η πολυπλοκότητα των προβλημάτων που μελετώνται στην παρούσα εργασία βρίσκεται στην επίτευξη του υψηλότερου επιπέδου αξιοπιστίας χωρίς την υπέρβαση των διαθέσιμων πόρων του συνολικού κόστους, βάρους και όγκου οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τους μη-γραμμικούς περιορισμούς των προβλημάτων

Έπειτα από εκτενή μελέτη της βιβλιογραφίας, προέκυψε το ενδιαφέρον δημιουργίας υβριδικών σχημάτων (hybrid schemes), τα οποία αποτελούνται από επιμέρους μεθόδους, για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας. Τα εν λόγω υβριδικά σχήματα χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας, ενώ οι επιμέρους μέθοδοι επιλύσαν προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας και κατανομής εφεδρείας. Η λογική είναι να μελετηθεί αν η επιλογή των επιμέρους μεθόδων, για την δημιουργία υβριδικών σχημάτων, μπορεί να επιτευχθεί γνωρίζοντας την στατιστική απόδοση των μεθόδων για τα επιμέρους προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν.

Επιπλέον, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη στατιστική απόδοση πραγματοποιήθηκε παραμετροποίηση των υβριδικών σχημάτων σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την εύρεση των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων που σχετίζονται με τις επιμέρους μεθόδους των υβριδικών σχημάτων με σκοπό την καλύτερη αποδοτικότητά τους, ενώ η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την εύρεση των κατάλληλων αντίστοιχων τιμών των παραμέτρων που είναι κοινές στις εξελικτικές μεθόδους (όπως αυτές του πληθυσμού και των επαναλήψεων μιας εξελικτικής μεθόδου βελτιστοποίησης) με σκοπό την καλύτερη απόδοση των επιμέρους μεθόδων κάθε υβριδικού σχήματος. Οι εν λόγω παράμετροι θα αποτελέσουν τις προεπιλεγμένες (default) παραμέτρους των υβριδικών σχημάτων στην εφαρμογή περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη (Graphical User Interface Application).

Επιπρόσθετα, υλοποιήθηκε ανάλυση των αποτελεσμάτων των υβριδικών σχημάτων και έγινε συγκριτική αξιολόγηση με μεθόδους της βιβλιογραφίας που φέρουν ισχυρή απόδοση. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας, πέραν της απόδοσης, ήταν ο χρόνος που χρειάζεται κάθε υβριδικό σχήμα. Συνεπώς έγινε η μελέτη της μεταβολής της ποιότητας ως προς τον χρόνο όταν αυξάνονται οι τιμές των κοινών παραμέτρων.

Τέλος αναπτύχθηκε σε γλώσσα Python μια εφαρμογή (application) η οποία αποτελεί ένα πρώιμο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, η οποία δύναται να υπολογίσει την κατανομή της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και την εφεδρεία αυτών σε κάθε υποσύστημα, που αναλογεί στην βέλτιστη αξιοπιστία για κάποιο εκ των βασικών υποσυστημάτων.

## Abstract

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

This Thesis focuses on approaching optimization problems from the field of System Reliability, using intelligent evolutionary algorithms. These problems aim at achieving the highest reliability level of a system. Specifically, these systems consist of several subsystems which contain one or more parallel connected components of equal reliability.

After reviewing the literature, 10 case studies were collected, including the reliability allocation problem, in which the reliability of each subsystem's components must be determined, the redundancy allocation problem, in which the number of each subsystem's components must be determined and lastly, the reliability - redundancy allocation problem which is a combination of the previous ones. However, an increase in the number of redundant components that make up the subsystems as well as an increase in the reliability of these components, leads to an increase of the total cost, weight, and volume. Therefore, the complexity of the problems studied in this Thesis lies in achieving the highest reliability level without exceeding the available resources of total cost, weight and volume which represent the non-linear constraints that these problems subject to.

After an extensive study of the literature, the interest of approaching reliability optimization problems with hybrid schemes that consist of individual methods, arose. These hybrid schemes were used to approach reliability-redundancy allocation problems, while the individual methods approached reliability and redundancy allocation problems, individually. The idea behind that is to study whether the selection of individual methods for creating hybrid schemes can be achieved by knowing the statistical performance of the (individual) methods for the individual reliability and redundancy allocation problems, they are called to approach.

In addition, to achieve the best statistical performance, the parameters of the hybrid schemes were configured in two phases. The first phase involves finding the appropriate values of the parameters related to the individual methods of the hybrid schemes to improve their efficiency, while the second phase involves finding the appropriate values of the parameters that are common to the evolutionary methods (such as those of population and generations of an evolutionary algorithm) in order to better perform the individual methods of each hybrid scheme. These parameters will be the default parameters of the hybrid schemes in the Graphical User Interface Application.

Furthermore, an analysis of the results of the hybrid schemes was implemented as well as a comparative evaluation with methods found in the bibliography, that show high performance. Another important factor, in addition to performance, was the time each hybrid scheme takes to approach a problem. Therefore, further research was done to study the change in quality over time when the values of the common parameters increase.

Finally, an application was developed in Python programming language which is a premature decision support system, that can calculate the component reliability as well as the number of redundant components in each subsystem, corresponding to the optimal reliability for one of the basic subsystems.

## Περιεχόμενα

<b>1.</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>17</b>
1.1	Τεχνητή Νοημοσύνη.....	18
1.2	Νοήμονες Εξελικτικές Μέθοδοι .....	19
1.3	Αξιοπιστία Τεχνολογικών Συστημάτων .....	20
1.4	Παραδοχές .....	21
<b>2</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	<b>22</b>
2.1	Εξελικτικός Προγραμματισμός σε προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας .....	22
2.2	Πολυπλοκότητα προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας .....	24
<b>3</b>	<b>ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ - ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ</b> .....	<b>27</b>
3.1	Μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος.....	31
3.2	Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος.....	32
3.3	Μελέτη Περίπτωσης Περίπλοκου Συστήματος Γέφυρας .....	33
3.4	Μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης .....	35
3.5	Μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου .....	36
3.6	Μελέτη περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.....	38
3.7	Μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας .....	39
3.8	Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων .....	40
3.9	Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων .....	41
3.10	Μελέτη περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων.....	43
<b>4</b>	<b>ΝΟΗΜΟΝΕΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</b> .....	<b>45</b>
4.1	Γενικό μοντέλο υβριδικών σχημάτων προσέγγισης προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας .....	46
4.2	Εξεταζόμενες Μέθοδοι .....	47
4.2.1	Γενετικός Αλγόριθμος .....	48
4.2.2	Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις .....	50
4.2.3	Αλγόριθμος της Νυχτερίδας .....	51
4.2.4	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων .....	53
4.2.5	Αναζήτηση Κούκου .....	54
4.2.6	Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας.....	56
4.3	Διαχείριση Περιορισμών (Constrain Handling) .....	57
4.4	Μηχανισμός Επανατοποθέτησης Στον Χώρο Λύσεων .....	58
4.5	Νοήμονα Υβριδικά Σχήματα .....	59
4.5.1	Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΑΑΚ-ΒΣΣ) .....	59



4.5.2	Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΓΑ-ΒΣΣ) .....	61
4.5.3	Υβριδικό σχήμα που αποτελείται Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΑΝ-ΒΣΣ).....	62
4.5.4	Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αναζήτησης Κούκου (ΑΝ-ΑΚ).....	64
4.5.5	Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας (ΑΝ-ΑΠ).....	66
4.5.6	Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αναζήτησης Κούκου (ΓΑ-ΑΚ).....	67
4.5.7	Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας (ΓΑ-ΑΠ).....	69
4.5.8	Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αναζήτησης Κούκου (ΑΑΚ-ΑΚ).....	70
4.5.9	Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας (ΑΑΚ-ΑΠ) .....	72
<b>5</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>75</b>
5.1	Ρύθμιση παραμέτρων.....	75
5.1.1	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Γενετικού Αλγόριθμου Και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων .....	76
5.1.2	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Γενετικού Αλγόριθμου Και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας .....	79
5.1.3	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Γενετικού Αλγόριθμου Και Αναζήτησης Κούκου .....	81
5.1.4	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αλγόριθμου Νυχτερίδας Και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων .....	83
5.1.5	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αλγόριθμου Νυχτερίδας Και Αλγορίθμου Πυγολαμπίδας .....	86
5.1.6	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αλγόριθμου Νυχτερίδας Και Αναζήτησης Κούκου.....	89
5.1.7	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις Και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων .....	91
5.1.8	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις Και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας .....	94
5.1.9	Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις Και Αναζήτησης Κούκου .....	96
5.2	Δεδομένα Μελετών Περίπτωσης.....	98
5.3	Αποτελέσματα .....	101
5.4	Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ με Μέθοδο Ποινής .....	129
<b>6</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΧΡΗΣΤΗ .....</b>	<b>135</b>
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>142</b>
<b>8</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>145</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α1.....</b>	<b>150</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α2.....</b>	<b>150</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Παράδειγμα λύσης σειριακού συστήματος 5 υποσυστημάτων.....	25
Σχήμα 2.2: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων μεγάλου πλήθους εξαρτημάτων.....	26
Σχήμα 2.3: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων εξαρτημάτων υψηλής αξιοπιστίας.....	26
Σχήμα 3.1: Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων.....	27
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα κατανομής εφεδρικών εξαρτημάτων 5 υποσυστημάτων, σειριακού συστήματος.....	28
Σχήμα 3.3: Σειριακό - παράλληλο σύστημα.....	33
Σχήμα 3.4: Περίπλοκο σύστημα γέφυρας.....	33
Σχήμα 3.5: Πιθανά ενδεχόμενα περίπλοκου συστήματος γέφυρα.....	34
Σχήμα 3.6: Σύστημα προστασίας υπερτάχυνσης.....	35
Σχήμα 3.7: Σύστημα γέφυρας δικτύου.....	36
Σχήμα 3.8: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος γέφυρας δικτύου.....	37
Σχήμα 3.9: Σύστημα υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας.....	38
Σχήμα 3.10: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα.....	39
Σχήμα 3.11: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.....	40
Σχήμα 3.12: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.....	43
Σχήμα 3.13: Σύστημα γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων. Πηγή: (Garg and Sharma, 2013).....	44
Σχήμα 4.1: Υβριδικό μοντέλο επίλυσης πολλαπλών στόχων προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας.....	47

## **Κατάλογος Γραφημάτων**

Γράφημα 1: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΓΑ-ΒΣΣ .	77
Γράφημα 2: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΒΣΣ....	78
Γράφημα 3: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΓΑ-ΑΠ...	80
Γράφημα 4: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΠΑ .....	81
Γράφημα 5: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΓΑ-ΑΚ...	82
Γράφημα 6: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΑΚ .....	83
Γράφημα 7: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΑΝ-ΒΣΣ.	84
Γράφημα 8: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΝ-ΒΣΣ. .	86
Γράφημα 9: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΑΝ-ΑΠ. .	87
Γράφημα 10:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΝ-ΑΠ.....	88
Γράφημα 11:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΑΝ-ΑΚ. .	90
Γράφημα 12:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΝ-ΑΚ.....	91
Γράφημα 13:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-ΒΣΣ	92
Γράφημα 14:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-ΒΣΣ	93
Γράφημα 15:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΑΚΚ-ΑΠ	95
Γράφημα 16:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΚΚ-ΑΠ..	96
Γράφημα 17:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΑΑΚ-ΑΚ	97
Γράφημα 18:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-Α.....	98
Γράφημα 19:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού συστήματος .....	114
Γράφημα 20:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού – παράλληλο συστήματος. ....	115
Γράφημα 21:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας. ....	116
Γράφημα 22:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης. ....	117
Γράφημα 23:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου. ....	118

Γράφημα 24:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα.....	119
Γράφημα 25:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας.....	120
Γράφημα 26:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων.....	121
Γράφημα 27:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων.....	122
Γράφημα 28:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων.....	123
Γράφημα 29:Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικούς μηχανισμούς διαχείρισης περιορισμών.....	133

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μαθηματική σημειογραφία μελετών περίπτωσης. ....	30
Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων αλγορίθμων. ....	76
Πίνακας 3: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΓΑ-BBΣ.....	77
Πίνακας 4: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΓΑ-BΣΣ. ....	78
Πίνακας 5: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΓΑ-AΠ.....	79
Πίνακας 6: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΓΑ-AΠ. ....	80
Πίνακας 7: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΓΑ-AΚ.....	81
Πίνακας 8: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΓΑ-AΚ. ....	83
Πίνακας 9: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AN-BΣΣ. ....	84
Πίνακας 10: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AN-BΣΣ.....	85
Πίνακας 11: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AN-AΠ. ....	86
Πίνακας 12: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AN-AΠ. ....	88
Πίνακας 13: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AN-AΚ. ....	89
Πίνακας 14: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AN-AΚ. ....	91
Πίνακας 15: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AAK-BΣΣ.....	92
Πίνακας 16: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AΚΚ-BΣΣ.....	93
Πίνακας 17: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AAK-AΠ. ....	94
Πίνακας 18: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AΚΚ-AΠ. ....	95
Πίνακας 19: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AAK-AΚ. ....	97
Πίνακας 20: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AAK-AΚ. ....	98
Πίνακας 21: Δεδομένα σειριακού και περίπλοκου συστήματος.....	99
Πίνακας 22: Δεδομένα σειριακού - παράλληλου συστήματος. ....	99
Πίνακας 23: Δεδομένα συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης. ....	99
Πίνακας 24: Δεδομένα συστήματος μεγάλης κλίμακας. ....	100
Πίνακας 25: Δεδομένα συστημάτων δομής δέκα και δεκαπέντε υποσυστημάτων.....	100
Πίνακας 26: Δεδομένα συστήματος γραμμής παραγωγή εργοστασίου φαρμάκων. ....	101
Πίνακας 27: Άνω όρια περιορισμών μελετών περίπτωσης.....	101

Πίνακας 28: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού συστήματος. ....	104
Πίνακας 29: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού -παράλληλου συστήματος. ....	105
Πίνακας 30: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας. ....	106
Πίνακας 31: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης. ....	107
Πίνακας 32: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου. ....	108
Πίνακας 33: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής διαστημικής κάψουλας. ....	108
Πίνακας 34: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας. ....	109
Πίνακας 35: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων. ....	111
Πίνακας 36: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων. ....	111
Πίνακας 37: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων. ....	112
Πίνακας 38: Τεστ Friedman αποτελεσμάτων υβριδικών σχημάτων. ....	124
Πίνακας 39: Χρόνοι και ποιότητα υβριδικών σχημάτων σε διαφορετικούς ΠΚΑΣ. ....	127
Πίνακας 40: Ποσοστιαία μεταβολή ποιότητας υβριδικών σχημάτων ως προς τον χρόνο. ....	129
Πίνακας 41: Αποτελέσματα διαφορετικών μηχανισμών διαχείρισης περιορισμών. ....	133
Πίνακας 42: Ποσοστιαία μεταβολή ποιότητας διαφορετικών μηχανισμών διαχείρισης περιορισμών ως προς τον χρόνο. ....	134

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κεντρικό παράθυρο εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη. ....	135
Εικόνα 2: Παράθυρο επιλογής βασικού υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη. ....	136
Εικόνα 3: Ξεχωριστό παράθυρο λίστας βασικών υποσυστημάτων εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.....	136
Εικόνα 4: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.....	137
Εικόνα 5: Παράθυρο ορισμού περιορισμών υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.....	138
Εικόνα 6: Παράθυρο αποτελεσμάτων ανεξάρτητων εκτελέσεων εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.....	139
Εικόνα 7: Κεντρικό παράθυρο εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη σε λειτουργία εργαστήριου.....	140
Εικόνα 8: Κεντρικό παράθυρο εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη σε σκουρόχρωμη λειτουργία.....	141
Εικόνα 9: Σκουρόχρωμης λειτουργίας ορισμού περιορισμών υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.....	141

## Κατάλογος Ψευδοκωδίκων

Ψευδοκώδικας 4.1: Γενετικός Αλγόριθμος.....	49
Ψευδοκώδικας 4.2: Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις .....	50
Ψευδοκώδικας 4.3: Αλγόριθμος της Νυχτερίδας.....	51
Ψευδοκώδικας 4.4: Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων .....	54
Ψευδοκώδικας 4.5: Αναζήτηση Κούκου .....	56
Ψευδοκώδικας 4.6: Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας.....	56
Ψευδοκώδικας 4.7: Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων .....	60
Ψευδοκώδικας 4.8: Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων με μέθοδο ποινής.....	61
Ψευδοκώδικας 4.9: Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων .....	63
Ψευδοκώδικας 4.10: Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αναζήτησης Κούκου ...	65
Ψευδοκώδικας 4.11: Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας .....	66
Ψευδοκώδικας 4.12: Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αναζήτηση Κούκου .....	68
Ψευδοκώδικας 4.13: Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας .....	70
Ψευδοκώδικας 4.14: Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και Αναζήτησης Κούκου.....	72
Ψευδοκώδικας 4.15: Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας.....	73
Ψευδοκώδικας 5.1: Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ με μέθοδο Ποινής (Penalty Guided Stochastic Fractal Search).....	132



## 1. Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη της βιομηχανίας δημιουργεί την ανάγκη για εξαιρετικά αξιόπιστα συστήματα, χωρίς να επηρεάζεται η αποτελεσματικότητά τους. Συνεπώς απαιτούνται πιο ακριβείς και αποτελεσματικές μέθοδοι για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού ενός συστήματος, όπου στόχος θα είναι η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται 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 διπλωματική 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.

Πιο συγκεκριμένα 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 πολυπλοκότητά τους είναι η επίτευξη της μέγιστης αξιοπιστίας του συστήματος, χωρίς να ξεπεραστεί η διαθεσιμότητα των πόρων κόστους, βάρους και όγκου.

Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, μεταξύ των οποίων είναι οι Πολλαπλασιαστές Lagrange μαζί με Μέθοδο Διακλάδωσης Και Οριοθέτησης (Lagrange Multipliers with Branch And Bound Method) (W. Kuo et al., 1987), ο Δυναμικός Προγραμματισμός (Y. Nakagawa and S. Miyazaki, 1981), μια Επαναληπτική Ευρετική Μέθοδος (Iterative Heuristic Method) (Xu, Kuo and Lin, 1990) και η Μέθοδος Υποκατάστασης (Surrogate Approach) (M. Hikita et al., 1992). Όμως αυτές οι μέθοδοι έχουν δημιουργηθεί για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων και αδυνατούν να επιλύσουν μη γραμμικά προβλήματα πολλών μεταβλητών απόφασης με

πολλαπλούς περιορισμούς σε πρακτικό χρόνο. Επομένως για την επίλυση αυτών των πολύπλοκων προβλημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι Τεχνητής Νοημοσύνης και ειδικότερα Νοήμονες Εξελικτικές Μεθόδους (Computational Intelligent Methods).

## 1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη

Ο όρος Τεχνητή Νοημοσύνη καθιερώθηκε από τους McCarthy et al. το (1955) και αναφέρεται στον προγραμματισμό των μηχανών ώστε να αναπαράγουν 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 της μηχανικής, εμφανίστηκε μια νέα κατηγορία μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης που ονομάζεται Υπολογιστική Νοημοσύνη (Computational Intelligence) (Konar, 2005).

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. Με την ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης, έκαναν την εμφάνισή τους οι ευρετικές (heuristic) μέθοδοι, οι οποίες βασίζόμενες σε ευρετικούς κανόνων αναζητούν τη βέλτιστη λύση σε μικρότερο μέρος του χώρου λύσεων. Ωστόσο, οι ευρετικές μέθοδοι δεν απέφεραν λύσεις υψηλής ποιότητας με αποτέλεσμα να κάνουν την εμφάνισή τους οι μετα-ευρετικές μέθοδοι κατά τις οποίες η λύση μεταβάλλεται στην διάρκεια της αλγοριθμικής διαδικασίας, βασισμένη σε κάποια πληροφορία. Η άντληση της πληροφορίας μέσω νοημοσύνης (intelligence) αποτέλεσε την αρχή των μεθόδων Εξελικτικού Προγραμματισμού (Evolutionary Computing).

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).

## **1.2 Νοήμονες Εξελικτικές Μέθοδοι**

Όπως αναφέρεται παραπάνω, ο Εξελικτικός Προγραμματισμός προορίζεται να επιλύσει (κυρίως) προβλήματα βελτιστοποίησης. Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων υπάρχουν ακριβείς αλγόριθμοι (exact algorithms) που βρίσκουν την ακριβή λύση ενός προβλήματος, όμως οι περισσότεροι εξ αυτών αδυνατούν να φέρουν εις πέρας αυτό το στόχο σε πεπερασμένο χρόνο όταν αντιμετωπίζουν προβλήματα μεγαλύτερης δυσκολίας. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό, προτάθηκαν οι ευρετικοί (heuristics) αλγόριθμοι, οι οποίοι μέσω εμπειρικών κανόνων αναζητούν λιγότερες πιθανές λύσεις. Ωστόσο οι ευρετικοί αλγόριθμοι αδυνατούν να επιφέρουν λύσεις υψηλής ποιότητας (high quality solutions) με αποτέλεσμα να κάνουν την εμφάνισή τους οι μετα – ευρετικοί (meta - heuristics) αλγόριθμοι, κατά τους οποίους η λύση μεταβάλλεται κατά την πορεία της αλγοριθμικής διαδικασίας βασιζόμενη σε κάποια πληροφορία (Garg, 2015b).

Αργότερα, η πληροφορία αυτή άρχισε να αντλείται μέσω νοημοσύνης (intelligence) (Fogel, Owens and Walsh, 1966), οι μέθοδοι αυτές, βασιζόμενες στην θεωρία της εξέλιξης, ονομάζονται νοήμονες εξελικτικές μέθοδοι και αποτελούν τεχνικές του Εξελικτικού Προγραμματισμού. 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).

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 (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.

### 1.3 Αξιοπιστία Τεχνολογικών Συστημάτων

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 (Bigolini, 2010). Η αξιοπιστία είναι ένα μέτρο απόδοσης το οποίο εκφράζει την πιθανότητα ένα δεδομένο σύστημα λειτουργήσει χωρίς αστοχία για ένα καθορισμένο χρόνο λειτουργίας, αποτελεί μια παράμετρο απόδοσης που πρέπει να ληφθεί υπόψιν 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, εδώ και πολύ καιρό υπήρξε σημαντικό θέμα στη μηχανική αξιοπιστίας (reliability engineering). Από το 1960, πολλές δημοσιεύσεις έχουν αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας διαφορετικές δομές συστήματος, μέτρα απόδοσης και τεχνικές βελτιστοποίησης για 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 βελτιστοποίηση.

#### **1.4 Παραδοχές**

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. Προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας, πριν αυτό μοντελοποιηθεί, έγινε η υπόθεση ότι οι 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 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 2.1 Εξελικτικός Προγραμματισμός σε προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας παρουσιάζουν αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον τον τελευταίο καιρό, 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) (Wu et al., 2011; Coelho, 2009; D. Zou et al., 2010; Ravikumar Pandi and B. K., 2008; Zhang et al., 2013), στην τεχνική της Τεχνητής Αποικία 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 (Afonso, Mariani and dos Santos Coelho, 2013; Ouyang et al., 2015; Wang and Li, 2012).

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 αντιμετωπιστούν 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 χειριστή 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 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, 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.

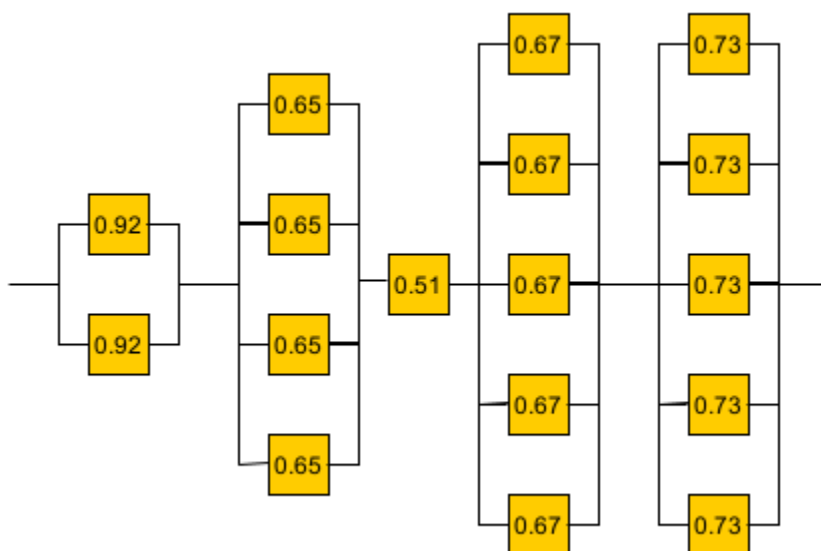
Το Σχήμα 2.1 αναπαριστά ένα σύστημα που αποτελείται από 5 υποσυστήματα συνδεδεμένα σε σειρά, όπου φαίνεται ένα παράδειγμα λύσης. Η λύση αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί από το διάνυσμα  $[\vec{r}; \vec{n}] = [0.92, 0.65, 0.51, 0.67, 0.73; 2, 4, 1, 5, 5]$ , το οποίο προέρχεται από την συμπτυξη των δύο παραπάνω 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. 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 ξεπερνούσαν η διαθεσιμότητα 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. 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 ξεπερνούσαν η διαθεσιμότητα 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.

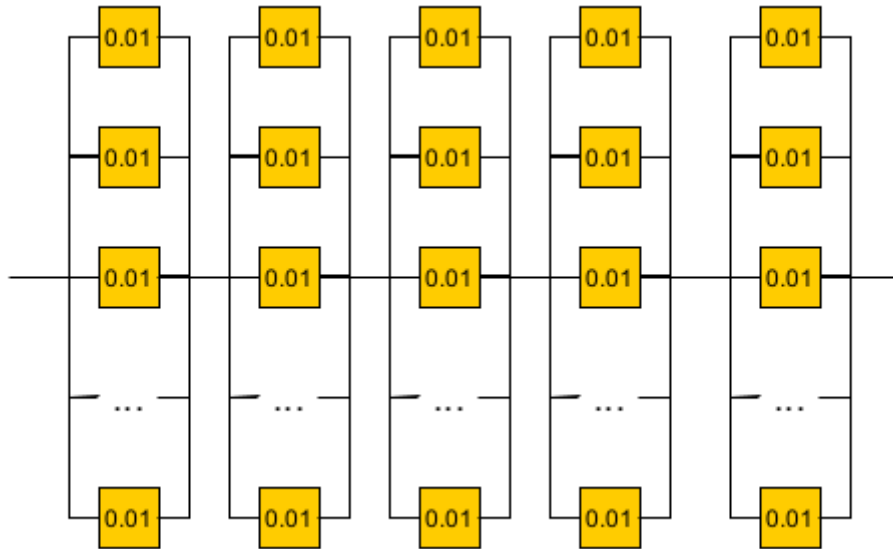
Όπως περιγράφεται από τον Chern (1992) τα προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας (ακόμη και το πιο απλό, όπως το σειριακό σύστημα) απαιτούν αρκετό χρόνο και υπολογιστική ισχύ κατά την επίλυση τους. Η δυσκολία και απαίτηση αυτών των πόρων ορίζεται ως πολυπλοκότητα χρόνου και συγκεκριμένα τα προβλήματα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



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα λύσης σειριακού συστήματος 5 υποσυστημάτων

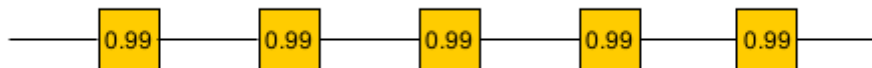
Πολλές κλασικές μέθοδοι όπως οι πολλαπλασιαστές Lagrange μαζί με Μέθοδο Διακλάδωσης Και Οριοθέτησης (Lagrange Multipliers with Branch And Bound Method) (W. Kuo et al., 1987) και ο Δυναμικός Προγραμματισμός (Y. Nakagawa and S. Miyazaki, 1981) έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία για την επίλυση προβλημάτων 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.

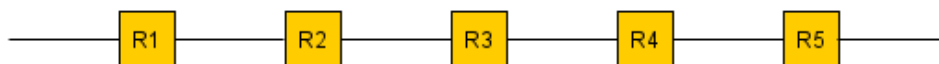


**Σχήμα 2.3:** Σειριακό σύστημα 5 υποσυστημάτων εξαρτημάτων υψηλής αξιοπιστίας

### 3 Προβλήματα 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 παραλληλία 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 3.1.



Σχήμα 3.1: 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):

$$\text{Maximize } R_s(r) = R_s(r_1, r_2, \dots, r_m) \quad (3.1)$$

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 3.2. 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):

$$\text{Maximize } R_s(n) = R_s(n_1, n_2, \dots, n_m) \quad (3.2)$$

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 ιδίων εξαρτημάτων σε κάθε υποσύστημα του συστήματος. Περιγράφεται από την παρακάτω σχέση (Mellal and Zio, 2016):

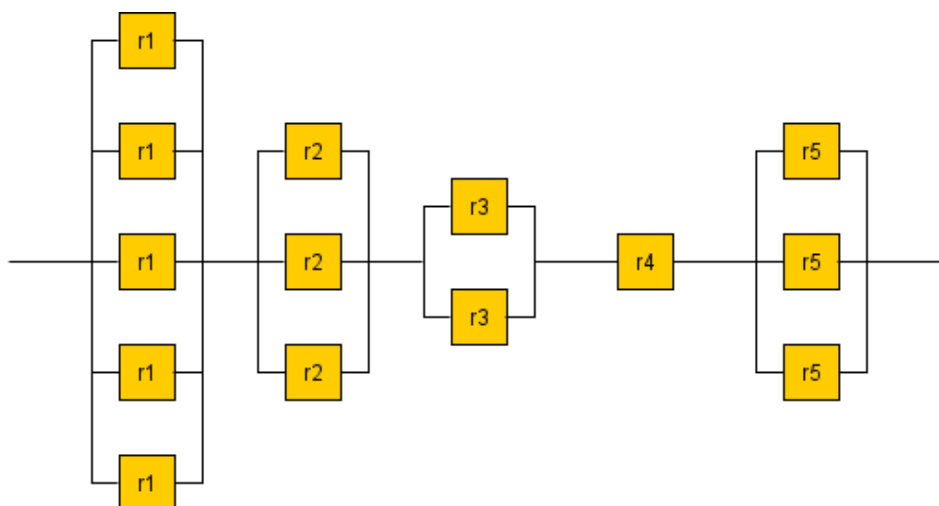
$$\text{Maximize } R_s(r, n) = R_s(r_1, r_2, \dots, r_m; n_1, n_2, \dots, n_m) \quad (3.3)$$

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 (3.4), (3.5) και (3.6).

$$g_j(r_1, r_2, \dots, r_m; n_1, n_2, \dots, n_m) \leq b \quad (3.4)$$

$$0 \leq r_i \leq 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \quad (3.5)$$

$$1 \leq n_i \leq n_{i,max} \quad (3.6)$$



**Σχήμα 3.2:** Παράδειγμα κατανομής εφεδρικών εξαρτημάτων 5 υποσυστημάτων, σειριακού συστήματος.

Για παράδειγμα, το Σχήμα 3.2 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 (3.7). Ωστόσο, προκειμένου να θεωρεί εφικτή (αποδεκτή) η υποψήφια λύση απαιτείται να μην παραβιάζεται κανένας από τους περιορισμούς  $g_j(r, n)$ .

$$R_s(r, n) = \prod_{i=1}^m R_i(r, n) \quad (3.7)$$

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:

$$R_i(r, n) = 1 - (1 - r_i)^{n_i} \quad (3.8)$$

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

$$R_s(r, n) = \prod_{i=1}^m [1 - R_i(r, n)] \quad (3.9)$$

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 (Yokota et al., 1996; Dhingra, 1992) 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, $1 \leq i \leq m$
$\alpha_i, \beta_i$	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.

### 3.1 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 3.1. Το κάθε υποσύστημα  $i$  αποτελείται από  $n_i$  εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας  $r_i$  σε παραλληλία, όπως το παράδειγμα του συστήματος στο Σχήμα 3.2.

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 (3.10) για  $m = 5$ , όσο και το πλήθος των υποσυστημάτων, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^m [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (3.10)$$

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:

$$g_1(n) = \sum_{i=1}^m v_i \cdot n_i^2 \leq V \quad (3.11)$$

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:

$$g_2(r, n) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot (-T/\ln r_i)^{\beta_i} \cdot [n_i + \exp(n_i/4)] \leq C \quad (3.12)$$

όπου  $\alpha_i \cdot (-T/\ln r_i)^{\beta_i}$  συμβολίζεται το κόστος του εξαρτήματος αξιοπιστίας  $r_i$  του  $i$ -οστού υποσυστήματος. Οι παράμετροι  $\beta_i$  και  $\alpha_i$  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:

$$g_3(n) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot n_i \cdot \exp(n_i/4) \leq W \quad (3.13)$$

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.

Άξιο 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.

$$0.5 \leq r_i \leq 1 \quad , \quad 1 \leq n_i \leq 5 \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, 5 \quad (3.14)$$

### 3.2 Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος

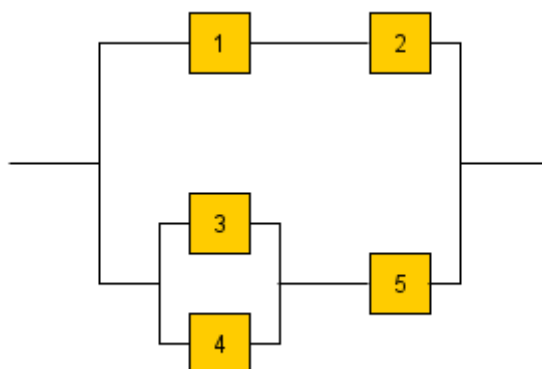
Το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας της περίπτωσης του σειριακού παράλληλου συστήματος (Series – Parallel Problem) (Hsieh, Chen and Bricker, 1998; M. Hikita et al., 1992; Chen, 2006; Hsieh and You, 2011; Mellal and Zio, 2016) αποτελείται από 5 υποσυστήματα συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Το κάθε υποσύστημα  $i$  αποτελείται από  $n_i$  εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας  $r_i$  σε παραλληλία, όπως το παράδειγμα του συστήματος στο Σχήμα 3.2.

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 3.2), ακολουθώντας την σχέση (3.7) για τα υποσυστήματα που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και την (3.9) για εκείνα που είναι σε παραλληλία.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } R_S(r, n) \\ & = 1 - (1 - R_1 R_2) \cdot [1 - (R_3 + R_4 - R_3 R_4) R_5] \end{aligned} \quad (3.15)$$



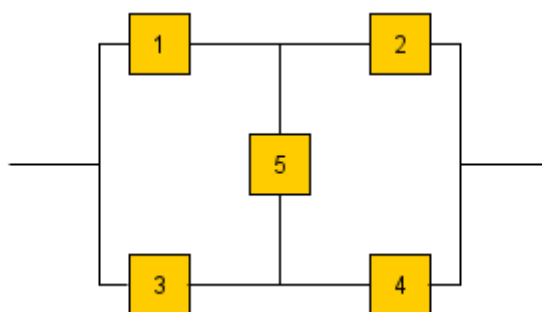
όπου  $R_i$  η αξιοπιστία του  $i$ -οστού υποσυστήματος που υπολογίζεται από την σχέση  $R_i = 1 - (1 - r_i)^{n_i}$ , όπου  $n_i$  τα εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας  $r_i$  σε παραλληλία.



Σχήμα 3.3: Σειριακό - παράλληλο σύστημα.

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (3.11), (3.12), (3.13) και (3.14) για  $m = 5$ .

### 3.3 Μελέτη Περίπτωσης Περίπλοκου Συστήματος Γέφυρας



Σχήμα 3.4: Περίπλοκο σύστημα γέφυρας.

Η μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας (Complex Bridge System) (Garg, 2015b; M. Hikita et al., 1992; Coelho, 2009; Valian et al., 2013; Garg, 2015b; Garg, Rani and Sharma, 2013; Mellal and Zio, 2016) απαρτίζει ένα πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας και αποτελείται από 5 συνδεδεμένα υποσυστήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Το κάθε υποσύστημα  $i$  αποτελείται από  $n_i$  εφεδρικά εξαρτήματα ίσης αξιοπιστίας  $r_i$  σε παραλληλία, όπως το παράδειγμα του συστήματος στο Σχήμα 3.2.

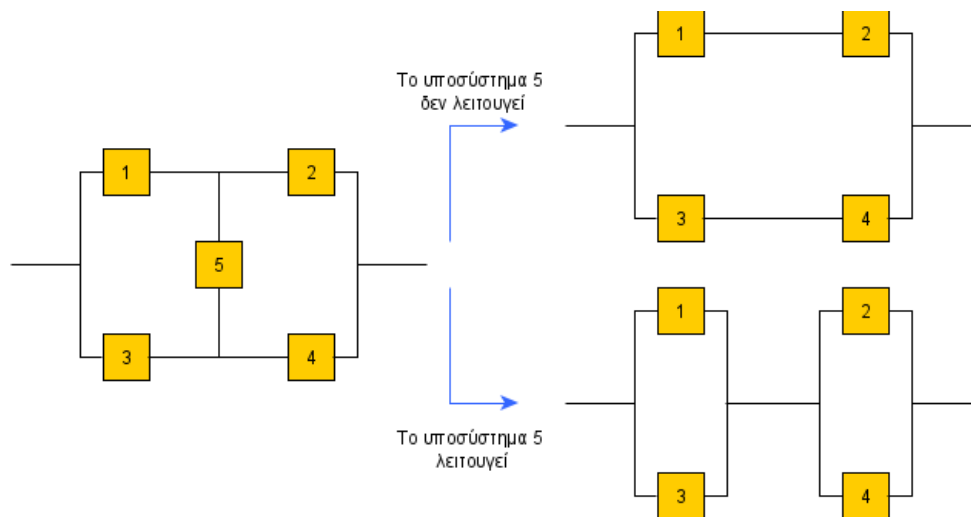
Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης  $[r, n]$  που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία  $R_s(r, n)$  του συστήματος. Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος είναι το υποσύστημα 5 όπου ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται, δηλαδή αν λειτουργεί ή όχι, αλλάζει η δομή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

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:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } R_s(r, n) = & R_5[1 - (1 - R_1)(1 - R_3)] \\
 & \times [1 - (1 - R_2)(1 - R_4)] \\
 & + (1 - R_5)[1 - (1 - R_1R_2)(1 \\
 & \quad - R_3R_4)]
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

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.

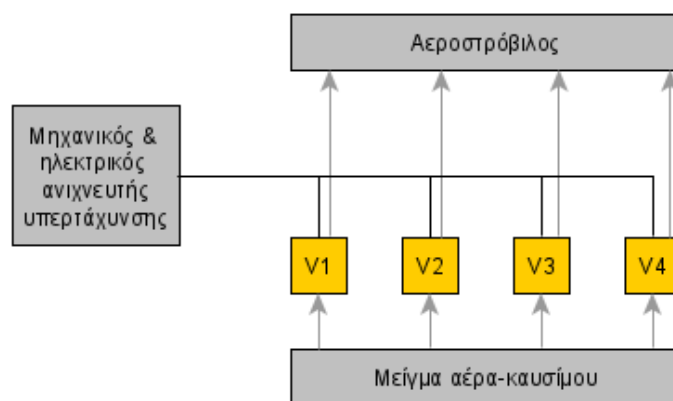


**Σχήμα 3.5:** Πιθανά ενδεχόμενα περίπλοκου συστήματος γέφυρα.

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (3.11), (3.12), (3.13) και (3.14) για  $m = 5$ .

### 3.4 Μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης

Μια ακόμη μελέτη κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας είναι αυτή του συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης<sup>1</sup> (Overspeed Protection System), (Valian et al., 2013; Coelho, 2009; Hsieh and You, 2011; Garg, Rani and Sharma, 2013; Zhang et al., 2013; Mellal and Zio, 2016) και αποτελεί ένα σειριακό σύστημα προστασίας, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 3.6. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από τέσσερις συνδεδεμένα σειριακά 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 3.6: Σύστημα προστασίας υπερτάχυνσης.

Η εν λόγω μελέτη περίπτωσης αποτελεί υποκατηγορία της 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 (3.11). Όσον αφορά τον περιορισμό (3.12), διαφέρουν οι συντελεστές διαμόρφωσης  $\beta_i$  (shaping factor) και κλίμακας  $a_i$  (scaling factor) κάθε εξαρτήματος του  $i$ -οστού υποσυστήματος και το ανώτερο όριο του κόστους  $C$ . Τέλος στον περιορισμό (3.13), 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:

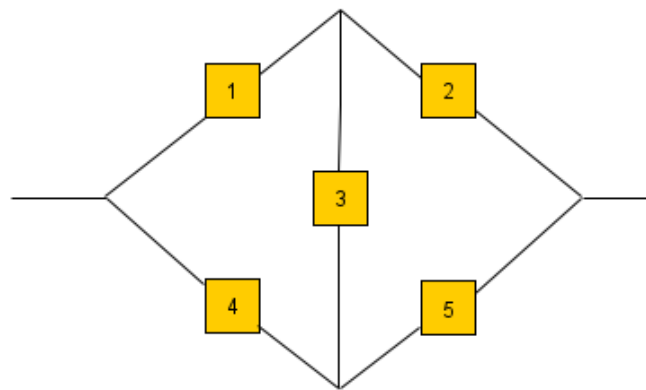
<sup>1</sup> Η υιοθέτηση του όρου «υπερτάχυνση» έχει γίνει από την διπλωματική εργασία του Σκαρλατάκης (2006).

$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^4 [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (3.17)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (3.11), (3.12) και (3.13) 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.

$$0.5 \leq r_i \leq 1, 1 \leq n_i \leq 10 \text{ για } i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.18)$$

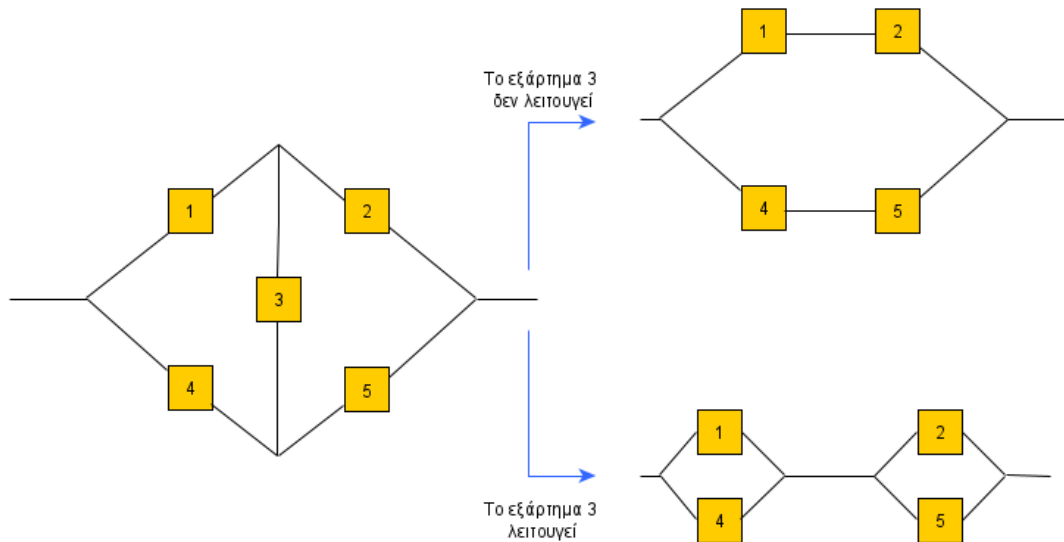
### 3.5 Μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου



Σχήμα 3.7: Σύστημα γέφυρας δικτύου.

Ένα από τα προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας αποτελεί η μελέτη περίπτωσης ενός συστήματος γέφυρας δικτύου (Complex Bridge Network System) (Ravi, Reddy and Zimmermann, 2000; Garg, Rani and Sharma, 2013; V. Ravi, B. S. N. Murty, and J. Reddy, 1997; Mellal and Zio, 2016), το οποίο αποτελείται από 5 εξαρτήματα συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

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 3.8. 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 (3.7).



Σχήμα 3.8: 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:

$$\begin{aligned}
 R_s(r) = & r_1 r_4 + r_3 r_5 + r_1 r_3 r_5 + 2r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 - r_2 r_3 r_4 r_5 - r_1 r_3 r_4 r_5 \\
 & - r_1 r_2 r_4 r_5 \\
 & - r_1 r_2 r_4 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_5 - r_1 r_2 r_3 r_4
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

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:

$$\text{Minimize } C_s(r) = \sum_{i=1}^5 a_i \exp\left(\frac{b_i}{1-r_i}\right) \tag{3.20}$$

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

$$0.99 \leq R_s \leq 1 \tag{3.21}$$

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  $i$ .

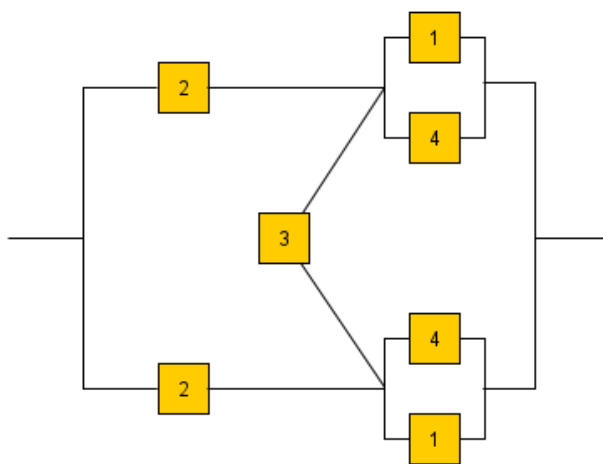
$$a_i = 1, b_i = 0.0003, \forall i \quad (3.22)$$

$$r_i \in [0,1] \subset R^+ \quad (3.23)$$

### 3.6 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 3.9.

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 3.10. 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 (3.7).



Σχήμα 3.9: 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:

$$R_s(r) = 1 - r_3[(1 - r_1)(1 - r_4)]^2 - (1 - r_3)[1 - r_2(1 - (1 - r_1)(1 - r_4))]^2 \quad (3.24)$$

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:

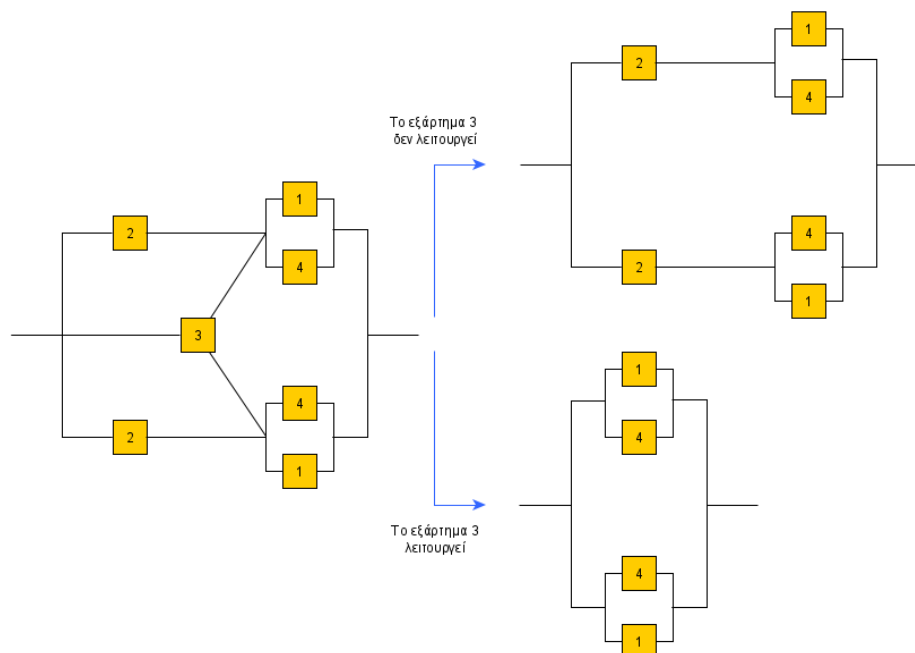
$$\text{Minimize } C_s(r) = \sum_{i=1}^4 K_i \left[ \tan\left(\frac{\pi}{2} r_i\right) \right]^{a_i} \quad (3.25)$$

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 (3.21).

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  $i$ .

$$a_i = 1, \forall i \quad (3.26)$$



Σχήμα 3.10: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα.

### 3.7 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 3.1.

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:

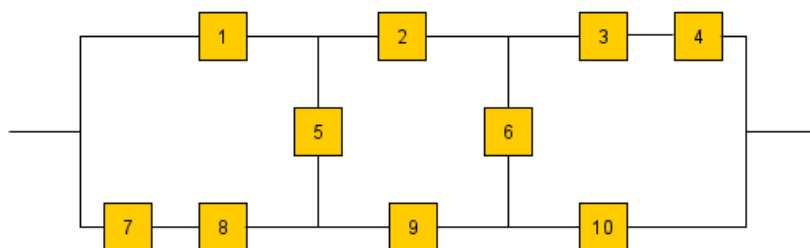
$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^{20} [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (3.27)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς της μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις από τις σχέσεις (3.11), (3.12) και (3.13) 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.

$$0.5 \leq r_i \leq 1, 1 \leq n_i \leq 10 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 20 \quad (3.28)$$

### 3.8 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 3.11.



Σχήμα 3.11: 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 (3.7).

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:



$$\begin{aligned}
\text{Maximize } R_s(n) = & R_1 R_2 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_6 R_{10} (1 - R_3 + R_3 (1 - R_4)) + R_1 R_5 R_9 R_{10} \\
& \times (1 - R_2 + R_2 (1 - R_3) (1 - R_6) + R_2 R_3 (1 - R_4) (1 - R_6)) \\
& + R_7 R_8 R_9 R_{10} ((1 - R_1 + R_1 (1 - R_2) (1 - R_5)) \\
& + R_1 R_2 (1 - R_3) (1 - R_5) (1 - R_6)) \\
& + R_1 R_2 R_3 (1 - R_5) (1 - R_6) (1 - R_4)) \\
& + (R_2 R_3 R_4 R_5 R_7 R_8 (1 - R_1) (1 - R_9 + R_9 (1 - R_{10}))) \\
& + (1 - R_1) R_3 R_4 R_6 R_7 R_8 R_9 (1 - R_{10}) (1 - R_2 + R_2 (1 - R_5)) \\
& + R_1 (1 - R_2) R_3 R_4 R_6 R_7 R_8 R_9 (1 - R_{10})
\end{aligned} \tag{3.29}$$

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:

$$g_y(n) = \sum_{i=1}^{10} c_{yi} \cdot n_i \leq b_y, y = 1, 2, \dots, M \tag{3.30}$$

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:

$$n_i \geq 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 10 \tag{3.31}$$

### 3.9 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 3.12.

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 (3.7).

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } R_s(n) &= R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 \\
 &+ R_9 R_{10} R_{11} R_{12} R_{13} R_{14} R_{15} \times ((1 - R_1) + R_1(1 - R_2) + R_1 R_2(1 - R_3) \\
 &+ R_1 R_2 R_3(1 - R_4) + R_1 R_2 R_3 R_4(1 - R_5) + R_1 R_2 R_3 R_4 R_5(1 - R_6)) \\
 &+ R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_9 R_{10} \\
 &\times (1 - R_{11} + R_{11}(1 - R_{12}) + R_{11} R_{12}(1 - R_{13}) + R_{11} R_{12} R_{13}(1 - R_{14}) \\
 &+ R_{11} R_{12} R_{13} R_{14}(1 - R_{15}) \times (1 - R_1 + R_1(1 - R_2)) \\
 &+ ((1 - R_1 + R_1(1 - R_2))((1 - R_3) + R_3(1 - R_4) + R_3 R_4(1 - R_7)) \\
 &+ R_1 R_2(1 - R_7)(1 - R_3 + R_3(1 - R_4)) \times (1 - R_{13} + R_{13}(1 - R_{14}) \\
 &+ R_{13} R_{14}(1 - R_{15}) \times R_5 R_6 R_7 R_8 R_9 R_{10} R_{11} R_{12} + R_1 R_2 R_5 R_6 R_7 R_8 R_{11} R_{12} \\
 &\times (R_9 R_{10} + (1 - R_9) + R_9(1 - R_{10})) \\
 &\times (1 - R_3 + R_3(1 - R_4))(1 - R_{13} + R_{13}(1 - R_{14}) + R_{13} R_{14}(1 - R_{15})) \\
 &+ (1 - R_5 + R_5(1 - R_6)) \times ((1 - R_7 + R_7(1 - R_{11}) + R_7 R_{11}(1 - R_{12})) \\
 &\times (1 - R_9 + R_9(1 - R_{10})) + R_9 R_{10}(1 - R_{11} + R_{11}(1 - R_{12})) \\
 &\times R_1 R_2 R_3 R_4 R_8 R_{13} R_{14} R_{15} \\
 &+ R_1 R_2 R_7 R_{11} R_{12} R_{13} R_{14} R_{15}(1 - R_9 + R_9(1 - R_{10})) \\
 &\quad \times (1 - R_3 + R_3(1 - R_4) + R_4 R_4(1 - R_5) + R_3 R_4 R_5(1 - R_6)) \\
 &+ R_3 R_4 R_7 R_8 R_9 R_{10} R_{13} R_{14} R_{15}(1 - R_1 + R_1(1 - R_2)) \\
 &\times (1 - R_{11} + R_{11}(1 - R_{12}))(1 - R_5 + R_5(1 - R_6))
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

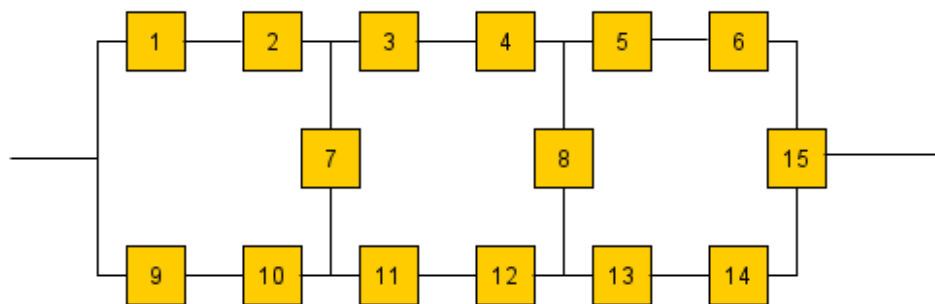
Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί το διάνυσμα της λύσης  $[r, n]$  που θα μεγιστοποιεί την συνολική αξιοπιστία  $R_s(r, n)$  του συστήματος και υπολογίζεται με το θεώρημα ολικής πιθανότητας, δηλαδή το άθροισμα της αξιοπιστίας κάθε ενδεχομένου επί την πιθανότητα του αντίστοιχου ενδεχομένου. Η συνάρτηση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

(3.32), 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:

$$g_y(n) = \sum_{i=1}^{15} c_{yi} \cdot n_i \leq b_y, y = 1, 2, \dots, M \quad (3.33)$$

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 3.12: Σύστημα δομής δέκα υποσυστημάτων.

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

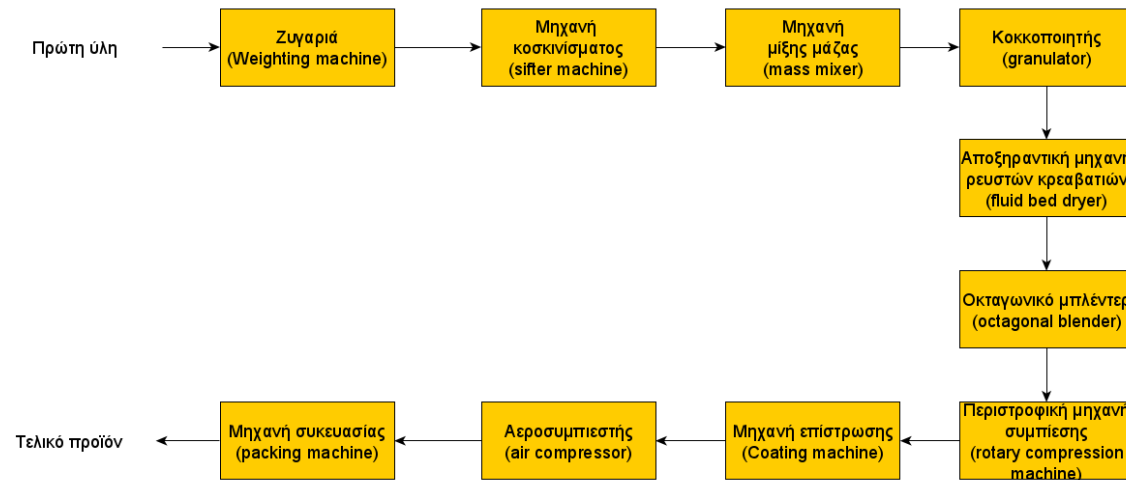
$$n_i \geq 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 10 \quad (3.34)$$

### 3.10 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 3.13.

Η εν λόγω μελέτη περίπτωσης αποτελεί μια ακόμη υποκατηγορία της Μελέτη 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 3.13:** 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 (3.7) για  $m = 10$ , όσο και το πλήθος των υποσυστημάτων:

$$\text{Maximize } R_s(r, n) = \prod_{i=1}^{10} [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad (3.35)$$

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι κοινοί με αυτούς τις μελέτης περίπτωσης του σειριακού συστήματος και εκφράζονται από τις σχέσεις (3.11), (3.12) και (3.13) 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.

$$0.5 \leq r_i \leq 1 - 10^{-6}, 1 \leq n_i \leq 5 \text{ για } i = 1, 2, \dots, 10 \quad (3.36)$$

## 4 Νοήμονες Εξελικτικές 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 (3.3) του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, το υπό μελέτη πρόβλημα αποτελείται από μεταβλητές απόφασης που αντιπροσωπεύουν την κατανομή της εφεδρείας και περιγράφονται από την σχέση:

$$n = [n_1, n_2, \dots, n_m] \quad (4.1)$$

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:

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_m] \quad (4.2)$$

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 βασισμένοι 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:

$$x_{pop} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \dots & x_{sm} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

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, βασισμένη 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:

$$x_{initial}^d = lower\_bound^d + (upper\_bound^d - lower\_bound^d) \cdot rand(0,1) \quad (4.4)$$

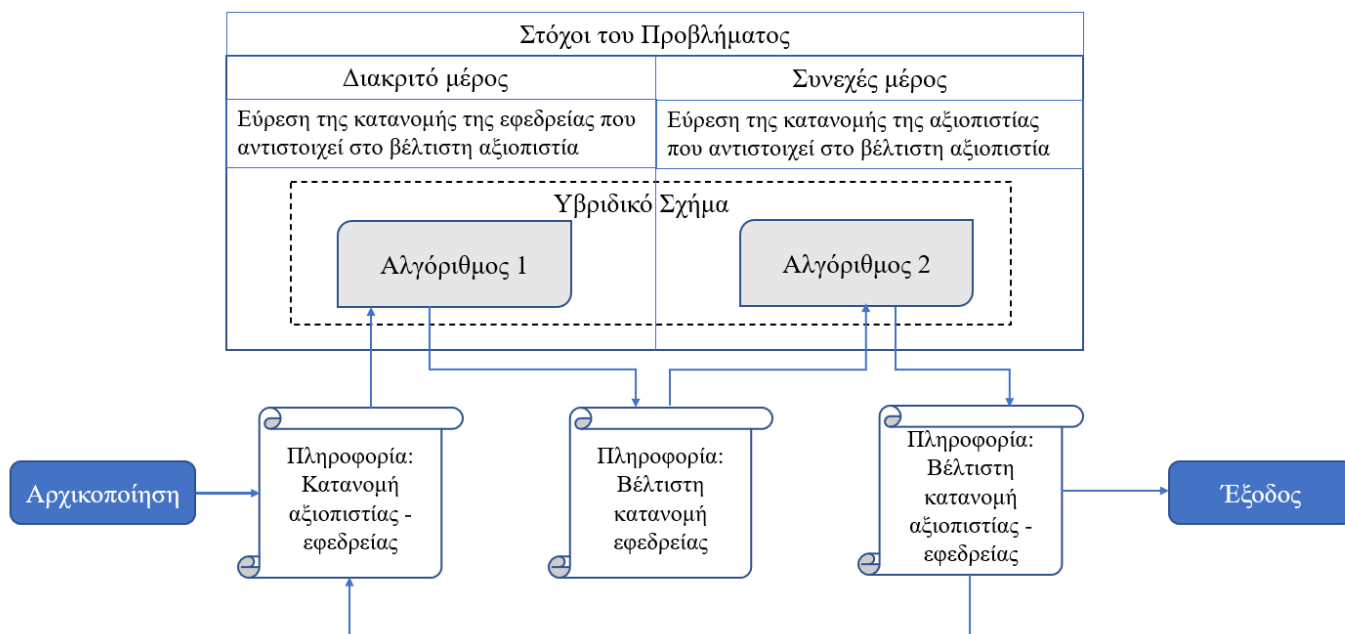
όπου  $rand$  είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα  $[0,1]$ ,  $lower\_bound^d$  και  $upper\_bound^d$  είναι το κάτω και άνω όριο για κάθε μεταβλητή απόφασης  $d$ . Αντίθετα, αν κάποια μεταβλητή απόφασης λαμβάνει διακριτές τιμές, η αρχική τιμή της μπορεί να ερμηνευθεί ως ακολούθως:

$$x_{initial}^d = randi(lower\_bound^d, upper\_bound^d) \quad (4.5)$$

όπου  $randi$  είναι ένας τυχαίος ακέραιος αριθμός στο διάστημα  $(lower\_bound^d, upper\_bound^d)$  για κάθε μεταβλητή απόφασης  $d$ .

#### **4.1 Γενικό μοντέλο υβριδικών σχημάτων προσέγγισης 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 4.1, 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 πλέον έχοντας διαθέσιμη την πληροφορία για την συνολική αξιοπιστία του συστήματος προτείνει ένα νέο διάνυσμα  $n$  και συνεχίζει την επαναληπτική διαδικασία.



**Σχήμα 4.1:** Υβριδικό μοντέλο επίλυσης πολλαπλών στόχων προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας.

## 4.2 Εξεταζόμενες Μέθοδοι

Μεταξύ των προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας εξετάστηκαν μελέτες περίπτωσης που περιλαμβάνουν το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστία, κατανομής εφεδρείας και κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας, εκ των οποίων οι μεταβλητές απόφασης αφορούν χώρο συνεχούς, διακριτού και μικτού, αντίστοιχα.

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 4.1), για την προσέγγιση του στόχου κατανομής εφεδρείας (Αλγόριθμος 1 στο Σχήμα 4.1) 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 4.1. Αντίστοιχα για την προσέγγιση του στόχου κατανομής εφεδρείας (Αλγόριθμος

2 στο Σχήμα 4.1) 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.

#### 4.2.1 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 υποψήφιας 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	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$x_{i1}$	...	$x'_{i'r}$	...	$x_{ik-1}$	$x_{ik}$
----------	----------	----------	----------	-----	------------	-----	------------	----------

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 4.1: 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 Ψευδοκώδικα 4.1.

#### 4.2.2 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 4.2: 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

αλγόριθμου. 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 υποψήφιας 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 4.2.

### 4.2.3 Αλγόριθμος της Νυχτερίδας

---

#### Ψευδοκώδικας 4.3: 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 (4.9)
  - 10:             Ενημέρωση της θέσης βάσει της (4.8)
  - 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 (4.10) και έντασης (4.11)
  - 20:         **Τέλος**
  - 21:         Ενημέρωση χρόνου  $t = t + 1$
  - 22:         **Τέλος**
  - 23:     **Τέλος**
- 

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  $t$ .

$$v_{ij}^t = v_{ij}^{t-1} + (x_{ij}^{t-1} - x_*(j)) \cdot f_i \quad (4.6)$$

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:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot \beta \quad (4.7)$$

όπου, με  $\beta$  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 βασισμένη από το μέγεθος του προβλήματος (Yang, 2010).

Το διάνυσμα των αναζητητών (agents) περιγράφεται από τη σχέση (4.1) 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:

$$x_{ij}^t = x_*(j) + k \quad (4.8)$$

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  $j$ -οστής διάστασης. Σύμφωνα με τους (Talafuse and Pohl, 2016) η νέα θέση της νυχτερίδας ενημερώνεται από τη σχέση (4.8) όταν ικανοποιείται το κριτήριο:

$$\rho < \left| \frac{\pi}{2} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot v_{ij}^t \right| \quad (4.9)$$

όπου  $\rho$  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  $x_*(j)$ .

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (4.10)$$

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,  $\alpha$  ο ρυθμός μείωσης της έντασης και  $\gamma$  η παράμετρος μείωσης του ρυθμού εκπομπής των παλμών.

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t \quad (4.11)$$

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 (4.10) και (4.11), ώσπου να βρεθεί μια εφικτή θέση από το σημείο του χώρου στο οποίο βρίσκονται. Ο Αλγόριθμος της Νυχτερίδας μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 4.3.

#### 4.2.4 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 (4.2). Τα σωματίδια αποτελούν τον πληθυσμό ή σμήνος (4.3) και η θέση τους, που αποτελεί το διάνυσμα της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων του συστήματος, περιγράφεται από την σχέση:

$$s_k = [r_k^1, r_k^2, \dots, r_k^m] \quad (4.12)$$

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).

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

$$v_{k+1}^i = c_1 \cdot rand_1 \cdot (x_{pbest}^i - x_k^i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (x_{gbest} - x_k^i) \quad (4.13)$$

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 4.4.

---

#### Ψευδοκώδικας 4.4: 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**
- 

#### 4.2.5 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 υποψήφιας 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 (4.2). 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.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \cdot L(s, \lambda) \quad (4.14)$$

όπου ως  $\alpha$  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.

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \cdot \Gamma(\lambda) \cdot \sin(\pi \cdot \lambda/2)}{\pi} \cdot \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (4.15)$$

όπου με  $s$  συμβολίζεται το μέγεθος του βήματος (step size) και  $\lambda$  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.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \cdot s \otimes H(p_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (4.16)$$

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  $\epsilon$  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 4.5.

---

#### Ψευδοκώδικας 4.5: 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 (4.15)
  - 8:         Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τοπικό τυχαίο περίπατο (4.16), εάν ανακαλυφθεί το αυγό  $H(p_a - \epsilon) = 1$
  - 9:     **Τέλος**
  - 10: **Τέλος**
- 

#### 4.2.6 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 4.6: 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 (4.17)
  - 10:            Υπολογισμός της νέας θέσης πυγολαμπίδας (4.18)
  - 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 (4.2).

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:

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (4.17)$$

όπου με  $\beta_0$  συμβολίζεται η ελκυστικότητα όταν η απόσταση είναι μηδενική ( $r = 0$ ) και  $\gamma$  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 βάσει την παρακάτω εξίσωση:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r_{ij}^2} \cdot (x_j^t - x_i^t) + a_t \cdot \epsilon_i^t \quad (4.18)$$

όπου ο δεύτερος όρος της (4.18) εκφράζει την ελκυστικότητα μεταξύ των δύο πυγολαμπίδων, ενώ ο τρίτος εκφράζει την τυχαιότητα στην κίνηση με  $\epsilon_i^t$  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  $\delta$  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 4.6.

### 4.3 Διαχείριση Περιορισμών (Constrain 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 (3.11), (3.12) και (3.13), με συνέπεια να αυξάνεται η πολυπλοκότητα του.

Προκειμένου να διαχειριστούμε προβλήματα που περιγράφονται από περιορισμούς, χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως αυτές που αναφέρει ο (Yang, 2014a). Συγκεκριμένα, για μη γραμμικούς περιορισμούς η πιο συνήθης μέθοδος είναι αυτή της ποινής (penalty method), όπου το πρόβλημα (3.3) που περιγράφεται από περιορισμούς (3.4) μετατρέπεται σε πρόβλημα κατά το οποίο οι περιορισμοί συμπεριλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση.

$$R'_s(r, n) = R_s(r, n) \cdot P(r, n) \quad (4.19)$$

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.

#### 4.4 Μηχανισμός Επανατοποθέτησης Στον Χώρο Λύσεων

Αρκετές φορές κατά την μετακίνηση στον χώρο λύσεων οι αναζητητές τυχαίνει να κατευθυνθούν εκτός του πεδίου ορισμού σε μια ή περισσότερες διαστάσεις. Συνεπώς απαιτείται ένας μηχανισμός κατά τον οποίο οι εξεταζόμενοι αναζητητές επανατοποθετούνται εντός του πεδίου ορισμού που καθορίζει το υπό μελέτη πρόβλημα.

Η επανατοποθετημένη μεταβλητή απόφασης  $x_i^d$  του  $i$ -οστού αναζητητή στην  $d$ -οστή διάσταση υπολογίζεται από την σχέση (Tzanetos and Dounias, 2020):

$$x_i^d = lb^d + (ub^d - lb^d) \cdot \cos^2(x_i^d) \quad (4.20)$$

όπου ως  $lb^d$  συμβολίζεται το κάτω όριο και  $ub^d$  το άνω όριο του πεδίου ορισμού της μεταβλητής απόφασης της  $d$ -οστής διάστασης.

Ο παραπάνω μηχανισμός χρησιμοποιείται στο τέλος κάθε επανάληψης της αλγοριθμικής διαδικασίας των μεθόδων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η λογική που χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος μηχανισμός έναντι κάποιου άλλου είναι πως μια τυχαία επανατοποθέτηση στον χώρο λύσεων αυξάνει την ποικιλομορφία των υποψήφιων λύσεων με αποτέλεσμα την αναζήτηση περισσότερων περιοχών του χώρου λύσεων και αποφυγή της πρόωρης σύγκλισης (Tzanetos and Dounias, 2020).

## 4.5 Νοήμονα Υβριδικά Σχήματα

### 4.5.1 Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (AAK-BSS)

Η πρώτη περίπτωση υβριδικού σχήματος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος αποτελείται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Hybrid Tabu Search with Particle Swarm Optimization) το οποίο μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 4.7.

Το διάνυσμα της λύσης της Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search) που αντιπροσωπεύει την κατανομή της εφεδρείας του συστήματος, μπορεί να περιγραφεί από την (4.1), 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. Το διάνυσμα λύσης της Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) που αντιπροσωπεύει την κατανομή της αξιοπιστίας του συστήματος, μπορεί να περιγραφεί από την (4.2), όπου με  $r_i$  συμβολίζεται η αξιοπιστία των συστημάτων του  $i$ -οστού υποσυστήματος και με  $m$  το πλήθος των υποσυστημάτων που διαθέτει το σύστημα.

Γίνεται η υπόθεση ότι κάθε αναζητητής (agent) είναι ένα σωματίδιο του σμήνους (πληθυσμού) που μετακινείται στον χώρο λύσεων. Η θέση του, που αποτελεί την κατανομή της αξιοπιστίας του συστήματος, περιγράφεται από την σχέση (4.12). Όσον αφορά την κατανομή της εφεδρείας του συστήματος, υποθέτουμε ότι αποτελεί μια κατάσταση που θα αποφευχθεί σε επόμενη επανάληψη και περιγράφεται από την (4.1).

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ ορίζεται τυχαία η αρχική θέση της υποψήφιας λύσης κατανομής εφεδρείας και τα σωματίδια του σμήνους τοποθετούνται τυχαία στον χώρο λύσεων. Έπειτα υπολογίζεται η αρχική ποιότητα κάθε σωματιδίου του σμήνους, ώστε να βρεθεί το αρχικό βέλτιστο σωματίδιο και στην συνέχεια να υπολογισθεί το διάνυσμα ταχύτητας για την ενημέρωση της τρέχουσας θέσης κάθε σωματιδίου του σμήνους.

Στην συνέχεια εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ελέγχεται αν η εξεταζόμενη υποψήφια λύση κατανομής εφεδρείας είναι στην λίστα απαγορευμένων καταστάσεων (Tabu list). Αν το κριτήριο ικανοποιείται και η υποψήφια λύση δεν ανήκει στην λίστα, εκτελείται η διαδικασία προσέγγισης της βέλτιστης θέσης των σωματιδίων, όπου κάθε σωματίδιο προσαρμόζει τη θέση του σύμφωνα με τη δική του εμπειρία και την καλύτερη εμπειρία του σμήνους, ακολουθώντας την σχέση (4.13). Σε διαφορετική περίπτωση ορίζεται

τυχαία η νέα θέση της υποψήφιας λύσης κατανομής εφεδρείας η οποία επανεξετάζεται από το παραπάνω κριτήριο, ώστε να εκτελεστεί η διαδικασία προσέγγισης της θέσης των σωματιδίων.

---

**Ψευδοκώδικας 4.7:** Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

---

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση κατάστασης εφεδρείας
  - 3: Αρχικοποίηση θέσεων σμήνους σωματιδίων αξιοπιστίας
  - 4: Υπολογισμός αρχικής ποιότητας κάθε σωματιδίου
  - 5: Εύρεση του βέλτιστου σωματιδίου όλου του σμήνους
  - 6: **Για** γενιές 1 έως  $K$
  - 7:     **Εάν** η κατάσταση δεν βρίσκεται στην λίστα απαγορευμένων καταστάσεων
  - 8:     **Για** σωματίδιο 1 έως  $N$
  - 9:         Υπολογισμός της ταχύτητας του σωματιδίου
  - 10:        Υπολογισμός της νέας θέσης του σωματιδίου
  - 11:        Ενημέρωση της καλύτερης θέσης κάθε σωματιδίου
  - 12:     **Τέλος**
  - 13:     Εύρεση του βέλτιστου σωματιδίου για την τρέχουσα κατάσταση
  - 14:     **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου σωματιδίου της τρέχουσας κατάστασης είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 15:        Ενημέρωση της βέλτιστης
  - 16:     **Τέλος**
  - 17:     Ενημέρωση της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων
  - 18:     Υπολογισμός νέων θέσεων αξιοπιστίας του σμήνους
  - 19:     **Τέλος**
  - 20:     Υπολογισμός νέας κατάστασης εφεδρείας
  - 21:     **Τέλος**
  - 22:     **Τέλος**
- 

Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, το σωματίδιο βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε εκτελείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης, που περιγράφεται στην ενότητα 4.4.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης των σωματιδίων για την συγκεκριμένη κατάσταση υπολογίζεται η ποιότητα της λύσης, δηλαδή η συνολική αξιοπιστία του συστήματος, και συγκρίνεται με την ποιότητα της προηγούμενης κατάστασης με σκοπό την αναζήτηση της καλύτερης λύσης.

Για την απαλοιφή των περιορισμών κατά τον υπολογισμό της ποιότητας της λύσης χρησιμοποιείται η μέθοδος ποινής (Penalty Method) που περιγράφεται στην ενότητα 4.3, όπου όταν παραβιάζεται κάποιος περιορισμός υφίσταται ποινή μειώνοντας την ποιότητα της λύσης (Yang, 2014b).

Ύστερα ενημερώνεται η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων για να αποφευχθεί η εξέταση της ίδιας κατάστασης σε επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου και παράγεται μια νέα τυχαία κατάσταση (4.1) και η νέα θέση των σωματιδίων του σμήνους.

#### 4.5.2 Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΓΑ-ΒΣΣ)

Ένα επιπλέον υβριδικό σχήμα που αναπτύχθηκε, αποτελείται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (hybrid Genetic Algorithm with Particle Swarm Optimization). Η προσέγγιση του επιμέρους στόχου διακριτού χώρου λύσεων γίνεται με τον Γενετικό Αλγόριθμο, ενώ για τον αντίστοιχο συνεχούς χώρου λύσεων επιλέχθηκε η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων. Το υβριδικό σχήμα περιγράφεται από τον Ψευδοκώδικα 4.8.

---

#### Ψευδοκώδικας 4.8: Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων με μέθοδο ποιηής

---

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού εφεδρείας
  - 3: Αρχικοποίηση θέσεων σμήνους σωματιδίων αξιοπιστίας
  - 4: Εύρεση συνδυασμού γονέα – σωματιδίου με την καλύτερη ποιότητα, με σκοπό την επιλογή του καλύτερου γονέα
  - 5: **Για** γενιές από 1 έως  $K$
  - 6: Διασταύρωση καλύτερου γονέα εφεδρείας με τους υπόλοιπους γονείς του πληθυσμού
  - 7: **Για** άτομο του πληθυσμού 1 έως  $N$
  - 8: **Εάν**  $rand \leq$  ποσοστό μετάλλαξης
  - 9: Τυχαία μετάλλαξη εφεδρείας
  - 10: **Τέλος**
  - 11: **Τέλος**
  - 12: Επιλογή νέου πληθυσμού με χρήση τουρνουά επιλογής (tournament selection)
  - 13: Υπολογισμός αρχικής ποιότητας κάθε σωματιδίου
  - 14: Εύρεση του βέλτιστου σωματιδίου όλου του σμήνους
  - 15: **Για** σωματίδιο 1 έως  $N$
  - 16: Υπολογισμός της ταχύτητας κάθε σωματιδίου
  - 17: Υπολογισμός της νέας θέσης κάθε σωματιδίου
  - 18: Ενημέρωση της καλύτερης θέσης κάθε σωματιδίου
  - 19: **Τέλος**
  - 20: **Τέλος**
  - 21: Εύρεση συνδυασμού γονέα – σωματιδίου με την καλύτερη ποιότητα, με σκοπό την επιλογή του καλύτερου γονέα της επόμενης γενιάς
  - 22: **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου συνδυασμού είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 23: Ενημέρωση της βέλτιστης λύσης
  - 24: **Τέλος**
  - 25: **Τέλος**
- 

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ τοποθετούνται τυχαία στον διακριτό και συνεχές χώρο λύσεων οι επιμέρους πληθυσμοί των μεθόδων, αντίστοιχα. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τον συνδυασμό γονέων του πληθυσμού και σωματιδίων του σμήνους, ώστε να προσδιοριστεί ο αρχικός καλύτερος γονέας που πρόκειται να διασταυρωθεί

με τους υπόλοιπους και το αρχικό βέλτιστο σωματίδιο με σκοπό να υπολογισθεί το διάλυμα ταχύτητας για την ενημέρωση της τρέχουσας θέσης κάθε σωματιδίου του σμήνους.

Ύστερα εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ο καλύτερος γονέας διασταυρώνεται (crossover) με τους υπόλοιπους γονείς. Εξετάζεται αν υπάρχει η πιθανότητα μετάλλαξης σε κάποιο άτομο του πληθυσμού αντίστοιχα, όπου μεταλλάσσεται τυχαία μια από τις μεταβλητές απόφασης που το αποτελούν. Η διασταύρωση γίνεται σε τυχαία σημείο της λύσης και παράγεται μια νέα λύση, ένας νέος απόγονος εκάστοτε, που ονομάζεται παιδί και περιγράφεται από την (4.1), όπως και οι γονείς. Στην συνέχεια εκτελείται ο μηχανισμός του τουρνουά επιλογής (tournament selection), όπου κατά την διαδικασία του υπολογίζεται η ποιότητα της λύσης και επιλέγονται τα καλύτερα άτομα από το σύνολο γονέων και απογόνων, διατηρώντας τον πληθυσμό σταθερό.

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης θέσης των σωματιδίων σε συνδυασμό με τον καλύτερο γονέα του νέου πληθυσμού για έναν αριθμό επαναλήψεων, και πιο συγκεκριμένα η αναζήτηση της βέλτιστης κατανομής αξιοπιστίας για συγκεκριμένη κατανομή εφεδρείας. Υπολογίζεται η ταχύτητα των σωματιδίων, που δημιουργεί ένα διάλυμα κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση και περιγράφεται από την σχέση.

Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, το σωματίδιο βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε εκτελείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης των σωματιδίων υπολογίζεται η ποιότητα της λύσης του συνδυασμού του νέου πληθυσμού με κάθε σωματίδιο του σμήνους, ώστε να βρεθεί ο καλύτερος γονέας της επόμενης γενιάς καθώς και η συνολική αξιοπιστία του συστήματος, όπου συγκρίνεται με την ποιότητα της προηγούμενης γενιάς ώσπου να βρεθεί η καλύτερη λύση.

#### **4.5.3 Υβριδικό σχήμα που αποτελείται Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (AN-BSS)**

Το παρόν υβριδικό σχήμα, αποτελείται από τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας και την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (hybrid Bat Algorithm with Particle Swarm Optimization) και έχει σκοπό να διαχωρίσει το πρόβλημα σε διακριτό και συνεχές μέρος. Η προσέγγιση του διακριτού μέρους γίνεται με τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας, ενώ του συνεχούς μέρους επιλέχθηκε η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων. Το υβριδικό σχήμα περιγράφεται από τον Ψευδοκώδικας 4.9.

**Ψευδοκώδικας 4.9:** Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Βελτιστοποίησης  
Σμήνους Σωματιδίων

- 
- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού νυχτερίδων και σμήνους σωματιδίων
  - 3: **Όσο** δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού
  - 4:     **Για** νυχτερίδα από 1 έως  $N$
  - 5:         Υπολογισμός συχνότητας εκπομπής
  - 6:         Υπολογισμός ταχύτητας νυχτερίδας
  - 7:         **Εάν** ικανοποιείται το κριτήριο (4.9)
  - 8:             Ενημέρωση της θέσης βάσει της (4.7)
  - 9:         **Τέλος**
  - 10:         **Εάν** η ποιότητα της νυχτερίδας βελτιωθεί και ικανοποιείται το κριτήριο  $\rho > r_i$
  - 11:             Αποδοχή της νέας θέσης
  - 12:         **Τέλος**
  - 13:         **Εάν** η νέα θέση αποτελεί εφικτή λύση
  - 14:             Επαναφορά  $A = A_0, r_i = r_0$
  - 15:             Επαναφορά χρόνου  $t = 1$
  - 16:         **Αλλιώς**
  - 17:             Ενημέρωση ρυθμού εκπομπής παλμών (4.10) και έντασης (4.11)
  - 18:         **Τέλος**
  - 19:         Ενημέρωση χρόνου  $t = t + 1$
  - 20:         Εφαρμογή μηχανισμού επανατοποθέτησης εφεδρείας
  - 21:         **Τέλος**
  - 22:         **Για** σωματίδιο 1 έως  $N$
  - 23:             Υπολογισμός της ταχύτητας κάθε σωματιδίου
  - 24:             Υπολογισμός της νέας θέσης κάθε σωματιδίου
  - 25:             Εφαρμογή μηχανισμού επανατοποθέτησης αξιοπιστίας
  - 26:             Ενημέρωση της καλύτερης θέσης κάθε σωματιδίου
  - 27:         **Τέλος**
  - 28:         Εύρεση συνδυασμού νυχτερίδας – σωματιδίου με την καλύτερη ποιότητα
  - 29:         **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου συνδυασμού είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 30:             Ενημέρωση της βέλτιστης λύσης
  - 31:         **Τέλος**
  - 32:         **Τέλος**
- 

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ τοποθετούνται τυχαία στον διακριτό και συνεχές χώρο λύσεων οι επιμέρους πληθυσμοί των μεθόδων, αντίστοιχα. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τον συνδυασμό νυχτερίδας του πληθυσμού και σωματιδίων του σμήνους, ώστε να προσδιοριστεί η αρχική καλύτερη νυχτερίδα και σωματίδιο με σκοπό να υπολογισθούν τα διανύσματα ταχύτητας των αναζητητών για τους επιμέρους πληθυσμούς.

Ύστερα εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ο αλγόριθμός της νυχτερίδας δέχεται ως όρισμα την τον πληθυσμό των σωματιδίων που περιγράφει την κατανομή της αξιοπιστίας. Στην συνέχεια υπολογίζεται το διάνυσμα ταχύτητας της νυχτερίδας και αν το κριτήριο (4.9) ικανοποιείται, η νυχτερίδα μετακινείται σύμφωνα με την (4.7). Έπειτα

εάν ικανοποιείται το κριτήριο αποδοχής τότε η λύση γίνεται αποδεκτή ενώ η παράμετρος της έντασης, ο ρυθμός εκπομπής και ο χρόνος επαναφέρονται στις αρχικές τους τιμές. Αντίθετα, οι παράμετροι ενημερώνονται βάσει των (4.10) και (4.11), μειώνοντας την ένταση της  $i$ -οστής νυχτερίδας, ώσπου να βρεθεί μια εφικτή θέση από το σημείο του χώρου στο οποίο βρίσκονται.

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό νυχτερίδων. Υπολογίζεται η ταχύτητα των σωματιδίων, που δημιουργεί ένα διάνυσμα κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση και περιγράφεται από την σχέση (4.13).

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση των νέων θέσεων των σωματιδίων υπολογίζεται η ποιότητα των λύσεων του συνδυασμού του πληθυσμού νυχτερίδων με το σμήνος σωματιδίων, οι οποίες συγκρίνονται με την καλύτερη ποιότητα της προηγούμενης επανάληψης ώσπου να βρεθεί η καλύτερη λύση.

#### 4.5.4 Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αναζήτησης Κούκου (AN-AK)

Το υβριδικό σχήμα, αποτελείται από τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας και την Αναζήτηση Κούκου (hybrid Bat Algorithm with Cuckoo Search). Η προσέγγιση του επιμέρους στόχου διακριτού χώρου λύσεων γίνεται με τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας, ενώ αντίστοιχα για αυτόν του συνεχούς επιλέχθηκε η Αναζήτηση Κούκου. Το υβριδικό σχήμα περιγράφεται από τον Ψευδοκώδικας 4.10.

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ τοποθετούνται τυχαία στο διακριτό και συνεχές χώρο λύσεων οι επιμέρους πληθυσμοί των μεθόδων, αντίστοιχα. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τον συνδυασμό των νυχτερίδων και κούκων των πληθυσμών, ώστε να προσδιοριστεί η αρχική καλύτερη νυχτερίδα με σκοπό να υπολογισθεί το διάνυσμα ταχύτητας κάθε νυχτερίδας.

Ύστερα εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ο αλγόριθμός της νυχτερίδας δέχεται ως όρισμα την τον πληθυσμό των κούκων που περιγράφει την κατανομή της αξιοπιστίας. Στην συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα της νυχτερίδας και αν το κριτήριο (4.9), η νυχτερίδα μετακινείται σύμφωνα με την (4.7). Έπειτα εάν ικανοποιείται το κριτήριο αποδοχής τότε η λύση γίνεται αποδεκτή ενώ η παράμετρος της έντασης, ο ρυθμός εκπομπής και ο χρόνος επαναφέρονται στις αρχικές τους τιμές. Αντίθετα, οι παράμετροι ενημερώνονται βάσει των (4.10) και (4.11).



**Ψευδοκώδικας 4.10:** Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αναζήτησης Κούκου

- 
- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού νυχτερίδων και κούκων
  - 3: **Όσο** δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού
  - 4:     **Για** νυχτερίδα από 1 έως  $N$
  - 5:         Υπολογισμός συχνότητας εκπομπής
  - 6:         Υπολογισμός ταχύτητας νυχτερίδας
  - 7:         **Εάν** ικανοποιείται το κριτήριο (4.9)
  - 8:             Ενημέρωση της θέσης βάσει της (4.7)
  - 9:         **Τέλος**
  - 10:        **Εάν** η ποιότητα της νυχτερίδας βελτιωθεί και ικανοποιείται το κριτήριο  $\rho > r_i$
  - 11:             Αποδοχή της νέας θέσης
  - 12:         **Τέλος**
  - 13:         **Εάν** η νέα θέση αποτελεί εφικτή λύση
  - 14:             Επαναφορά  $A = A_0, r_i = r_0$
  - 15:             Επαναφορά χρόνου  $t = 1$
  - 16:         **Αλλιώς**
  - 17:             Ενημέρωση ρυθμού εκπομπής παλμών (4.10) και έντασης (4.11)
  - 18:         **Τέλος**
  - 19:         Ενημέρωση χρόνου  $t = t + 1$
  - 20:         Εφαρμογή μηχανισμού επανατοποθέτησης εφεδρείας
  - 21:         **Τέλος**
  - 22:         Εύρεση του βέλτιστου κούκου όλου του πληθυσμού
  - 23:         **Για** κούκο 1 έως  $N$
  - 24:             Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τυχαίο περίπατο Levy (4.15)
  - 25:             Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τοπικό τυχαίο περίπατο (4.16), εάν ανακαλυφθεί το αυγό  $H(p_a - \epsilon) = 1$
  - 26:         **Τέλος**
  - 27:         Εύρεση συνδυασμού νυχτερίδας – κούκου με την καλύτερη ποιότητα
  - 28:         **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου συνδυασμού είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 29:             Ενημέρωση της βέλτιστης λύσης
  - 30:         **Τέλος**
  - 31:         **Τέλος**
- 

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος της Αναζήτησης Κούκου, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό νυχτερίδων. Υπολογίζεται η θέση του καλύτερου κούκου και εκτελείται ο τυχαίος περίπατος Levy εξερευνώντας τον χώρο λύσεων. Σε περίπτωση που το αυγό του κούκου ανακαλυφθεί και συγκεκριμένα όταν η συνάρτηση Heaviside στην σχέση (4.16) λάβει την τιμή  $H(p_a - \epsilon) = 1$ , διεξάγεται ο τοπικός τυχαίος περίπατος οδηγώντας τον σε μια νέα κοντινή φωλιά. Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, ο κούκος βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση των νέων θέσεων των κούκων υπολογίζεται η ποιότητα των λύσεων του συνδυασμού του πληθυσμού νυχτερίδων και κούκων, οι οποίες συγκρίνονται με την καλύτερη ποιότητα της προηγούμενης επανάληψης ώσπου να βρεθεί η καλύτερη λύση.

#### 4.5.5 Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας (AN-AΠ)

Το υβριδικό σχήμα, αποτελείται από τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας (hybrid Bat Algorithm with Firefly Algorithm). Για την προσέγγιση του επιμέρους στόχου διακριτού χώρου λύσεων επιλέχθηκε ο Αλγόριθμος Νυχτερίδας, ενώ αντίστοιχα για αυτόν του συνεχούς επιλέχθηκε ο Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας. Το υβριδικό σχήμα περιγράφεται από τον Ψευδοκώδικα 4.11.

##### Ψευδοκώδικας 4.11: Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας

- 
- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού νυχτερίδων και πυγολαμπίδων
  - 3: **Όσο** δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού
  - 4:     **Για** νυχτερίδα από 1 έως  $N$
  - 5:         Υπολογισμός συχνότητας εκπομπής
  - 6:         Υπολογισμός ταχύτητας νυχτερίδας
  - 7:         **Εάν** ικανοποιείται το κριτήριο (4.9)
  - 8:             Ενημέρωση της θέσης βάσει της (4.7)
  - 9:         **Τέλος**
  - 10:        **Εάν** η ποιότητα της νυχτερίδας βελτιωθεί και ικανοποιείται το κριτήριο  $\rho > r_i$
  - 11:             Αποδοχή της νέας θέσης
  - 12:         **Τέλος**
  - 13:         **Εάν** η νέα θέση αποτελεί εφικτή λύση
  - 14:             Επαναφορά  $A = A_0, r_i = r_0$
  - 15:             Επαναφορά χρόνου  $t = 1$
  - 16:         **Αλλιώς**
  - 17:             Ενημέρωση ρυθμού εκπομπής παλμών (4.10) και έντασης (4.11)
  - 18:         **Τέλος**
  - 19:         Ενημέρωση χρόνου  $t = t + 1$
  - 20:         Εφαρμογή μηχανισμού επανατοποθέτησης εφεδρείας
  - 21:         **Τέλος**
  - 22:         Εύρεση ποιότητας πυγολαμπίδων όλου του πληθυσμού
  - 23:         **Για** πυγολαμπίδα 1 έως  $N$
  - 24:             **Για** πυγολαμπίδα 1 έως  $N$
  - 25:                 **Εάν** η ποιότητα της  $j$ -οστής  $\geq i$ -οστής
  - 26:                     Υπολογισμός της ελκυστικότητας (4.17)
  - 27:                     Υπολογισμός της νέας θέσης πυγολαμπίδας (4.18)
  - 28:             **Τέλος**
  - 29:         **Τέλος**
  - 30:         **Τέλος**
  - 31:         Εύρεση συνδυασμού νυχτερίδας – πυγολαμπίδας με την καλύτερη ποιότητα
  - 32:         **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου συνδυασμού είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 33:             Ενημέρωση της βέλτιστης λύσης
  - 34:         **Τέλος**
  - 35:         **Τέλος**
-

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ τοποθετούνται τυχαία στον διακριτό και συνεχές χώρο λύσεων οι επιμέρους πληθυσμοί των μεθόδων, αντίστοιχα. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τον συνδυασμό νυχτερίδων και πυγολαμπίδων των πληθυσμών, ώστε να προσδιοριστεί η αρχική καλύτερη νυχτερίδα με σκοπό να υπολογισθεί το διάλυμα ταχύτητας κάθε νυχτερίδας.

Ύστερα εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ο αλγόριθμος της νυχτερίδας δέχεται ως όρισμα την τον πληθυσμό των πυγολαμπίδων που περιγράφει την κατανομή της αξιοπιστίας. Στην συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα της νυχτερίδας και αν το κριτήριο (4.9) ικανοποιείται, η νυχτερίδα μετακινείται σύμφωνα με την (4.7). Εάν ικανοποιείται το κριτήριο αποδοχής τότε η λύση γίνεται αποδεκτή ενώ η παράμετρος της έντασης, ο ρυθμός εκπομπής και ο χρόνος επαναφέρονται στις αρχικές τους τιμές. Αντίθετα, οι παράμετροι ενημερώνονται βάσει των (4.10) και (4.11).

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος του Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό νυχτερίδων. Έπειτα, αξιολογούνται οι θέσεις των πυγολαμπίδων και καταγράφεται αυτή της καλύτερης, υπολογίζεται η ελκυστικότητα κάθε πυγολαμπίδας σε σχέση με μια καλύτερης ποιότητας όπου και μετακινείται προς το μέρος της. Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, η πυγολαμπίδα βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση των νέων θέσεων των πυγολαμπίδων υπολογίζεται η ποιότητα των λύσεων του συνδυασμού του πληθυσμού νυχτερίδων και πυγολαμπίδων, οι οποίες συγκρίνονται με την καλύτερη ποιότητα της προηγούμενης επανάληψης ώσπου να βρεθεί η καλύτερη λύση.

#### **4.5.6 Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αναζήτησης Κούκου (ΓΑ-ΑΚ)**

Ένα επιπλέον υβριδικό σχήμα που αναπτύχθηκε, αποτελείται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και την Αναζήτηση Κούκου (hybrid Genetic Algorithm with Cuckoo Search), όπου η προσέγγιση του επιμέρους στόχου διακριτού χώρου λύσεων γίνεται με τον Γενετικό Αλγόριθμο, ενώ αυτός του συνεχούς με την Αναζήτηση Κούκου. Το υβριδικό σχήμα περιγράφεται από τον Ψευδοκώδικα 4.12.

Αρχικά, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ τοποθετούνται τυχαία στον διακριτό και συνεχές χώρο λύσεων οι επιμέρους πληθυσμοί των μεθόδων, αντίστοιχα. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για

τον συνδυασμό γονέων του πληθυσμού και σωματιδίων του σμήνους, ώστε να προσδιοριστεί ο αρχικός καλύτερος γονέας που πρόκειται να διασταυρωθεί με τους υπόλοιπους.

---

#### Ψευδοκώδικας 4.12: Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αναζήτηση Κούκου

---

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού γονέων και κούκων
  - 3: Εύρεση συνδυασμού γονέα – κούκου με την καλύτερη ποιότητα, με σκοπό την επιλογή του καλύτερου γονέα
  - 7: **Για** γενιές από 1 έως  $K$
  - 8: Διασταύρωση καλύτερου γονέα εφεδρείας με τους υπόλοιπους γονείς του πληθυσμού
  - 9: **Για** άτομο του πληθυσμού 1 έως  $N$
  - 10: **Εάν**  $rand \leq$  ποσοστό μετάλλαξης
  - 11: Τυχαία μετάλλαξη εφεδρείας
  - 12: **Τέλος**
  - 13: **Τέλος**
  - 14: Επιλογή νέου πληθυσμού με χρήση τουρνουά επιλογής (tournament selection)
  - 16: Εύρεση του βέλτιστου κούκου όλου του πληθυσμού
  - 17: **Για** κούκο 1 έως  $N$
  - 18: Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τυχαίο περίπατο Levy (4.15)
  - 19: Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τοπικό τυχαίο περίπατο (4.16), εάν ανακαλυφθεί το αυγό  $H(p_a - \epsilon) = 1$
  - 20: **Τέλος**
  - 27: Εύρεση συνδυασμού γονέα – κούκου με την καλύτερη ποιότητα, με σκοπό την επιλογή του καλύτερου γονέα της επόμενης γενιάς
  - 28: **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου συνδυασμού είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 29: Ενημέρωση της βέλτιστης λύσης
  - 30: **Τέλος**
  - 31: **Τέλος**
- 

Ύστερα εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ο καλύτερος γονέας διασταυρώνεται (crossover) με τους υπόλοιπους γονείς. Εξετάζεται αν υπάρχει η πιθανότητα μετάλλαξης σε κάποιο άτομο του πληθυσμού αντίστοιχα, όπου μεταλλάσσεται τυχαία μια από τις μεταβλητές απόφασης που το αποτελούν. Η διασταύρωση γίνεται σε τυχαία σημείο της λύσης και παράγεται μια νέα λύση, ένας νέος απόγονος εκάστοτε, που ονομάζεται παιδί και περιγράφεται από την (4.1), όπως και οι γονείς. Για την διατήρηση του πληθυσμού χρησιμοποιείται η μέθοδος του τουρνουά επιλογής (tournament selection), όπου κατά την διαδικασία του υπολογίζεται η ποιότητας της λύσης και επιλέγονται τα καλύτερα άτομα από το σύνολο γονέων και απογόνων, διατηρώντας τον πληθυσμό σταθερό.

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος της Αναζήτησης Κούκου, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό γονέων. Υπολογίζεται η θέση του καλύτερου κούκου και εκτελείται ο τυχαίος περίπατος Levy εξερευνώντας τον χώρο λύσεων. Σε περίπτωση που το αυγό του κούκου ανακαλυφθεί και συγκεκριμένα όταν η συνάρτηση Heaviside στην σχέση (4.16) λάβει

την τιμή  $H(p_a - \epsilon) = 1$ , διεξάγεται ο τοπικός τυχαίος περίπατος οδηγώντας τον σε μια νέα κοντινή φωλιά. Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, ο κούκος βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση των νέων θέσεων των κούκων υπολογίζεται η ποιότητα των λύσεων του συνδυασμού του πληθυσμού γονέων και κούκων, οι οποίες συγκρίνονται με την καλύτερη ποιότητα της προηγούμενης επανάληψης ώσπου να βρεθεί η καλύτερη λύση.

#### **4.5.7 Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας (ΓΑ-ΑΠ)**

Ένα επιπλέον υβριδικό σχήμα που αναπτύχθηκε, αποτελείται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας (hybrid Genetic Algorithm with Firefly Algorithm) όπου ο Γενετικός Αλγόριθμος προσεγγίζει τον στόχο του διακριτού χώρου λύσεων και ο Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας αυτόν του συνεχούς αντίστοιχα. Το υβριδικό σχήμα περιγράφεται από τον Ψευδοκώδικα 4.13.

Αρχικά, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ενώ τοποθετούνται τυχαία στον διακριτό και συνεχές χώρο λύσεων οι επιμέρους πληθυσμοί των μεθόδων, αντίστοιχα. Έπειτα, προσδιορίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τον συνδυασμό γονέων  $\tau$  πυγολαμπίδων των πληθυσμών, ώστε να προσδιοριστεί ο αρχικός καλύτερος γονέας που πρόκειται να διασταυρωθεί με τους υπόλοιπους.

Ύστερα εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ο καλύτερος γονέας διασταυρώνεται (crossover) με τους υπόλοιπους γονείς. Εξετάζεται αν υπάρχει η πιθανότητα μετάλλαξης σε κάποιο άτομο του πληθυσμού αντίστοιχα, όπου μεταλλάσσεται τυχαία μια από τις μεταβλητές απόφασης που το αποτελούν. Η διασταύρωση γίνεται σε τυχαία σημείο της λύσης και παράγεται μια νέα λύση, ένας νέος απόγονος εκάστοτε, που ονομάζεται παιδί και περιγράφεται από την (4.1), όπως και οι γονείς. Για την διατήρηση του πληθυσμού χρησιμοποιείται η μέθοδος του τουρνουά επιλογής (tournament selection), όπου κατά την διαδικασία του υπολογίζεται η ποιότητας της λύσης και επιλέγονται τα καλύτερα άτομα από το σύνολο γονέων και απογόνων, διατηρώντας τον πληθυσμό σταθερό.

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος του Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό νυχτερίδων. Έπειτα, αξιολογούνται οι θέσεις των πυγολαμπίδων και καταγράφεται αυτή της καλύτερης, υπολογίζεται η ελκυστικότητα κάθε πυγολαμπίδας σε σχέση με μια καλύτερης ποιότητας όπου και μετακινείται προς το μέρος της. Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, η πυγολαμπίδα βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού

των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

---

**Ψευδοκώδικας 4.13:** Υβριδικό σχήμα Γενετικού Αλγόριθμου και Αλγόριθμου

Πυγολαμπίδας

- 
- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού γονέων και κούκων
  - 3: Εύρεση συνδυασμού γονέα – κούκου με την καλύτερη ποιότητα, με σκοπό την επιλογή του καλύτερου γονέα
  - 7: **Για** γενιές από 1 έως  $K$
  - 8: Διασταύρωση καλύτερου γονέα εφεδρείας με τους υπόλοιπους γονείς του πληθυσμού
  - 9: **Για** άτομο του πληθυσμού 1 έως  $N$
  - 10: **Εάν**  $rand \leq$  ποσοστό μετάλλαξης
  - 11: Τυχαία μετάλλαξη εφεδρείας
  - 12: **Τέλος**
  - 13: **Τέλος**
  - 14: Επιλογή νέου πληθυσμού με χρήση τουρνουά επιλογής (tournament selection)
  - 16: Εύρεση ποιότητας πυγολαμπίδων όλου του πληθυσμού
  - 17: **Για** πυγολαμπίδα 1 έως  $N$
  - 18: **Για** πυγολαμπίδα 1 έως  $N$
  - 19: **Εάν** η ποιότητα της  $j$ -οστής  $\geq$   $i$ -οστής
  - 20: Υπολογισμός της ελκυστικότητας (4.17)
  - 27: Υπολογισμός της νέας θέσης πυγολαμπίδας (4.18)
  - 28: Εφαρμογή μηχανισμού επανατοποθέτησης αξιοπιστίας
  - 29: **Τέλος**
  - 30: **Τέλος**
  - 31: **Τέλος**
  - 32: **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου συνδυασμού είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 33: Ενημέρωση της βέλτιστης λύσης
  - 34: **Τέλος**
  - 35: **Τέλος**
- 

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση των νέων θέσεων των πυγολαμπίδων υπολογίζεται η ποιότητα των λύσεων του συνδυασμού του πληθυσμού γονέων και πυγολαμπίδων, οι οποίες συγκρίνονται με την καλύτερη ποιότητα της προηγούμενης επανάληψης ώσπου να βρεθεί η καλύτερη λύση.

#### 4.5.8 Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αναζήτησης Κούκου (AAK-AK)

Στην προκειμένη περίπτωση για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε υβριδικό σχήμα το οποίο αποτελείται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και την Αναζήτηση Κούκου (hybrid Tabu Search with Cuckoo Search). Η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις προσεγγίζει τον στόχο του διακριτού χώρου λύσεων και η

Αναζήτηση Κούκου αυτόν του συνεχούς αντίστοιχα. Το υβριδικό σχήμα μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικας 4.14.

Το διάνυσμα της λύσης της Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search) που αντιπροσωπεύει την κατανομή της εφεδρείας του συστήματος, μπορεί να περιγραφεί από την (4.1), 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. Το διάνυσμα λύσης της Αναζήτησης Κούκου που αντιπροσωπεύει την κατανομή της αξιοπιστίας του συστήματος, μπορεί να περιγραφεί από την (4.2), όπου με  $r_i$  συμβολίζεται η αξιοπιστία των συστημάτων του  $i$ -οστού υποσυστήματος και με  $m$  το πλήθος των υποσυστημάτων που διαθέτει το σύστημα.

Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ορίζεται τυχαία η αρχική θέση της υποψήφιας λύσης κατανομής εφεδρείας και τοποθετείται τυχαία στο συνεχές χώρο λύσεων ο πληθυσμός της Αναζήτησης Κούκου. Στην συνέχεια εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ελέγχεται αν η κατάσταση που εξετάζεται υπάρχει στην λίστα απαγορευμένων καταστάσεων (Tabu list). Αν το κριτήριο ικανοποιείται εκτελείται η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης θέσης των κούκων στην συγκεκριμένη κατάσταση για έναν αριθμό επαναλήψεων, δηλαδή η αναζήτηση της βέλτιστης κατανομής αξιοπιστίας για την συγκεκριμένη κατανομή εφεδρείας.

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος της Αναζήτησης Κούκου, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό νυχτερίδων. Υπολογίζεται η θέση του καλύτερου κούκου και εκτελείται ο τυχαίος περίπατος Levy εξερευνώντας τον χώρο λύσεων. Σε περίπτωση που το αυγό του κούκου ανακαλυφθεί και συγκεκριμένα όταν η συνάρτηση Heaviside στην σχέση (4.16) λάβει την τιμή  $H(p_a - \epsilon) = 1$ , διεξάγεται ο τοπικός τυχαίος περίπατος οδηγώντας τον σε μια νέα κοντινή φωλιά. Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, ο κούκος βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης των κούκων για την συγκεκριμένη κατάσταση υπολογίζεται η ποιότητα της λύσης, δηλαδή η συνολική αξιοπιστία του συστήματος, και συγκρίνεται με την ποιότητα της προηγούμενης κατάστασης με σκοπό την αναζήτηση της καλύτερης λύσης.

Ύστερα ενημερώνεται η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων για να αποφευχθεί η εξέταση της ίδιας κατάστασης σε επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου και παράγεται μια νέα τυχαία κατάσταση (4.1) και η νέα θέση των κούκων του πληθυσμού για την νέα κατάσταση.

---

**Ψευδοκώδικας 4.14:** Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και Αναζήτησης Κούκου

---

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση κατάστασης εφεδρείας και πληθυσμού κούκων
  - 3: **Για** 1 έως  $K$  επαναλήψεις εξέτασης καταστάσεων εφεδρείας προς εξέταση
  - 4:     Εύρεση του βέλτιστου κούκου όλου του πληθυσμού
  - 5:     **Εάν** η κατάσταση δεν βρίσκεται στην λίστα απαγορευμένων καταστάσεων
  - 6:     **Για** κούκο 1 έως  $N$
  - 7:         Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τυχαίο περίπατο Levy (4.15)
  - 8:         Υπολογισμός της νέας θέσης του κούκου μετά από τοπικό τυχαίο περίπατο (4.16), εάν ανακαλυφθεί το αυγό  $H(p_a - \epsilon) = 1$
  - 9:         Εφαρμογή μηχανισμού επανατοποθέτησης αξιοπιστίας
  - 10:        **Τέλος**
  - 11:        **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου κούκου της τρέχουσας κατάστασης είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 12:        Ενημέρωση της βέλτιστης
  - 13:        **Τέλος**
  - 14:        Ενημέρωση της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων
  - 15:        Υπολογισμός νέας κατάστασης εφεδρείας
  - 16:        **Τέλος**
  - 17:        **Τέλος**
- 

#### 4.5.9 Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας (ΑΑΚ-ΑΠ)

Η συγκεκριμένη περίπτωση υβριδικού σχήματος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος αποτελείται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας (hybrid Tabu Search with Firefly Algorithm). Η Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις προσεγγίζει τον στόχο του διακριτού χώρου λύσεων και ο Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας αυτόν του συνεχούς αντίστοιχα. Το υβριδικό σχήμα μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικας 4.15.

Το διάλυμα της λύσης της Αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search) που αντιπροσωπεύει την κατανομή της εφεδρείας του συστήματος, μπορεί να περιγραφεί από την (4.1), 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. Το διάλυμα λύσης του Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας που αντιπροσωπεύει την κατανομή της αξιοπιστίας του συστήματος, μπορεί να περιγραφεί από την (4.2), όπου με  $r_i$  συμβολίζεται η αξιοπιστία των συστημάτων του  $i$ -οστού υποσυστήματος και με  $m$  το πλήθος των υποσυστημάτων που διαθέτει το σύστημα.



Αρχικά, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του υβριδικού σχήματος, ορίζεται τυχαία η αρχική θέση της υποψήφιας λύσης κατανομής εφεδρείας και τοποθετείται τυχαία στο συνεχή χώρο λύσεων ο πληθυσμός του Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας. Στην συνέχεια εκτελείται η επαναληπτική διαδικασία, όπου αρχικά ελέγχεται αν η κατάσταση που εξετάζεται υπάρχει στην λίστα απαγορευμένων καταστάσεων (Tabu list). Αν το κριτήριο ικανοποιείται εκτελείται η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης θέσης των κούκων στην συγκεκριμένη κατάσταση για έναν αριθμό επαναλήψεων, δηλαδή η αναζήτηση της βέλτιστης κατανομής αξιοπιστίας για την συγκεκριμένη κατανομή εφεδρείας.

---

**Ψευδοκώδικας 4.15:** Υβριδικό σχήμα Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας

---

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση κατάστασης εφεδρείας και πληθυσμού κούκων
  - 3: Υπολογισμός αρχικής ποιότητας κάθε σωματιδίου
  - 4: **Για** 1 έως  $K$  επαναλήψεις εξέτασης καταστάσεων εφεδρείας προς εξέταση
  - 5:     Εύρεση ποιότητας πυγολαμπίδων όλου του πληθυσμού
  - 6:     **Εάν** η κατάσταση δεν βρίσκεται στην λίστα απαγορευμένων καταστάσεων
  - 7:         **Για** πυγολαμπίδα 1 έως  $N$
  - 8:             **Για** πυγολαμπίδα 1 έως  $N$
  - 9:                 **Εάν** η ποιότητα της  $j$ -οστής  $\geq i$ -οστής
  - 10:                     Υπολογισμός της ελκυστικότητας (4.17)
  - 11:                     Υπολογισμός της νέας θέσης πυγολαμπίδας (4.18)
  - 12:                     **Τέλος**
  - 13:             **Τέλος**
  - 14:     **Τέλος**
  - 15:     **Εάν** η ποιότητα της βέλτιστης πυγολαμπίδας της τρέχουσας κατάστασης είναι καλύτερη από την ποιότητα της παλιάς
  - 16:         Ενημέρωση της βέλτιστης
  - 17:     **Τέλος**
  - 18:     Ενημέρωση της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων
  - 19:     Υπολογισμός νέας κατάστασης εφεδρείας
  - 20:     **Τέλος**
  - 21: **Τέλος**
- 

Σε επόμενο βήμα εκτελείται η μέθοδος του Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας, η οποία δέχεται ως όρισμα τον νέο πληθυσμό νυχτερίδων. Έπειτα, αξιολογούνται οι θέσεις των πυγολαμπίδων και καταγράφεται αυτή της καλύτερης, υπολογίζεται η ελκυστικότητα κάθε πυγολαμπίδας σε σχέση με μια καλύτερης ποιότητας όπου και μετακινείται προς το μέρος της. Αν κατά την διαδικασία κατεύθυνσης προς μια καλύτερη θέση, η πυγολαμπίδα βρεθεί εκτός πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης κατανομής αξιοπιστίας, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός επανατοποθέτησης.

Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης των πυγολαμπίδων για την συγκεκριμένη κατάσταση υπολογίζεται η ποιότητα της λύσης, δηλαδή η συνολική αξιοπιστία

του συστήματος, και συγκρίνεται με την ποιότητα της προηγούμενης κατάστασης με σκοπό την αναζήτηση της καλύτερης λύσης.

Ύστερα ενημερώνεται η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων για να αποφευχθεί η εξέταση της ίδιας κατάστασης σε επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου και παράγεται μια νέα τυχαία κατάσταση (4.1) και η νέα θέση των πυγολαμπίδων του πληθυσμού για την νέα κατάσταση.

## 5 Πειραματική Διαδικασία

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.

### 5.1 Ρύθμιση παραμέτρων

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη στατιστική απόδοση των υβριδικών σχημάτων, κατά την προσέγγιση του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας, απαιτείται η παραμετροποίηση τους, δηλαδή η εύρεση των τιμών των παραμέτρων για τις οποίες επιτυγχάνεται η καλύτερη στατιστική απόδοσή τους. Ιδανικά, αναμένεται να παρατηρηθεί μέση απόδοση πλησίον της καλύτερης απόδοσης συνοδευόμενη από μια αρκετά μικρή τυπική απόκλιση και αρνητική λοξότητα. Η εν λόγω εικασία υποδηλώνει, αντίστοιχα, πως η εξεταζόμενη μέθοδος αποδίδει καλές λύσεις, είναι αρκετά σταθερή ως προς την απόδοση αυτών και η κατανομή αυτών παρουσιάζει τις περισσότερες λύσεις δεξιά της μέσης απόδοσης, κοντά στο πιο βέλτιστο δυνατό.

Κάθε μέθοδος αποτελείται από τις κοινές και τις μοναδικές παραμέτρους, οι κοινές περιγράφουν τον πληθυσμό (αριθμός αναζητητών) και το πλήθος των γενεών (αριθμός επαναλήψεων), ενώ οι μοναδικές περιγράφουν τις υπόλοιπες παραμέτρους που αποτελούν μια μέθοδο. Παράδειγμα εσωτερικής παραμέτρου αποτελεί η παράμετρος μεταβολής της ελκυστικότητας της σχέσης (4.17) η οποία χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό την ελκυστικότητας μεταξύ των πυγολαμπίδων στον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας.

Η ρύθμισης παραμέτρων στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος της διαδικασίας απαρτίζει την ρύθμιση των μοναδικών παραμέτρων κάθε μεθόδου όπου ο πληθυσμός και το πλήθος των γενεών παραμένουν σταθερές. Κατά το δεύτερο μέρος της διαδικασίας οι καλύτερες μοναδικές παράμετροι διατηρούνται σταθερές με σκοπό να βρεθεί ο κατάλληλος πληθυσμός και το πλήθος γενεών.

Τα δύο αυτά μέρη της διαδικασίας αποτελούνται από τέσσερα διαφορετικά σεντ παραμέτρων 50 ανεξάρτητων εκτελέσεων, όπου οι παράμετροι του πρώτου σεντ βασίζονται στην βιβλιογραφία, ενώ τα υπόλοιπα σεντ κυμαίνονται γύρω από το πρώτο. Για την συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των σεντ παραμέτρων επιλέχθηκε η Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος. Οι παρακάτω ενότητες παρουσιάζουν αναλυτικά την διαδικασία ρύθμισης παραμέτρων των υβριδικών σχημάτων.

Προκειμένου να διεξαχθεί συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των μεθόδων ο αριθμός των κοινών παραμέτρων (των γενεών και του πληθυσμού) διατηρείται σταθερός. Συνεπώς ο Πίνακας 2 περιέχει συγκεντρωτικά τις τιμές των παραμέτρων των αλγορίθμων, που προέκυψαν κατά το πρώτο μέρος της διαδικασίας ρύθμισης των μοναδικών παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου μέρους της διαδικασίας ρύθμισης των κοινών παραμέτρων έχουν σκοπό να αποτελέσουν τα προκαθορισμένα σεντ παραμέτρων για την εφαρμογή περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη, σε περίπτωση που ο χρήστης δεν επιθυμήσει να επιλέξει τις κοινές παραμέτρους.

**Πίνακας 2:** Τιμές παραμέτρων αλγορίθμων.

Παράμετρο $\iota$	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	-	-	-
$\gamma_{BA}$	-	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	-
$\beta_0$	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-
$\gamma_{FA}$	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	-
$\delta$	-	-	-	-	0.98	-	-	0.98	-	-	0.98	-
$\lambda$	-	-	-	-	-	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

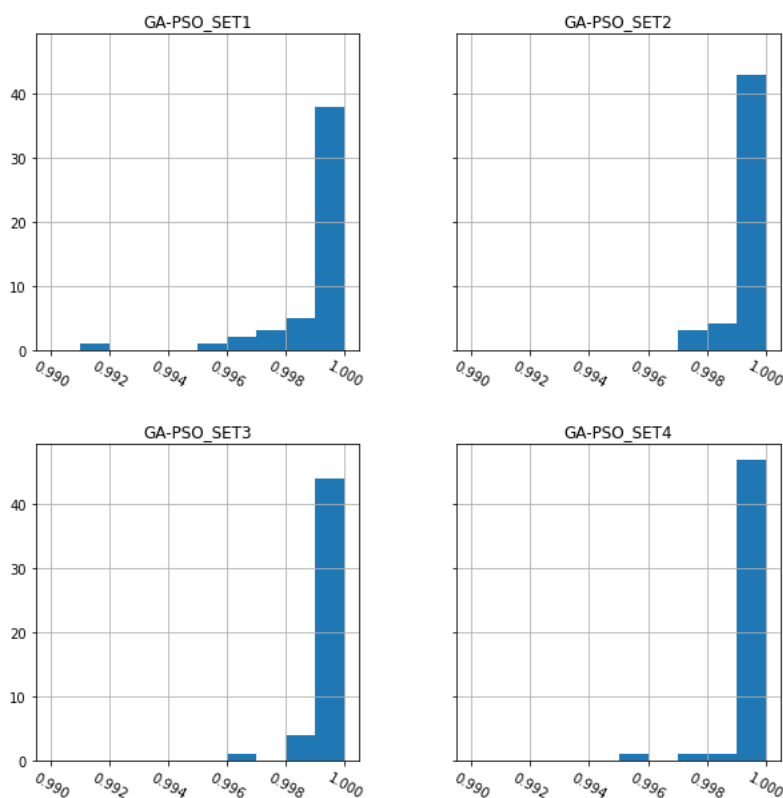
### 5.1.1 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Γενετικού Αλγόριθμου Και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Στον Πίνακας 3 περιέχονται τα σεντ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, ικανοποιητική μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα παρουσιάζει το σεντ παραμέτρων που αποτελείται από ποσοστό μετάλλαξης μεγέθους

0.005, συντελεστή βάρους  $w$  μεγέθους 0.8, παράγοντες μάθησης γνωστικού όρου  $c_1$  μεγέθους 0.5 και κοινωνικού όρου  $c_2$  μεγέθους 1.5.

**Πίνακας 3:** Διαφορετικά σεντ παραμέτρων ΓΑ-BBΣ.

Σεντ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
% Μετάλλαξης	0.001	0.005	0.015	0.025
$w$	0.5	0.8	1.5	2
$c_1$	0.5	0.5	1.5	1.5
$c_2$	0.5	1.5	0.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99995009	<b>0.99997649</b>	0.99994187	0.99996472
Μέση τιμή	0.999061	0.999567	0.999416	0.999581
Λοξότητα	-3.6084	-2.3162	-5.8921	-4.2433



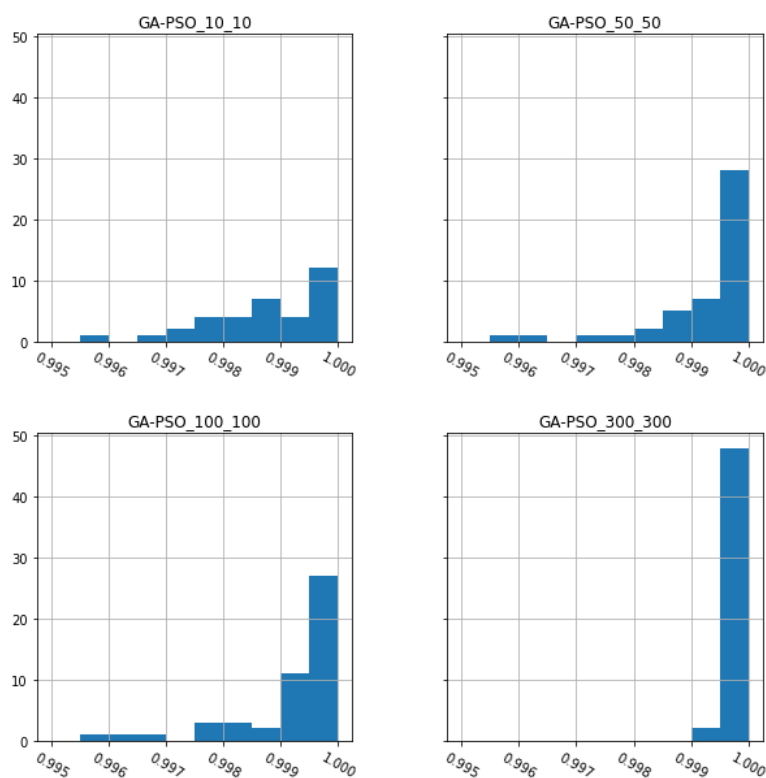
**Γράφημα 1:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σεντ παραμέτρων ΓΑ-BBΣ.

Επιπρόσθετα η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 1 όπου η κατανομή των αποτελεσμάτων αποκτά αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 4:** Διαφορετικά σεντ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΒΣΣ.

Σεντ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
% Μετάλλαξης	0.005	0.005	0.005	0.005
$w$	0.8	0.8	0.8	0.8
$c_1$	0.5	0.5	0.5	0.5
$c_2$	1.5	1.5	1.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99988967	0.99995641	0.99995009	<b>0.99997168</b>
Μέση τιμή	0.85415194	0.99883333	0.99906159	0.99982740
Λοξότητα	-2.1312	-2.3277	-3.6084	-2.1184

Ο Πίνακας 4 περιέχει τα σεντ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της κατανομής των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση.



**Γράφημα 2:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΒΣΣ

Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται και στο Γράφημα 2, όπου η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, η κατανομή των αποτελεσμάτων έχει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης οι εν λόγω

κατανομές φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

### 5.1.2 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Γενετικού Αλγόριθμου Και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας

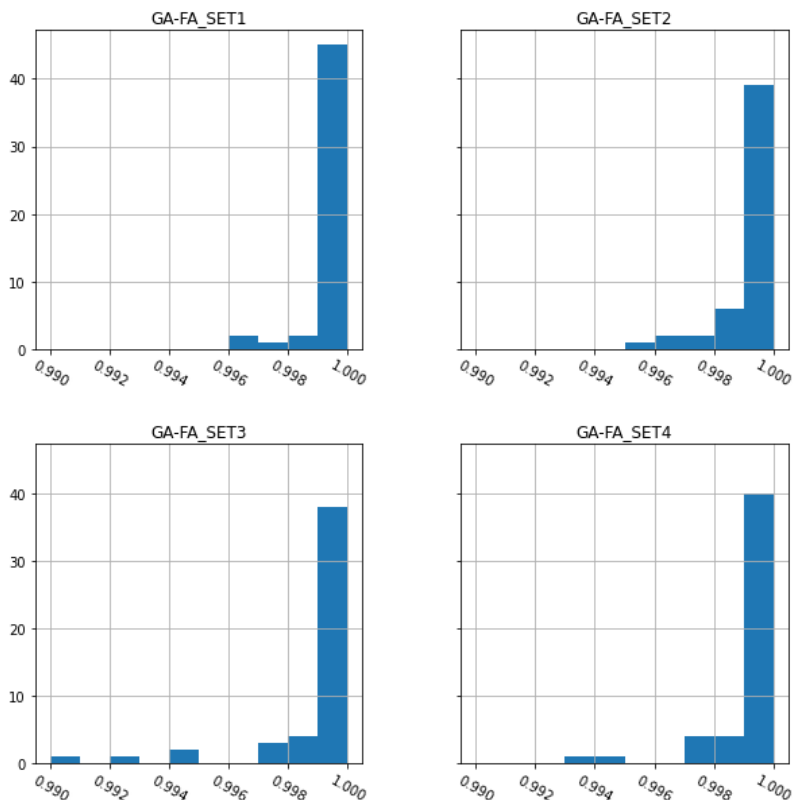
Στον Πίνακας 5 περιέχονται τα σετ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα εμφανίζει το σετ παραμέτρων που αποτελείται από ποσοστό μετάλλαξης 0.001, παράμετρο τυχαιότητας  $a_{FA}$  μεγέθους 0.2, ελκυστικότητα μηδενικής απόστασης  $\beta_0$  μεγέθους 1, παράμετρο μεταβολής ελκυστικότητας  $\gamma_{FA}$  μεγέθους 1 και ρυθμό μείωσης τυχαιότητας  $\delta$  μεγέθους 0.98.

**Πίνακας 5:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΓΑ-ΑΠ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
% Μετάλλαξης	0.001	0.005	0.015	0.025
$a_{FA}$	0.2	0.4	0.6	0.8
$\beta_0$	1	2	0.5	0.8
$\gamma_{FA}$	1	0.5	2	0.8
$\delta$	0.98	0.2	0.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	<b>0.99996742</b>	0.99994919	0.99995013	0.99995050
Μέση τιμή	0.99944588	0.99923389	0.99866963	0.99922722
Λοξότητα	-3.01693	-2.3746	-2.7795	-3.0351

Επιπρόσθετα η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 3 όπου η κατανομή των αποτελεσμάτων αποκτά αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

Ο Πίνακας 6 περιέχει τα σετ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της στατιστικής απόδοσης, καθώς φαίνεται να επιτυγχάνεται η καλύτερη μέση απόδοση. Ωστόσο το σετ παραμέτρων που αποτελείται από τις παραμέτρους πληθυσμού και γενεών μεγέθους 100, εμφανίζει την καλύτερη απόδοση με ικανοποιητική μέση απόδοση.



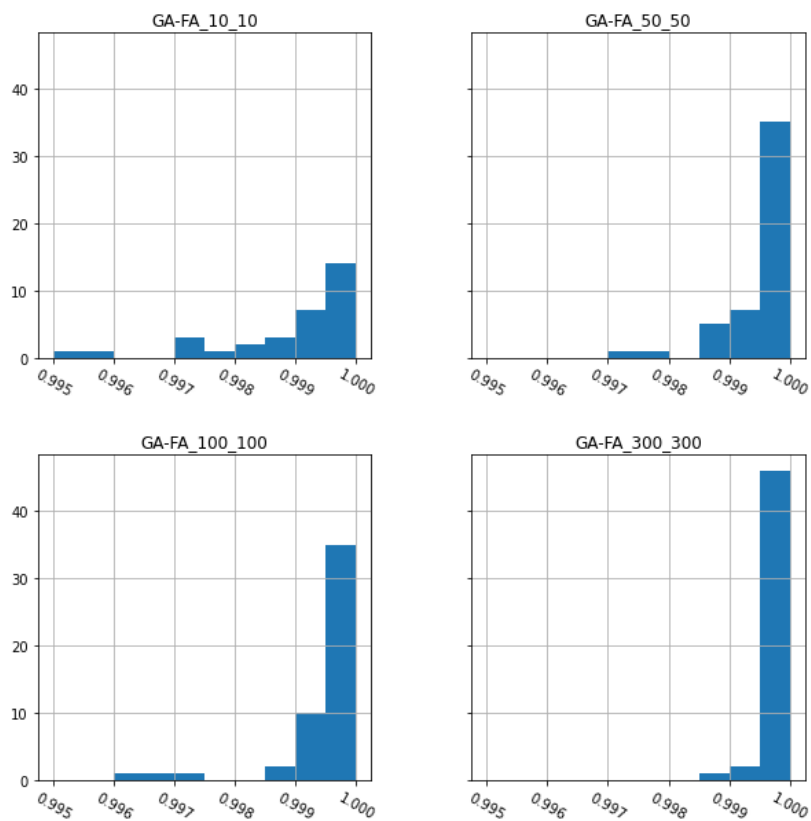
Γράφημα 3: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων ΓΑ-ΑΠ.

Πίνακας 6: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΑΠ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
% Μετάλλαξης	0.001	0.001	0.001	0.001
$a_{FA}$	0.2	0.2	0.2	0.2
$\beta_0$	1	1	1	1
$\gamma_{FA}$	1	1	1	1
$\delta$	0.98	0.98	0.98	0.98
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99991194	0.99994523	<b>0.99996742</b>	0.99995412
Μέση τιμή	0.94752742	0.99943084	0.99944588	0.99959917
Λοξότητα	-4.6761	-3.9211	-3.0169	-6.8680

Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται και στο Γράφημα 4, όπου η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.





Γράφημα 4: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΠΑ.

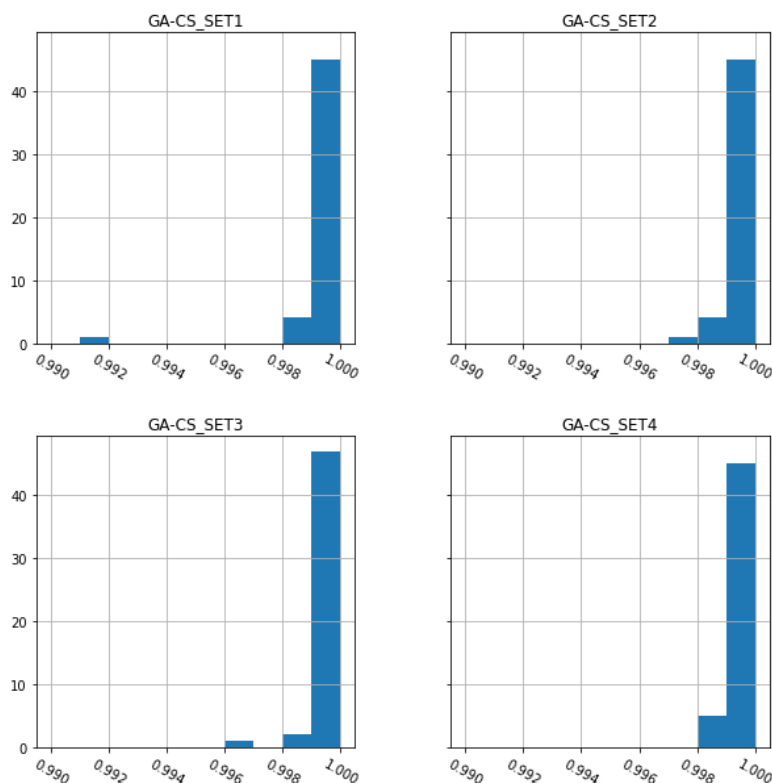
### 5.1.3 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Γενετικού Αλγόριθμου Και Αναζήτησης Κούκου

Πίνακας 7: Διαφορετικά σεντ παραμέτρων ΓΑ-ΑΚ.

Σεντ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
% Μετάλλαξης	0.001	0.005	0.015	0.025
$\lambda$	1.5	2	1	0.5
$s$	0.5	1	1.5	2
$a_{CS}$	0.01	0.05	0.1	0.25
$p_a$	0.25	0.1	0.3	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99994176	0.99993486	0.99994897	<b>0.99996572</b>
Μέση τιμή	0.99940824	0.99952817	0.99960920	0.99964631
Λοξότητα	-6.3797	-2.2885	-4.0992	-2.0763

Στον Πίνακα 7 περιέχονται τα σεντ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από τον Γενετικό Αλγόριθμο και την Αναζήτηση Κούκου, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα εμφανίζει το σεντ παραμέτρων που αποτελείται από ποσοστό μετάλλαξης 0.025, παράμετρο κατανομής Levy  $\lambda$

μεγέθους 0.5, μεγέθους βήματος  $s$  μεγέθους 2, συντελεστή κλίμακας μεγέθους βήματος  $a_{CS}$  μεγέθους 0.25 και πιθανότητα αναγνώρισης αυγού  $p_a$  μεγέθους 0.5.



**Γράφημα 5:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σαι παραμέτρων ΓΑ-AK.

Επιπρόσθετα η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 5 όπου η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σαι παραμέτρων αποκτά αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

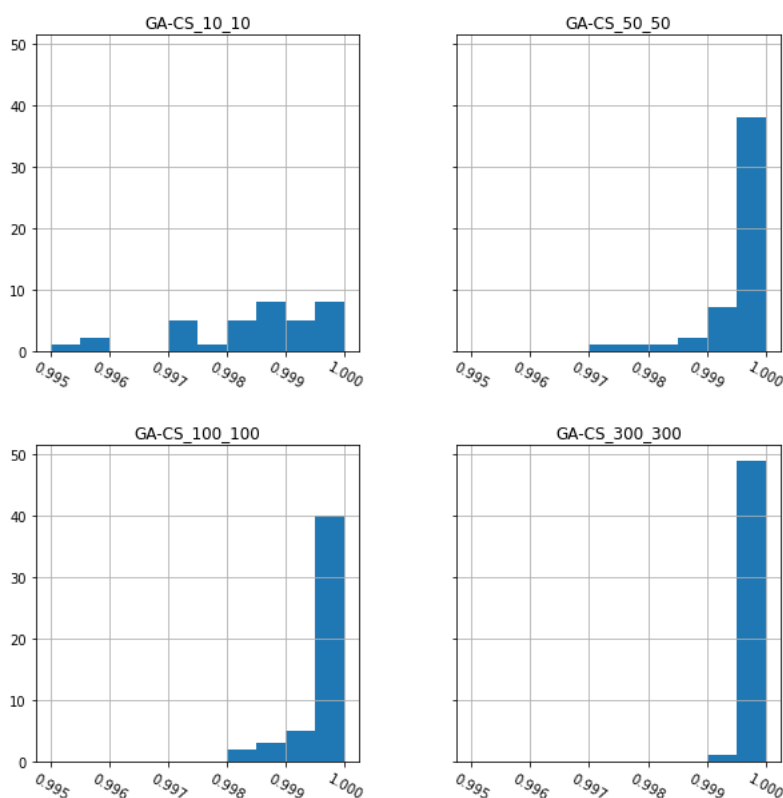
Ο Πίνακας 8 περιέχει τα σαι παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της κατανομής των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση.

Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται και στο Γράφημα 6, όπου η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι

εμφανίζονται τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 8:** Διαφορετικά σεν παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΑΚ.

Σεν Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
% Μετάλλαξης	0.025	0.025	0.025	0.025
$\lambda$	0.5	0.5	0.5	0.5
$s$	2	2	2	2
$a_{CS}$	0.25	0.25	0.25	0.25
$p_a$	0.5	0.5	0.5	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99979262	0.99995240	0.99995464	<b>0.99996175</b>
Μέση τιμή	0.94949428	0.99952021	0.99965298	0.99985187
Λοξότητα	-4.7467	-2.6003	-2.0224	-1.6142



**Γράφημα 6:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΓΑ-ΑΚ.

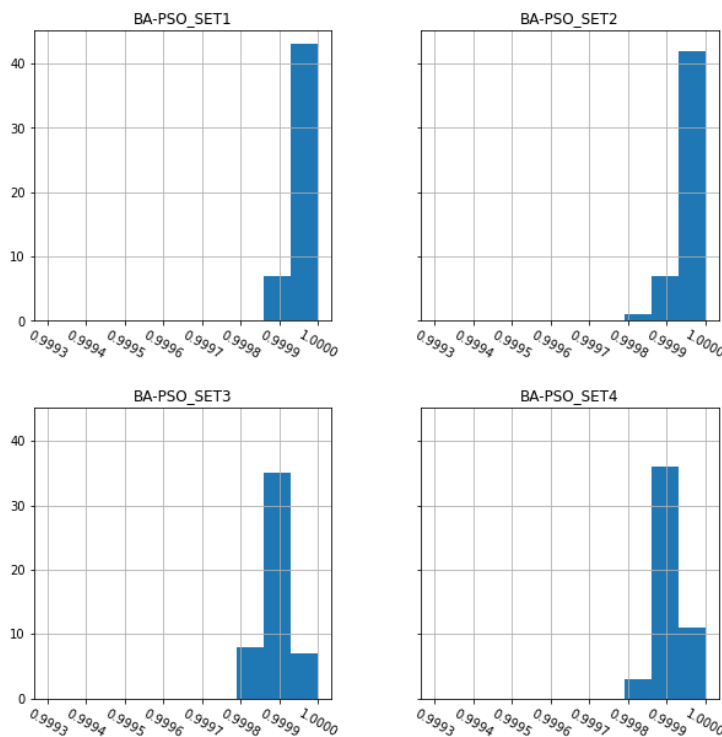
#### 5.1.4 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αλγόριθμου Νυχτερίδας Και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Στον Πίνακα 9 περιέχονται τα σεν των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα την καλύτερη μέση απόδοση, ικανοποιητική απόδοση και αρνητική

λοξότητα εμφανίζει το σετ παραμέτρων που αποτελείται από τον ρυθμό μείωσης έντασης  $a_{BA}$  μεγέθους 0.9, την παράμετρο μείωσης ρυθμού εκπομπής παλμών  $\gamma_{BA}$  μεγέθους 0.3, τον αρχικό ρυθμό εκπομπής παλμών  $r_0$  μεγέθους 0.05, την αρχική ένταση  $A_0$  μεγέθους 5, την μέγιστη  $f_{max}$  και ελάχιστη  $f_{min}$  συχνότητα μεγέθους 4 και 0.1 αντίστοιχα, τον συντελεστή βάρους  $w$  μεγέθους 0.5 και τους παράγοντες μάθησης γνωστικού όρου  $c_1$  μεγέθους 0.5 και κοινωνικού όρου  $c_2$  μεγέθους 0.5.

Πίνακας 9: Διαφορετικά σετ παραμέτρων AN-ΒΣΣ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
$a_{BA}$	0.9	0.5	0.2	1
$\gamma_{BA}$	0.3	0.5	0.9	1
$r_0$	0.05	0.15	0.2	0.25
$A_0$	5	1	6	8
$f_{max}$	4	6	10	8
$f_{min}$	0.1	0.5	1	2
$w$	0.5	0.8	1.5	2
$c_1$	0.5	0.5	1.5	1.5
$c_2$	0.5	1.5	0.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99997544	0.99997599	0.99996522	0.99996399
Μέση τιμή	<b>0.99994913</b>	0.99994722	0.99989694	0.99991332
Λοξότητα	-0.8973	-1.7463	-0.6659	-1.0517



Γράφημα 7: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων AN-ΒΣΣ.

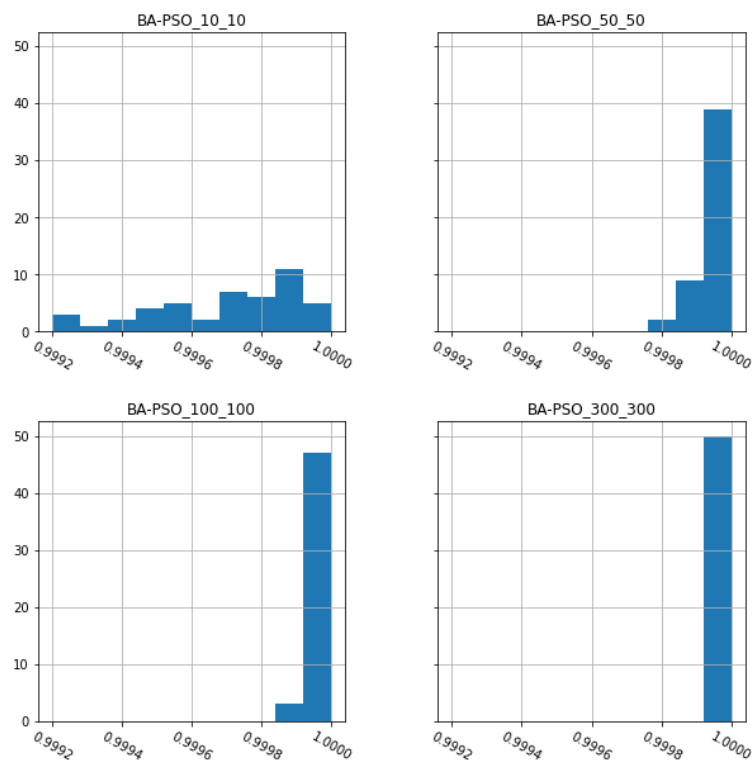
Επίσης η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 7 όπου η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σετ παραμέτρων αποκτά αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

Ο Πίνακας 10 περιέχει τα σετ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των κοινών παραμέτρων. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της κατανομής των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως μια ακραία αύξηση στον πληθυσμός και το πλήθος των γενεών δεν θα επέφερε κάποια σημαντική βελτίωση στην απόδοσης, καθώς το τρίτο σετ δεν διαφέρει αρκετά από το τέταρτο σετ του πίνακα.

**Πίνακας 10:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AN-BSS.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
$a_{BA}$	0.9	0.9	0.9	0.9
$\gamma_{BA}$	0.3	0.3	0.3	0.3
$r_0$	0.05	0.05	0.05	0.05
$A_0$	5	5	5	5
$f_{max}$	4	4	4	4
$f_{min}$	0.1	0.1	0.1	0.1
$w$	0.5	0.5	0.5	0.5
$c_1$	0.5	0.5	0.5	0.5
$c_2$	0.5	0.5	0.5	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99994887	0.99996742	0.99997570	<b>0.99997659</b>
Μέση τιμή	0.99946174	0.99993494	0.99995135	0.99996097
Λοξότητα	-5.7252	-2.4581	-1.8570	-1.0910

Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από το Γράφημα 8, όπου η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.



Γράφημα 8: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο AN-BSΣ.

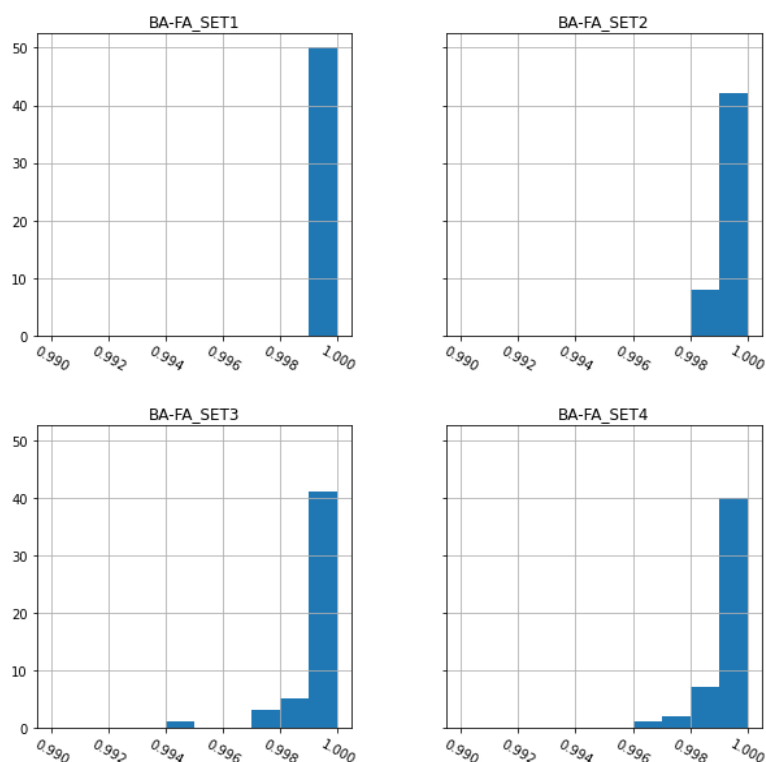
### 5.1.5 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αλγόριθμου Νυχτερίδας Και Αλγορίθμου Πυγολαμπίδας

Πίνακας 11: Διαφορετικά σεντ παραμέτρων AN-ΑΠ.

Σεντ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
$a_{BA}$	0.9	0.5	0.2	1
$\gamma_{BA}$	0.3	0.5	0.9	1
$r_0$	0.05	0.15	0.2	0.25
$A_0$	5	1	6	8
$f_{max}$	4	6	10	8
$f_{min}$	0.1	0.5	1	2
$a_{FA}$	0.2	0.4	0.6	0.8
$\beta_0$	1	2	0.5	0.8
$\gamma_{FA}$	1	0.5	2	0.8
$\delta$	0.98	0.2	0.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	<b>0.99997611</b>	0.99996215	0.99996291	0.99994298
Μέση τιμή	0.99996	0.99948	0.99931	0.99938
Λοξότητα	-2.1147	-1.3420	-3.7876	-2.0685

Στον Πίνακα 11 περιέχονται τα σεντ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως διαπιστώνεται από τα

αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση καθώς και αρνητική λοξότητα παρουσιάζει το σετ παραμέτρων που αποτελείται από τον ρυθμό μείωσης έντασης  $a_{BA}$  μεγέθους 0.9, την παράμετρο μείωσης ρυθμού εκπομπής παλμών  $\gamma_{BA}$  μεγέθους 0.3, τον αρχικό ρυθμό εκπομπής παλμών  $r_0$  μεγέθους 0.05, την αρχική ένταση  $A_0$  μεγέθους 5, την μέγιστη  $f_{max}$  και ελάχιστη  $f_{min}$  συχνότητα μεγέθους 4 και 0.1 αντίστοιχα, την παράμετρο τυχαιότητας  $a_{FA}$  μεγέθους 0.2, την ελκυστικότητα μηδενικής απόστασης  $\beta_0$  μεγέθους 1, την παράμετρο μεταβολής ελκυστικότητας  $\gamma_{FA}$  μεγέθους 1 και τον ρυθμό μείωσης τυχαιότητας  $\delta$  μεγέθους 0.98.



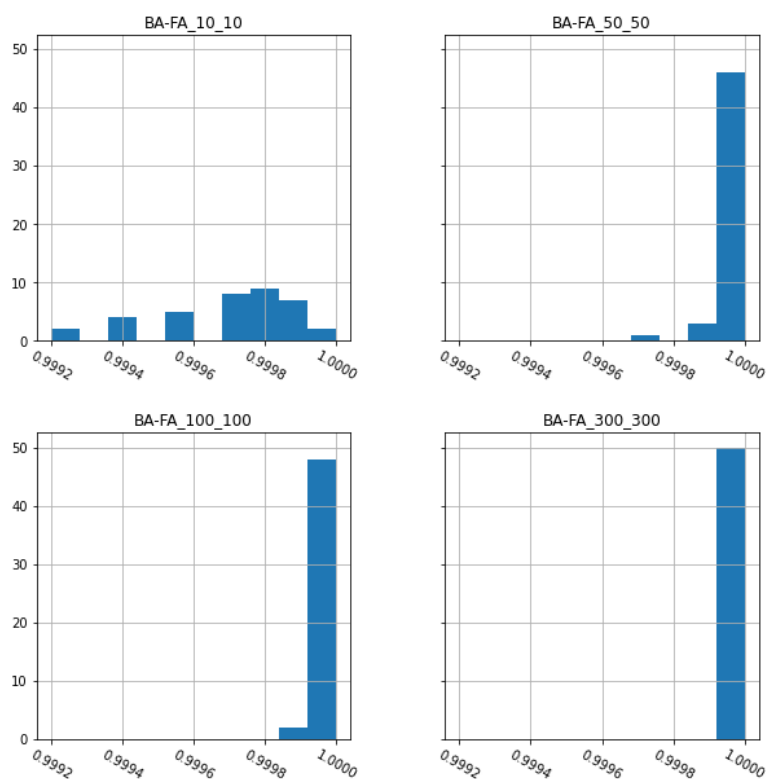
**Γράφημα 9:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων AN-ΑΠ.

Επίσης η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 9 όπου η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σετ παραμέτρων αποκτά αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 12:** Διαφορετικά σεν παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AN-ΑΠ.

Σεν Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
$a_{BA}$	0.9	0.9	0.9	0.9
$\gamma_{BA}$	0.3	0.3	0.3	0.3
$r_0$	0.05	0.05	0.05	0.05
$A_0$	5	5	5	5
$f_{max}$	4	4	4	4
$f_{min}$	0.1	0.1	0.1	0.1
$a_{FA}$	0.2	0.2	0.2	0.2
$\beta_0$	1	1	1	1
$\gamma_{FA}$	1	1	1	1
$\delta$	0.98	0.98	0.98	0.98
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99993436	0.99997146	0.99997611	<b>0.99997637</b>
Μέση τιμή	0.95931124	0.99994279	0.99996235	0.99997152
Λοξότητα	-4.8411	-4.7943	-2.1147	-3.1976

Ο Πίνακας 12 περιέχει τα σεν παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων πληθυσμού και γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης και της μέσης απόδοσης. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως μια ακραία αύξηση στον πληθυσμό και το πλήθος των γενεών δεν θα επέφερε κάποια σημαντική βελτίωση στην απόδοση, καθώς το τρίτο σεν δεν διαφέρει αρκετά από το τέταρτο σεν του πίνακα.



**Γράφημα 10:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο AN-ΑΠ.



Το Γράφημα 10, επιβεβαιώνει πως η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους. Ωστόσο παρατηρείται ότι μια μεγάλη αύξηση δεν επιφέρει σημαντική αλλαγή στην κατανομή των αποτελεσμάτων.

### 5.1.6 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αλγόριθμου Νυχτερίδας Και Αναζήτησης Κούκου

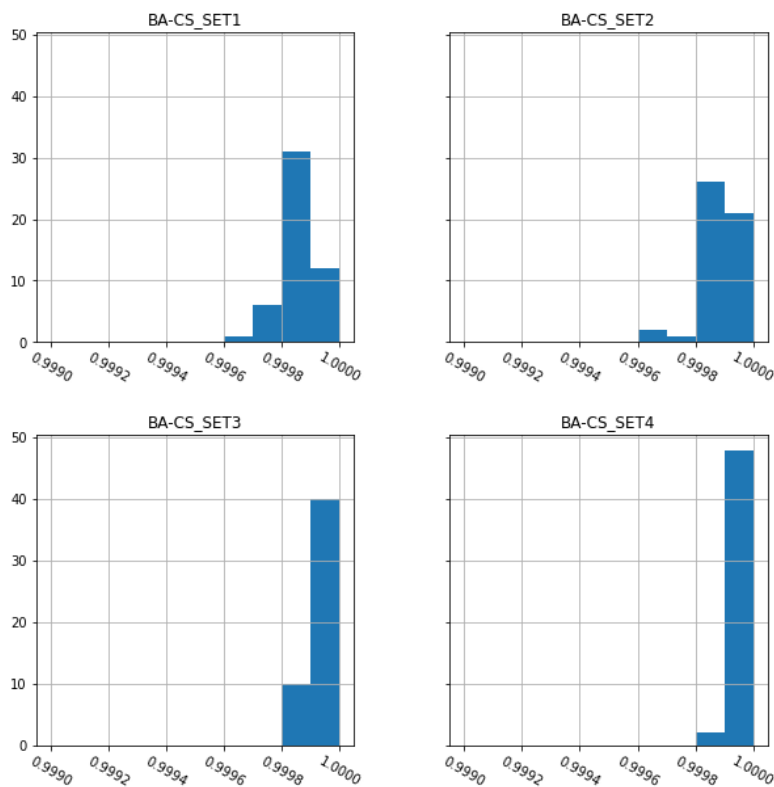
Στον **Error! Not a valid bookmark self-reference.** περιέχονται τα σεντ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από τον Αλγόριθμο Νυχτερίδας και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας, κατά την ρύθμιση των μοναδικών παραμέτρων. Όπως διαπιστώνεται τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα εμφανίζει το σεντ παραμέτρων που αποτελείται από αποτελεμάτι από τον ρυθμό μείωσης έντασης  $a_{BA}$  μεγέθους 1, την παράμετρο μείωσης ρυθμού εκπομπής παλμών  $\gamma_{BA}$  μεγέθους 1, τον αρχικό ρυθμό εκπομπής παλμών  $r_0$  μεγέθους 0.25, την αρχική ένταση  $A_0$  μεγέθους 8, την μέγιστη  $f_{max}$  και ελάχιστη  $f_{min}$  συχνότητα μεγέθους 8 και 2 αντίστοιχα, την παράμετρο κατανομής Levy  $\lambda$  μεγέθους 0.5, το μέγεθος βήματος  $s$  μεγέθους 2, τον συντελεστή κλίμακας μεγέθους βήματος  $a_{CS}$  μεγέθους 0.25 και την πιθανότητα αναγνώρισης αυγού  $p_a$  μεγέθους 0.5.

**Πίνακας 13:** Διαφορετικά σεντ παραμέτρων AN-AK.

Σεντ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
$a_{BA}$	0.9	0.5	0.2	1
$\gamma_{BA}$	0.3	0.5	0.9	1
$r_0$	0.05	0.15	0.2	0.25
$A_0$	5	1	6	8
$f_{max}$	4	6	10	8
$f_{min}$	0.1	0.5	1	2
$\lambda$	1.5	2	1	0.5
$s$	0.5	1	1.5	2
$a_{CS}$	0.01	0.05	0.1	0.25
$p_a$	0.25	0.1	0.3	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99995273	0.99995990	0.99996327	<b>0.99996566</b>
Μέση τιμή	0.99986259	0.99988682	0.99991832	0.99993150
Λοξότητα	-1.0736	-1.9547	-0.4436	-0.5061

Επίσης η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 11 όπου η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σεντ παραμέτρων αποκτά αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα

ανεξάρτητα πειράματα δίνουν τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.



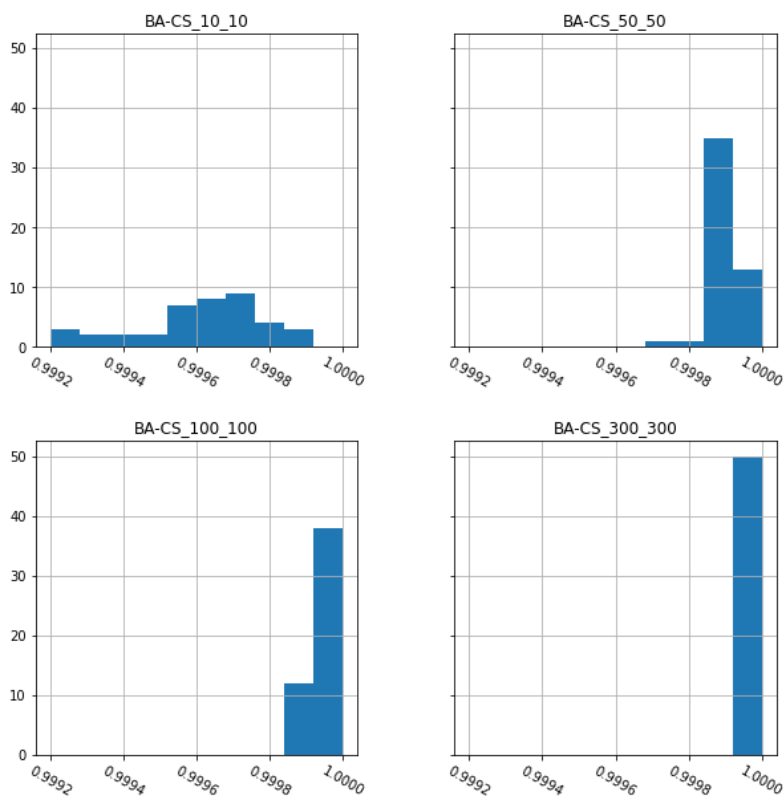
**Γράφημα 11:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων AN-AK.

Ο **Error! Not a valid bookmark self-reference.** περιέχει τα σετ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως μια ακραία αύξηση στον πληθυσμός και το πλήθος των γενεών δεν θα επέφερε κάποια σημαντική βελτίωση στην απόδοσης, καθώς το τρίτο σετ δεν διαφέρει αρκετά από το τέταρτο σετ του πίνακα.

Το Γράφημα 12 επιβεβαιώνει ότι η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

Πίνακας 14: Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο AN-AK.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
$a_{BA}$	1	1	1	1
$\gamma_{BA}$	1	1	1	1
$r_0$	0.25	0.25	0.25	0.25
$A_0$	8	8	8	8
$f_{max}$	8	8	8	8
$f_{min}$	2	2	2	2
$\lambda$	0.5	0.5	0.5	0.5
$s$	2	2	2	2
$a_{CS}$	0.25	0.25	0.25	0.25
$p_a$	0.5	0.5	0.5	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99986804	0.99995828	0.99996474	<b>0.99997299</b>
Μέση τιμή	0.99928442	0.99990234	0.99993244	0.99995591
Λοξότητα	-5.8311	-2.3748	-0.3293	-1.3422



Γράφημα 12: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο AN-AK.

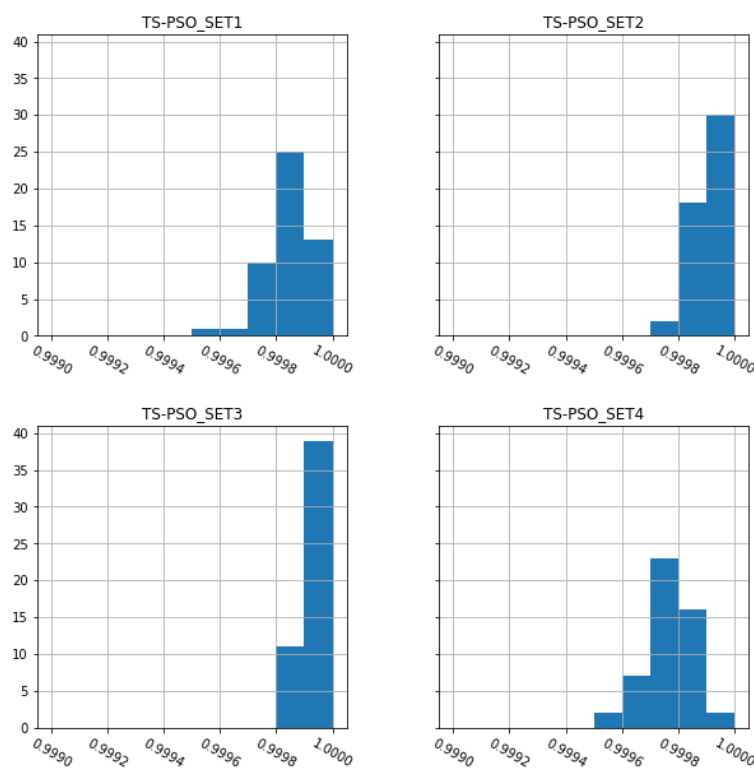
### 5.1.7 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις Και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Στον Πίνακα 24 περιέχονται τα σετ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως

διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα εμφανίζει το σετ παραμέτρων που αποτελείται από την μνήμη listabu μεγέθους 30, τον συντελεστή βάρους  $w$  μεγέθους 0.8 και τους παράγοντες μάθησης γνωστικού όρου  $c_1$  μεγέθους 0.5 και κοινωνικού όρου  $c_2$  μεγέθους 1.5.

**Πίνακας 15:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΑΑΚ-ΒΣΣ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
Μνήμη	20	10	30	50
$w$	0.5	0.8	1.5	2
$c_1$	0.5	0.5	1.5	1.5
$c_2$	0.5	1.5	0.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99995706	0.99996107	<b>0.99996975</b>	0.99991545
Μέση τιμή	0.99984115	0.99989433	0.99992700	0.99976936
Λοξότητα	-1.6262	-1.2475	-0.7578	-0.8528



**Γράφημα 13:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-ΒΣΣ.

Όπως παρατηρείται από το Γράφημα 13 η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σετ παραμέτρων εμφανίζει αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα

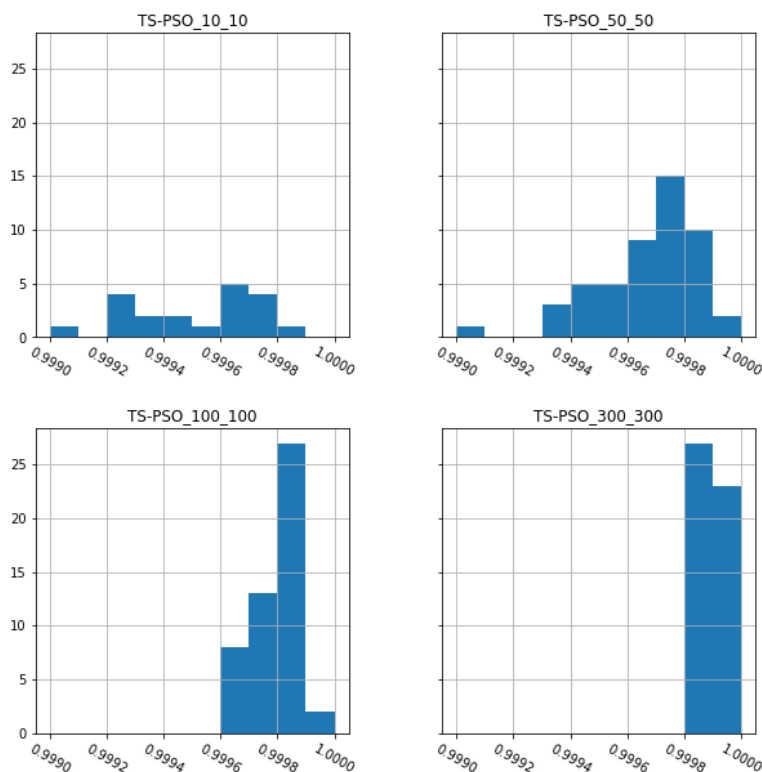
αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 16:** Διαφορετικά σεντ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΑΚΚ-ΒΣΣ.

Σεντ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
Μνήμη	30	30	30	30
$w$	1.5	1.5	1.5	1.5
$c_1$	1.5	1.5	1.5	1.5
$c_2$	0.5	0.5	0.5	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99981028	0.99990729	0.99993201	<b>0.99995699</b>
Μέση τιμή	0.99834745	0.99967301	0.99980111	0.99989860
Λοξότητα	-1.9737	-1.1864	-0.5653	0.2603

Ο Όπως παρατηρείται από το Γράφημα 13 η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σεντ παραμέτρων εμφανίζει αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

Πίνακας 16 περιέχει τα σεντ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της κατανομής των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση.



**Γράφημα 14:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-ΒΣΣ.

Επιπρόσθετα από το Γράφημα 14 επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

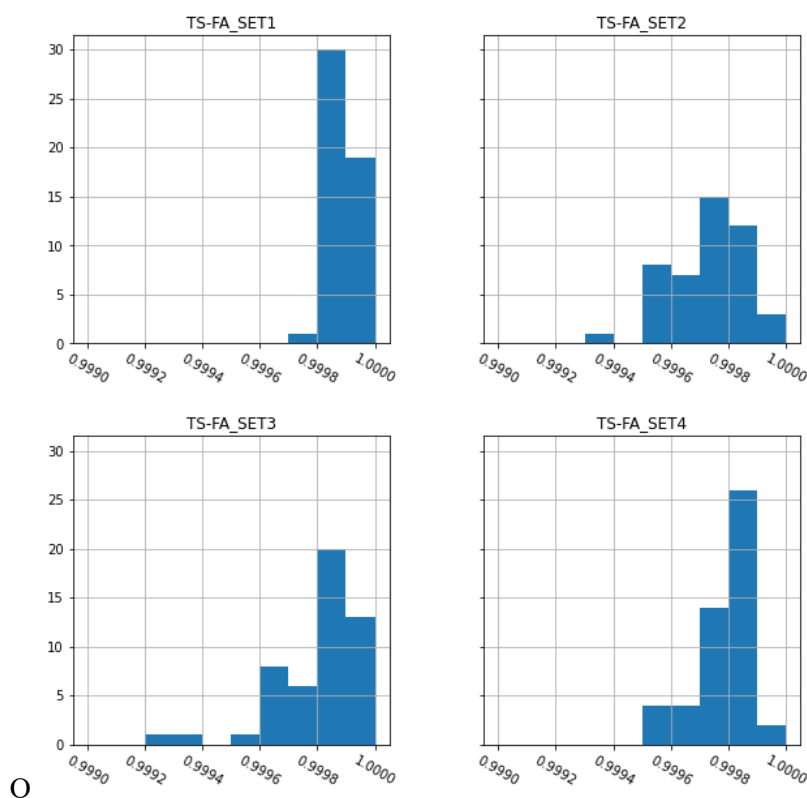
### 5.1.8 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις Και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας

Στον Πίνακα 17 περιέχονται τα σετ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και τον Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας, κατά την ρύθμιση των παραμέτρων τους. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα εμφανίζει το σετ παραμέτρων που αποτελείται από την μνήμη λίστα tabu μεγέθους 20, την παράμετρο τυχαιότητας  $a_{FA}$  μεγέθους 0.2, την ελκυστικότητα μηδενικής απόστασης  $\beta_0$  μεγέθους 1, την παράμετρο μεταβολής ελκυστικότητας  $\gamma_{FA}$  μεγέθους 1 και τον ρυθμό μείωσης τυχαιότητας  $\delta$  μεγέθους 0.98.

**Πίνακας 17:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΑΑΚ-ΑΠ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
Μνήμη	20	10	30	50
$a_{FA}$	0.2	0.4	0.6	0.8
$\beta_0$	1	2	0.5	0.8
$\gamma_{FA}$	1	0.5	2	0.8
$\delta$	0.98	0.2	0.5	1.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99994755	0.99991694	0.99995415	0.99991661
Μέση τιμή	<b>0.99987484</b>	0.99959170	0.99980229	0.99978085
Λοξότητα	-0.5353	-3.8229	-1.7830	-1.1647

Όπως παρατηρείται από το Γράφημα 15 η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σετ παραμέτρων εμφανίζει αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

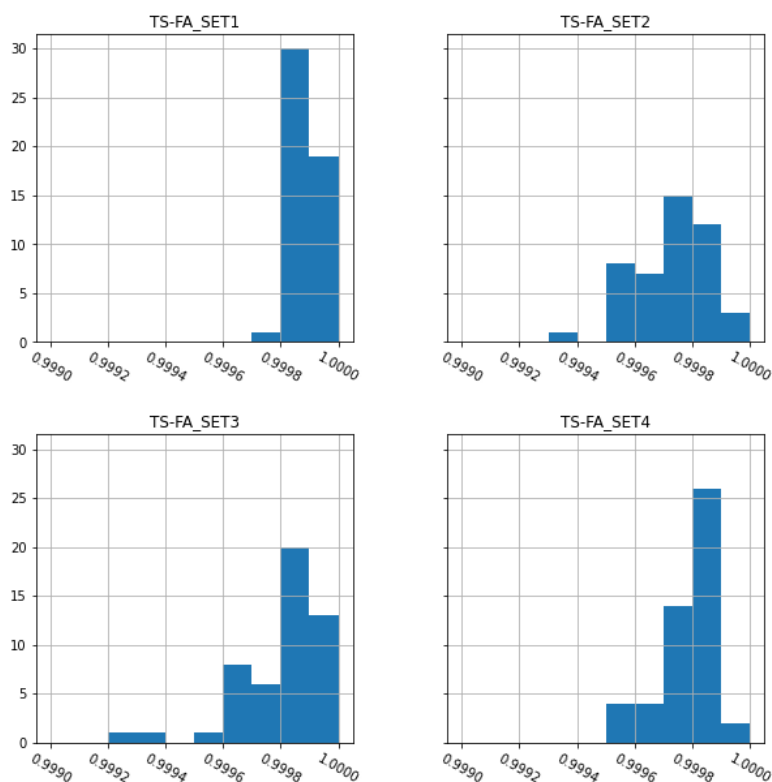


Γράφημα 15: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων ΑΚΚ-ΑΠ.

Επίσης από το Γράφημα 16 παρατηρείται ότι η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Αναλυτικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων

φαίνεται να εμφανίζει αρνητική λοξότητα, το οποίο σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ παράλληλα φαίνονται γίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

Πίνακας 18 περιέχει τα σετ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της κατανομής των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση.



**Γράφημα 15:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων ΑΚΚ-ΑΠ.

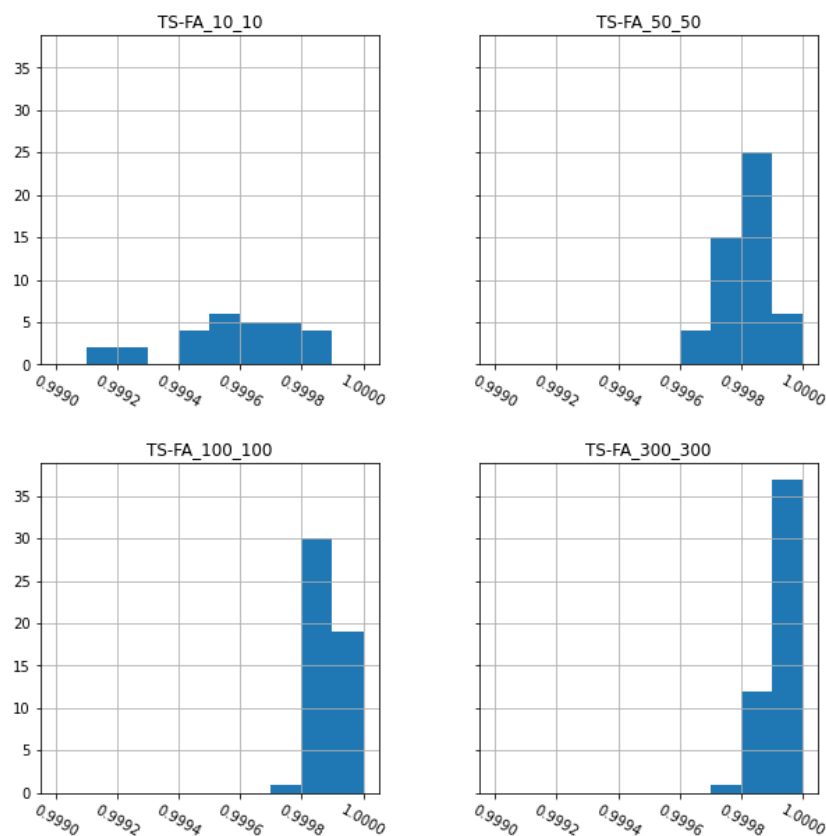
Επίσης από το Γράφημα 16 παρατηρείται ότι η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Αναλυτικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να εμφανίζει αρνητική λοξότητα, το οποίο σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ παράλληλα φαίνονται γίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 18:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΑΚΚ-ΑΠ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300



Πληθυσμός	10	50	100	300
Μνήμη	20	20	20	20
$a_{FA}$	0.2	0.2	0.2	0.2
$\beta_0$	1	1	1	1
$\gamma_{FA}$	1	1	1	1
$\delta$	0.98	0.98	0.98	0.98
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99985980	0.99994406	0.99996058	<b>0.99996878</b>
Μέση τιμή	0.99873057	0.99981864	0.99987646	0.99991416
Λοξότητα	-1.8173	-0.5739	-0.6701	-1.2453



Γράφημα 16: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΚΚ-ΑΠ.

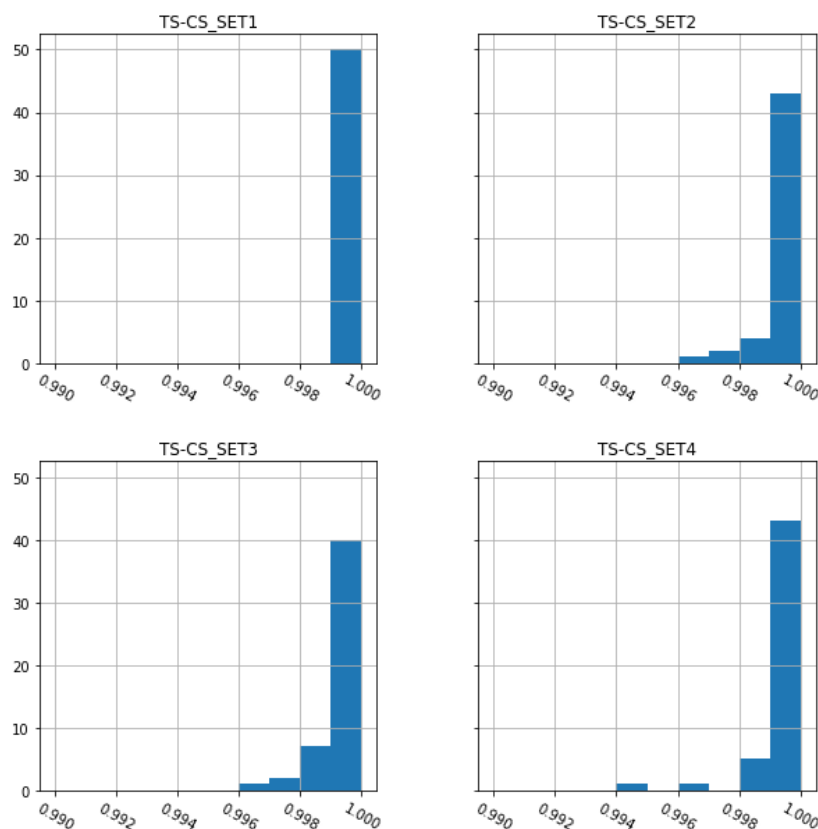
### 5.1.9 Παράμετροι Υβριδικού Σχήματος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις Και Αναζήτησης Κούκου

Στον Πίνακα 19 περιέχονται τα σετ των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υβριδικό σχήμα που αποτελείται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις και την Αναζήτηση Κούκου, κατά την ρύθμιση των μοναδικών παραμέτρων. Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, την καλύτερη απόδοση, μέση απόδοση και αρνητική λοξότητα εμφανίζει το σετ παραμέτρων που αποτελείται από την μνήμη λίστα tabu μεγέθους 20, την παράμετρο κατανομής Levy  $\lambda$  μεγέθους 0.5, το μέγεθος βήματος  $s$  μεγέθους 2, τον συντελεστή κλίμακας μεγέθους βήματος  $a_{CS}$  μεγέθους 0.25 και την πιθανότητα αναγνώρισης αυγού  $p_a$  μεγέθους 0.5.

Από το Γράφημα 17 παρατηρείται ότι η κατανομή των αποτελεσμάτων για το εν λόγω σετ παραμέτρων εμφανίζει αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση των εν λόγω παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα τις λεπτόκυρτες κατανομές, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 19:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΑΑΚ-ΑΚ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	100	100	100	100
Πληθυσμός	100	100	100	100
Μνήμη	20	10	30	50
$\lambda$	1.5	2	1	0.5
$s$	0.5	1	1.5	2
$a_{CS}$	0.01	0.05	0.1	0.25
$p_a$	0.25	0.1	0.3	0.5
Καλύτερο αποτέλεσμα	<b>0.99994239</b>	0.99993442	0.99995023	0.99994864
Μέση τιμή	0.99984	0.99943	0.99939	0.99943
Λοξότητα	-1.6528	-2.1700	-2.09455	-4.0434



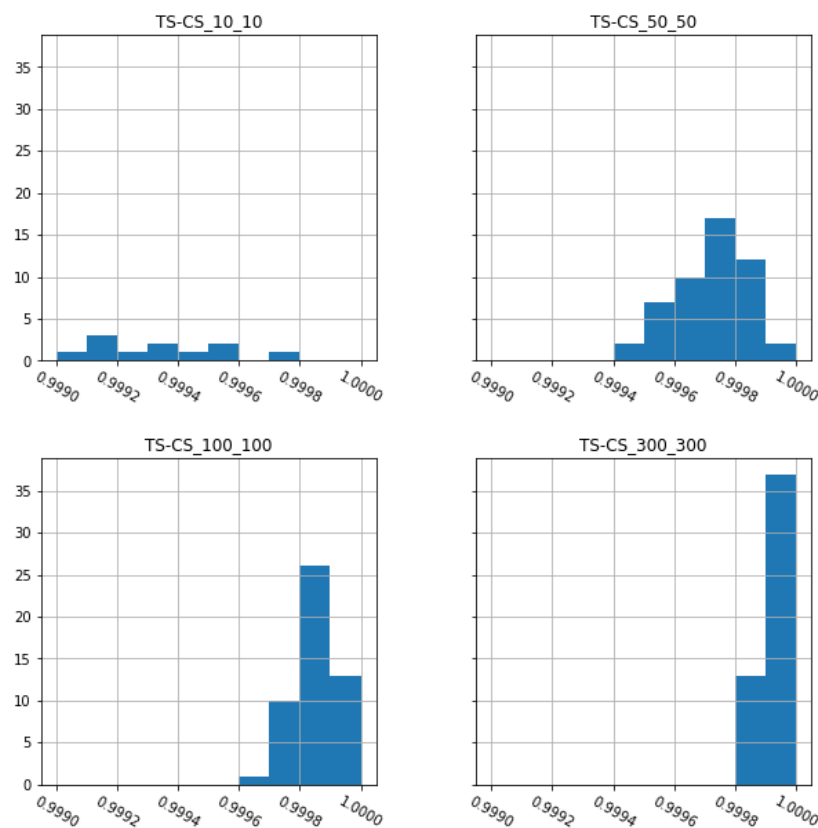
**Γράφημα 17:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διάφορα σετ παραμέτρων ΑΑΚ-ΑΚ.

Ο Πίνακας 20 περιέχει τα σετ παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ρύθμιση των κοινών παραμέτρων. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η αύξηση του πληθυσμού και των γενεών σε 300 είχε παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση και μέση απόδοση. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως μια ακραία αύξηση στον πληθυσμό και το πλήθος των γενεών δεν θα επέφερε κάποια σημαντική βελτίωση στην απόδοσης, καθώς το τρίτο σετ δεν διαφέρει αρκετά από το τέταρτο σετ του πίνακα.

Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από το Γράφημα 18, όπου η αύξηση των τιμών των παραμέτρων του πληθυσμού και των γενεών, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου. Ειδικότερα, όσο αυξάνονται οι εν λόγω παράμετροι η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνεται να παρουσιάζει αρνητική λοξότητα, γεγονός που σημαίνει ότι εμφανίζονται κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο, ενώ επίσης φαίνονται λεπτόκυρτες, δηλαδή τα αποτελέσματα συσσωρεύονται γύρω από τη διάμεσο ή την μέση τιμή τους.

**Πίνακας 20:** Διαφορετικά σετ παραμέτρων ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-ΑΚ.

Σετ Παραμέτρων	1	2	3	4
Πλήθος γενεών	10	50	100	300
Πληθυσμός	10	50	100	300
Μνήμη	20	20	20	20
$\lambda$	1.5	1.5	1.5	1.5
$s$	0.5	0.5	0.5	0.5
$a_{CS}$	0.01	0.01	0.01	0.01
$p_a$	0.25	0.25	0.25	0.25
Καλύτερο αποτέλεσμα	0.99975706	0.99994612	0.99995875	<b>0.99996393</b>
Μέση τιμή	0.99777172	0.99971741	0.99984961	0.99991316
Λοξότητα	-2.3756	-0.4685	-0.5954	-0.3745



Γράφημα 18: Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικό ΠΚΑΣ στο ΑΑΚ-ΑΚ.

## 5.2 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 21, ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος(ΜΠ2) αναδεικνύονται αντίστοιχα στον Πίνακα 22. Πιο συγκεκριμένα κάθε γραμμή περιγράφει τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που αποτελούν το  $i$ -οστό υποσύστημα.

Πίνακας 21: Δεδομένα σειριακού και περίπλοκου συστήματος.

Υποσύστημα $i$	$10^5 a_i$	$\beta_i$	$v_i$	$w_i$
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 22: Δεδομένα σειριακού - παράλληλου συστήματος.

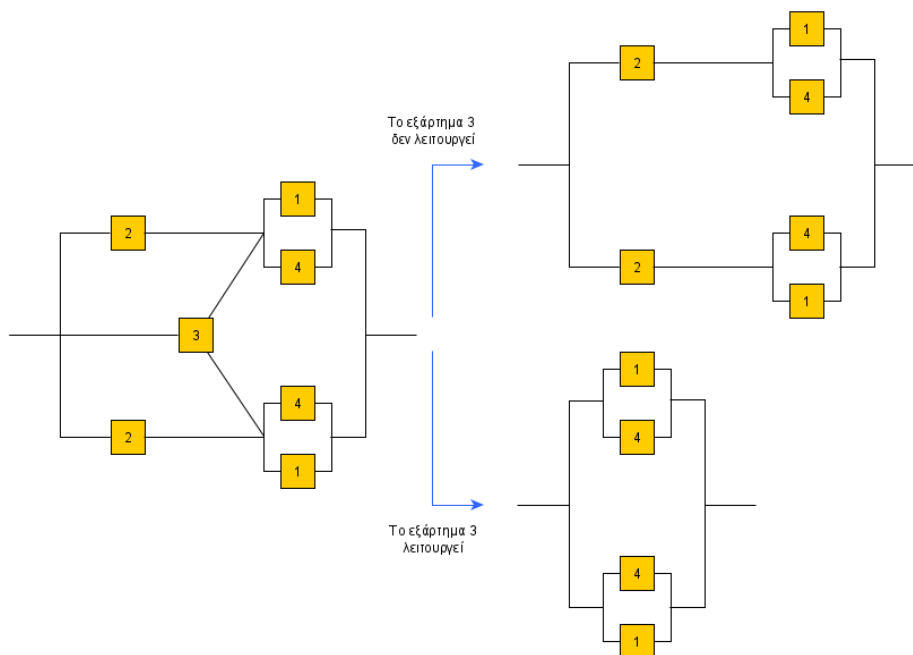
Υποσύστημα $i$	$10^5 a_i$	$\beta_i$	$v_i$	$w_i$
1	2.500	1.5	2	3.5
2	1.450	1.5	4	4
3	0.541	1.5	5	4
4	0.541	1.5	8	3.5
5	2.100	1.5	4	4.5

Επιπρόσθετα τα δεδομένα που αφορούν την Μελέτη περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης (ΜΠ4) συλλέχθηκαν από την εργασία των (Kanagaraj, Ronnambalam and Jawahar, 2013) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 23.

**Πίνακας 23:** Δεδομένα συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.

Υποσύστημα $i$	$10^5 a_i$	$\beta_i$	$v_i$	$w_i$
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 24 αναγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην



Σχήμα 3.10: Πιθανά ενδεχόμενα συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα.

Μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας (ΜΠ7) τα οποία αντλήθηκαν από την εργασία των (Zhang et al., 2013).

Στον Πίνακα 25 αναγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων (ΜΠ8) και στην Μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων (ΜΠ9), 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 24: Δεδομένα συστήματος μεγάλης κλίμακας.

Υποσύστημα $i$	$10^5 a_i$	$\beta_i$	$v_i$	$w_i$
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 25: 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
<b>d</b>		3.2150	3.4710	3.3247	2.6236	3.4288

Τέλος στον Πίνακα 26 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 26:** Δεδομένα συστήματος γραμμής παραγωγή εργοστασίου φαρμάκων.

Υποσύστημα $i$	$10^5 a_i$	$\beta_i$	$v_i$	$w_i$
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 27 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 27:** 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 Πίνακας 27, οι μελέτες περίπτωσης ΜΠ5, ΜΠ6, ΜΠ8 και ΜΠ9 δεν εμφανίζουν τα παράπανω 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. Υποδεικνύεται ο αναγνώστης να ανατρέξει στο κεφάλαιο Προβλήματα Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας.



### 5.3 Αποτελέσματα

Στην βιβλιογραφία γίνεται εφαρμογή πληθώρας αλγορίθμων, όπου ως βασικό μέτρο σύγκρισης και επιλογής μιας μεθόδου αποτελεί η ποιότητα της λύσης (συνολική αξιοπιστία) που αποφέρει σε πραγματικό χρόνο (Mellal and Zio, 2016).

Για την μέτρηση της στατιστικής απόδοσης των υβριδικών σχημάτων, επιλέχθηκαν τα καλύτερα σετ παραμέτρων για κάθε υβριδικό σχήμα, που περιέχονται στον Πίνακας 2, ενώ για τις παραμέτρους του πληθυσμού και των γενεών, που αποτελούν το ΠΚΑΣ, χρησιμοποιήθηκαν οι μικρότερες τιμές που συναντώνται στην βιβλιογραφία, προκειμένου η σύγκριση τους με αυτές τις βιβλιογραφίας να γίνει στην ίδια βάση. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν 50 ανεξάρτητες εκτελέσεις του εκάστοτε υβριδικού σχήματος σε κάθε μια από τις μελέτες περίπτωσης και τα αποτελέσματα των μεθόδων που αναπτύχθηκαν για κάθε μια από τις μελέτες περίπτωσης περιέχονται στους παρακάτω πίνακες.

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. Ιδανικά, ως προς την συνολική αξιοπιστία αναμένεται να παρατηρηθεί μέση απόδοση κοντά στην καλύτερη δυνατή απόδοση συνοδευόμενη από μια αρκετά μικρή τυπική απόκλιση και αρνητική λοξότητα. Η εν λόγω εικασία υποδηλώνει, αντίστοιχα, πως η εξεταζόμενη μέθοδος αποδίδει καλές λύσεις, είναι αρκετά σταθερή ως προς την απόδοση αυτών και η κατανομή αυτών παρουσιάζει τις περισσότερες λύσεις δεξιά της μέσης απόδοσης, κοντά στο πιο βέλτιστο δυνατό.

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.

Η συγκεκριμένη παρατήρηση γίνεται, καθώς όπως διαπιστώνεται σε προηγούμενη ενότητα, όταν αυξάνεται ο αριθμός των κοινών παραμέτρων αυξάνει η απόδοση των λύσεων παράλληλα με τον χρόνο υπολογισμού της. Η λογική κατά την οποία επιλέχθηκαν οι κοινές παράμετροι είναι πως μεγαλύτερο ενδιαφέρον αποτελεί να εξεταστεί η συμπεριφορά των υβριδικών σχημάτων με παραμέτρους που αποδίδουν λύσεις σε πρακτικό (σύντομο) χρόνο, εφόσον πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην Εφαρμογή Περιβάλλοντος Διεπαφής Χρήστη (Graphical User Interface). Η εν λόγω εφαρμογή σκοπεύει να συνεισφέρει κατά την λήψη απόφασης σε μια από της προηγούμενες μελέτες περίπτωσης, με συνέπεια ο χρόνος υπολογισμού που απαιτείται να πρέπει να είναι σύντομος.

Πίνακας 28: 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 $\alpha$	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑ $\Sigma$	Βαθμός
ΓΑ-ΒΣΣ	[3 2 2 3 3]	0.7545105	0.8800261	0.8711731	0.7202620	0.7787442	<b>0.9238893</b>	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 29: 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 $\alpha$	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑ Σ	Βαθμός
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	<b>0.9999719</b>	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>													
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	-
ΠΔΤΦΑΜ	[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 30: 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	Βαθμός
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	<b>0.99986044</b>	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>													
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 05	0.99988935	-	-	4.0e-20	-	13500	-
ΠΔΤΦΑ Μ	[3 3 2 4 1]	0.8279702 76262	0.8578747 58586	0.9141864 04228	0.6483553 86813	0.7035753 11047	0.99988963	-	-	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	-	-	3.7e-23	-	5000	-

Πίνακας 31: 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 $\alpha$	Τυπική Απόκλιση	Χρόνος	ΠΚΑΣ	Βαθμός
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	<b>0.999949</b>	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>												
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 32: 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	Βαθμός
ΒΣΣ	0.9259632	0.9379067	0.7922623	0.9478121	0.9313917	<b>5.02049</b>	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>													
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 33: 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	Βαθμός
ΒΣΣ	0.776528 78	0.877546 51	0.688148 55	0.813771 75	<b>414.923</b>	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>												
ΣΑΦΠ	0.825582 31742311	0.890154 65267833	0.627662 61897607	0.728849 47949575	390.570	-	-	-	7.3e-10	-	5000	-

Πίνακας 34: 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	Βαθμός
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]	<b>0.6190610</b>	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 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 35: 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	Βαθμός
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]	<b>0.999998840</b> <b>724242</b>	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>								
ΣΑΦΠ	[4 4 5 6 1 1 2 3 2 2]	0.998721878 906043	-	-	7.2e-19	-	5000	-

Πίνακας 36: 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	Βαθμός
ΓΑ	[2 3 4 5 5 3 3 5 4 2 1 3 3 1 2]	0.985167772 820719	0.2357551 06097489	1.0743	0.3857	10.060	5000	2
ΑΝ	[8 6 7 10 6 5 1 1 3 2 1 1 1 1 3]	<b>0.999109034</b> <b>3530084</b>	0.039963 17440476	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
<b>Συγκρινόμενες Μέθοδοι</b>								
ΣΑΦΠ	[8 5 7 9 6 7 1 1 3 2 1 1 1 1 1]	0.999259685 931657	-	-	1.4e-9	-	5000	-

Πίνακας 37: 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	Βαθμός
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]	<b>0.9318870</b>	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 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 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**

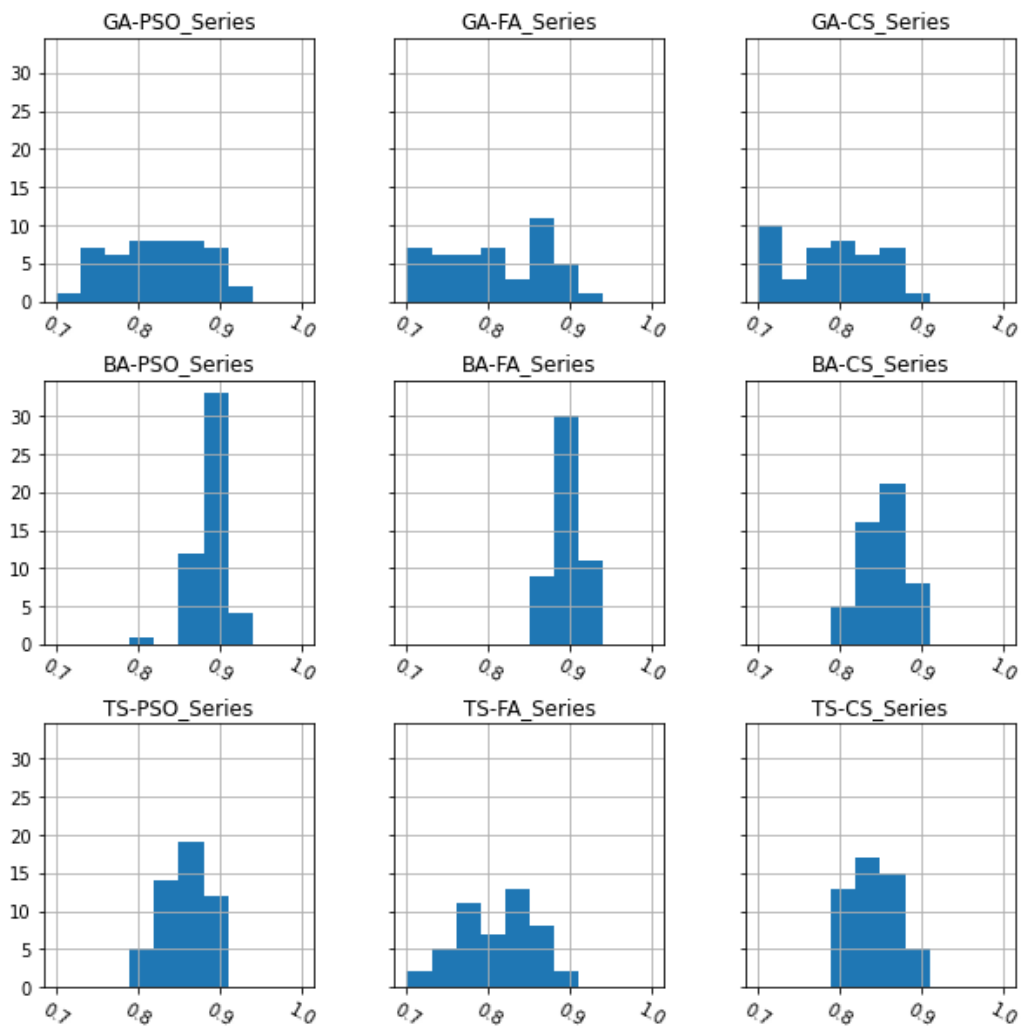
---

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	-
------	---------------------	---	------------------	---	---	---------	------	---

---

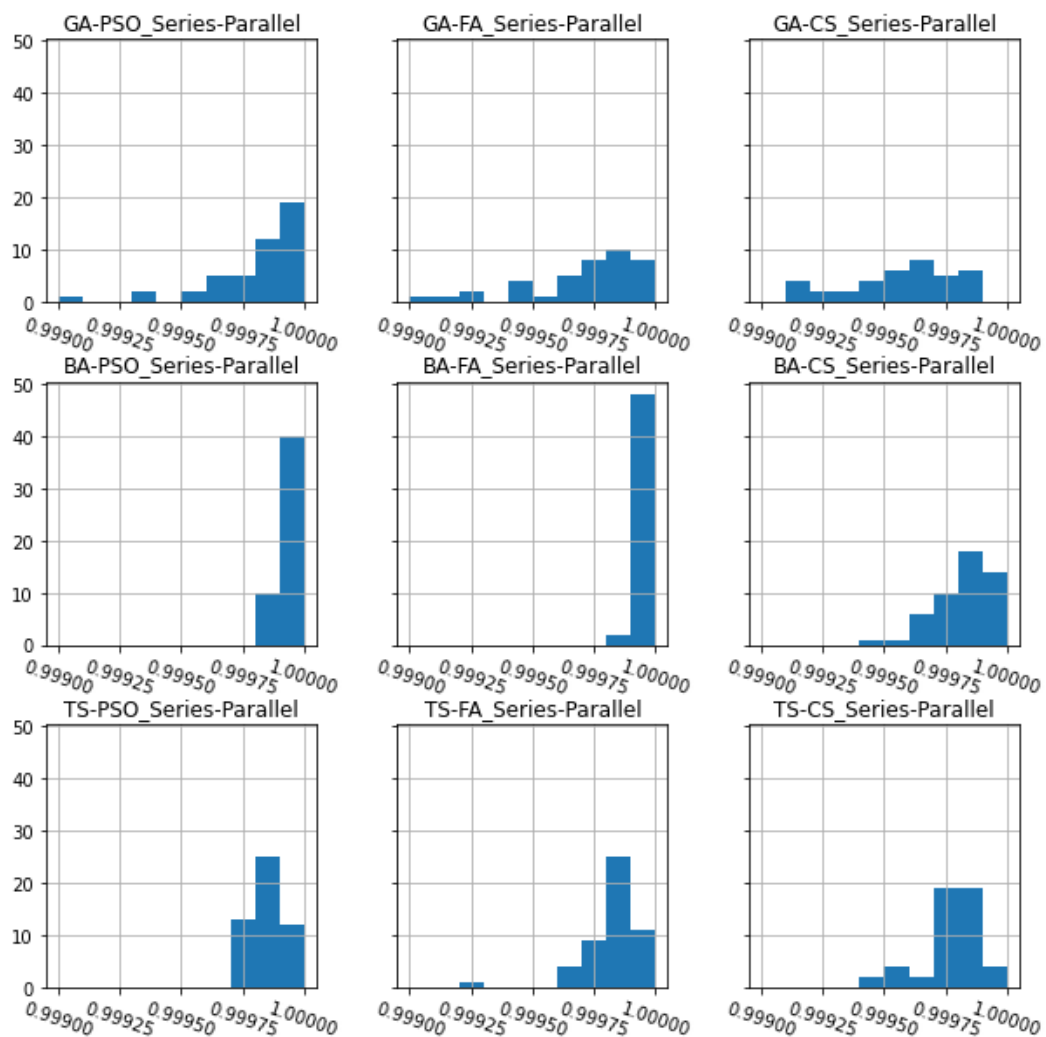
Παρακάτω ερμηνεύονται τα αποτελέσματα του υβριδικού σχήματος που πέτυχε την καλύτερη στατιστική απόδοση, για την εκάστοτε μελέτη περίπτωσης. Για τον έλεγχο αποδοτικότητας του εν λόγω υβριδικού σχήματος έγινε η σύγκριση του με την μέθοδο της βιβλιογραφίας που παρουσιάζει την καλύτερη στατιστική απόδοση.

Αναφορικά με την μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος, στον Πίνακα 28, 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  $2.5e-16$ .



**Γράφημα 19:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού συστήματος.

Οι κατανομές των αποτελεσμάτων κάθε υβριδικού σχήματος για την μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος παρουσιάζονται στο Γράφημα 19. Όπως φαίνεται από το εν λόγω γράφημα, τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από τον AN εμφανίζουν λεπτόκυρτες κατανομές, δηλαδή τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων συσσωρεύονται γύρω από την μέση τιμή τους. Επίσης αποκτούν αρνητική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Συνεπώς τα εν λόγω υβριδικά εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα απόδοσης των λύσεων, σε αντίθεση με τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από ΓΑ και ΑΑΚ που παρουσιάζουν πλατύκυρτες και μεσόκυρτες κατανομές, αντίστοιχα.

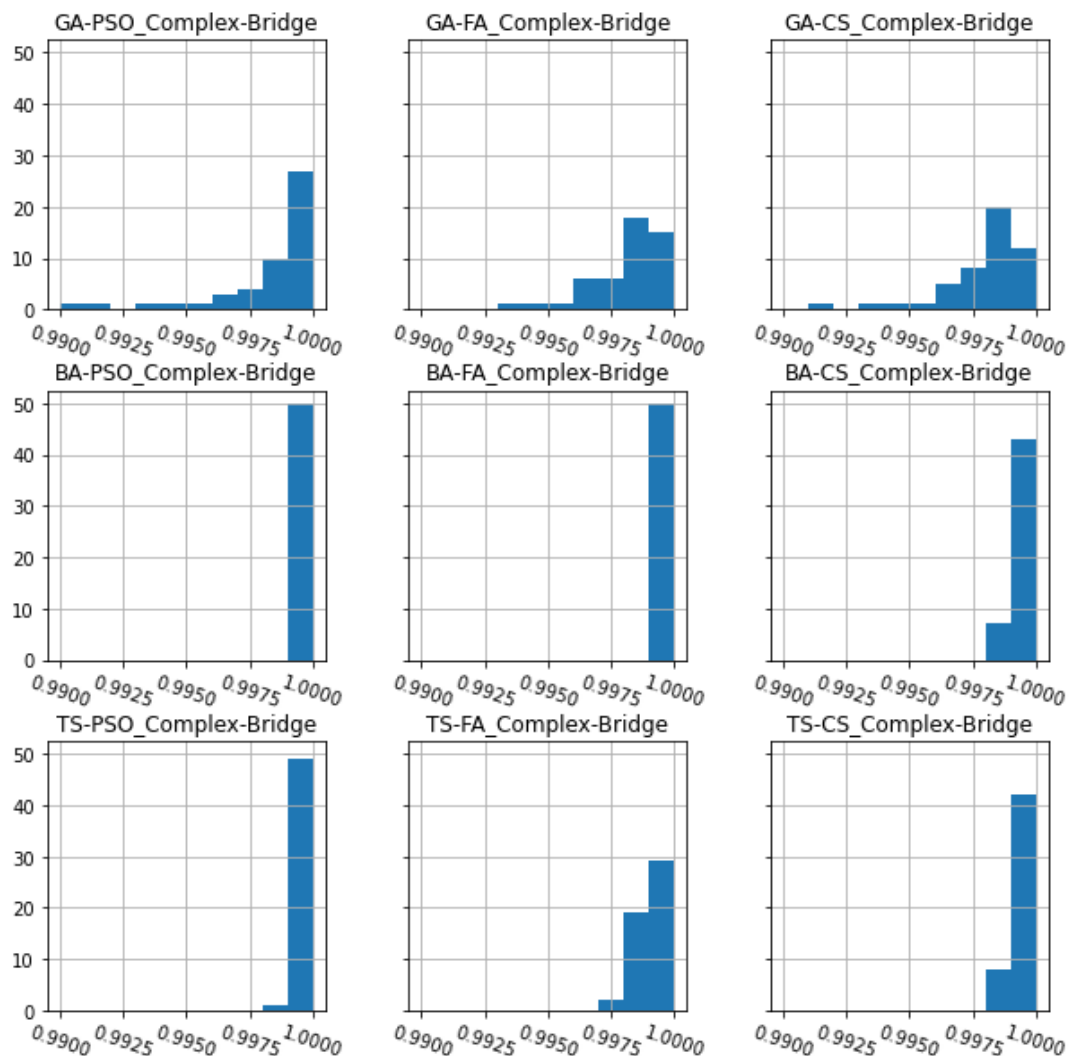


**Γράφημα 20:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης σειριακού – παράλληλο συστήματος.

Σχετικά με τον

Πίνακας 29 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.

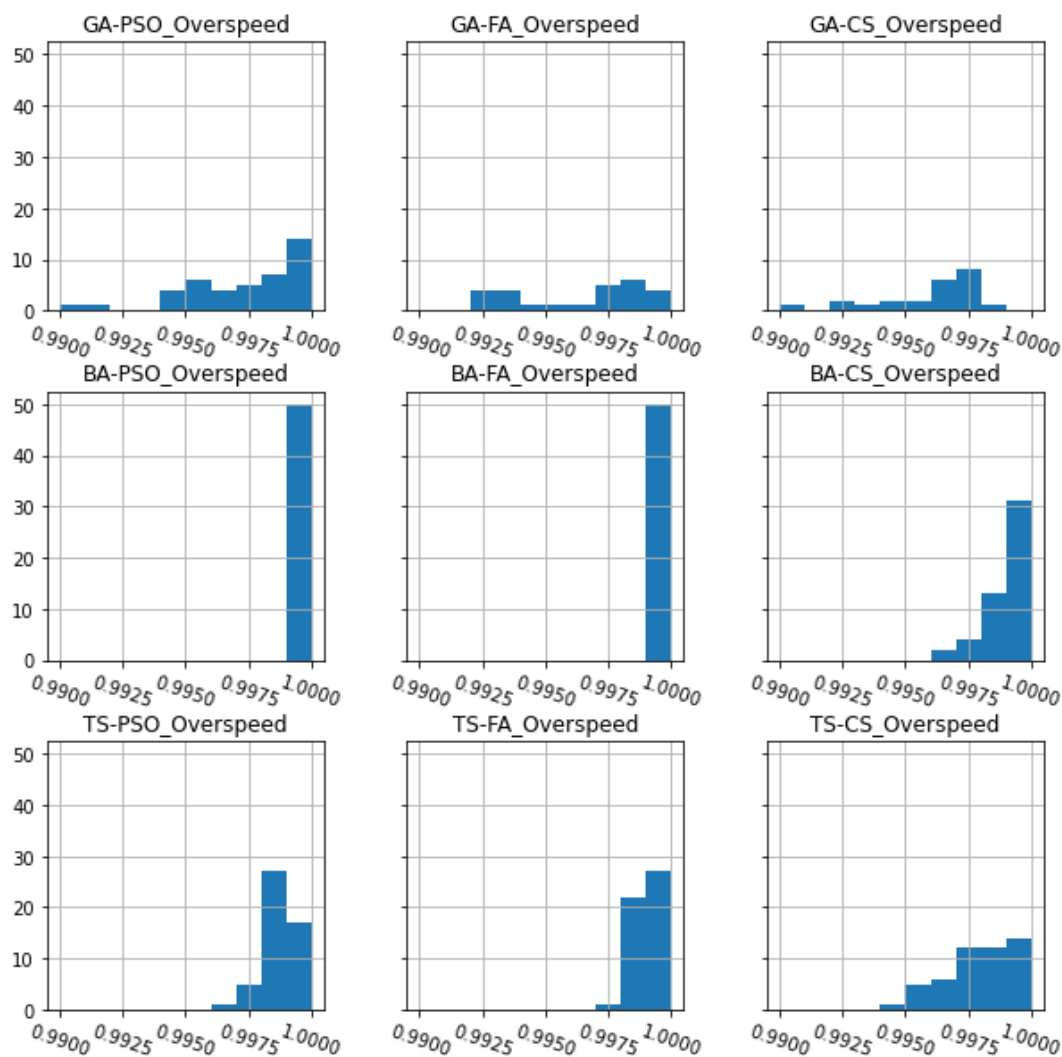
Το Γράφημα 20 παρουσιάζει τις κατανομές των αποτελεσμάτων των υβριδικών σχημάτων για την μελέτη περίπτωσης σειριακού – παράλληλου συστήματος. Όπως φαίνεται από το γράφημα, τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από τον AN εμφανίζουν λεπτόκυρτες κατανομές που αποκτούν αρνητική λοξότητα. Συνεπώς τα εν λόγω υβριδικά εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα απόδοσης των λύσεων, σε αντίθεση με τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από ΓΑ και ΑΑΚ που παρουσιάζουν πλατύκυρτες και μεσόκυρτες κατανομές, αντίστοιχα.



**Γράφημα 21:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας.

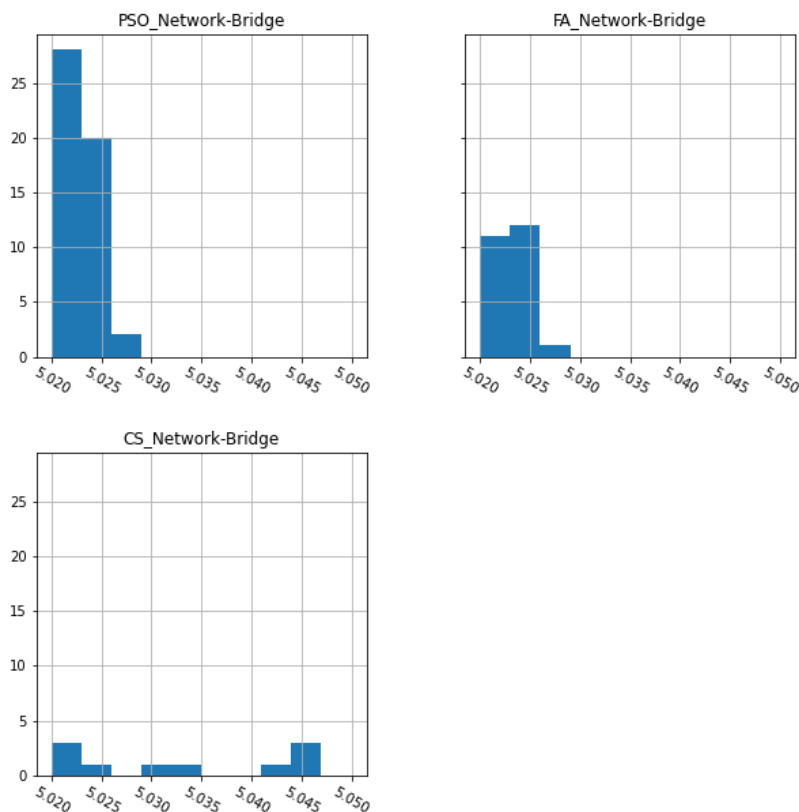
Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας και μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 30 και Πίνακα 31 αντίστοιχα, ανέδειξαν το AN-ΑΠ να υπερνικά ως προς συνολική αξιοπιστία 0.999860 και 0.999949. Επίσης, το AN-ΑΠ 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 συνολικής αξιοπιστίας.





**Γράφημα 22:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης.

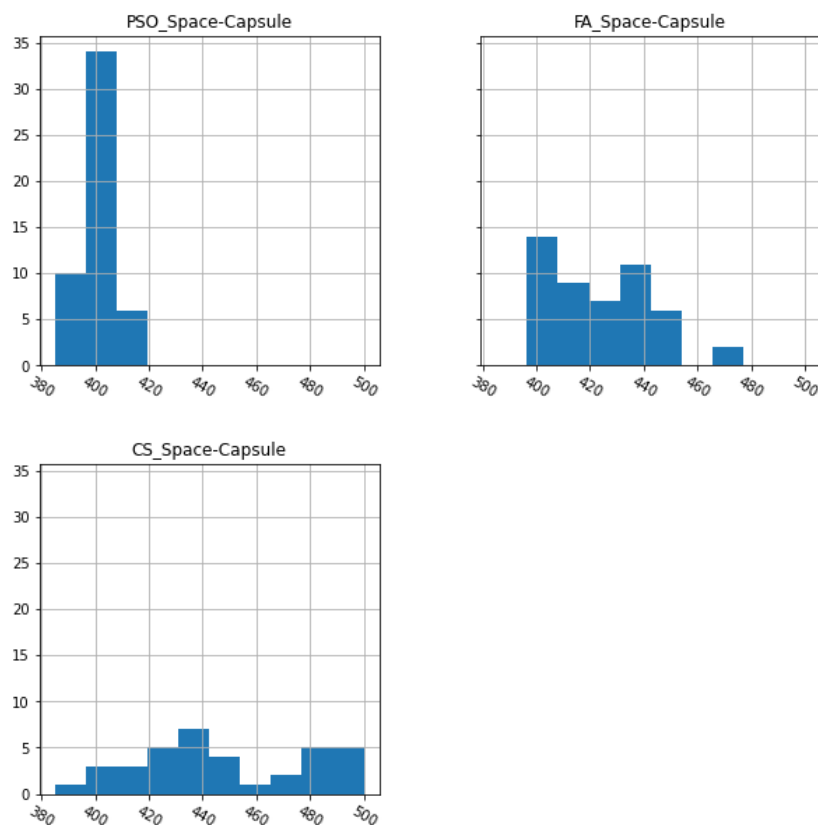
Οι κατανομές των αποτελεσμάτων των υβριδικών σχημάτων για την μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας και συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης παρουσιάζονται στο Γράφημα 21 και Γράφημα 22 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από τα γραφήματα, τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από τον AN εμφανίζουν λεπτόκυρτες κατανομές που αποκτούν αρνητική λοξότητα. Αυτό σημαίνει ότι τα εν λόγω υβριδικά να εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα απόδοσης των λύσεων, σε αντίθεση με τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από GA και AAK που παρουσιάζουν πλατύκυρτες και μεσόκυρτες κατανομές, αντίστοιχα.



**Γράφημα 23:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου.

Οι Πίνακας 32 - Πίνακας 33 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.

Το Γράφημα 23 παρουσιάζει τις κατανομές των αποτελεσμάτων των υβριδικών σχημάτων για την μελέτη περίπτωσης περίπλοκου συστήματος γέφυρας δικτύου. Οι κατανομές των ΒΣΣ και ΑΠ αποκτούν θετική λοξότητα, δηλαδή οι ανεξάρτητες εκτελέσεις αποδίδουν τιμές κοντά στο ελάχιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, οι προαναφερθείς μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα λεπτόκυρτες κατανομές σε αντίθεση με την ΑΚ που εμφανίζει πλατύκυρτη.

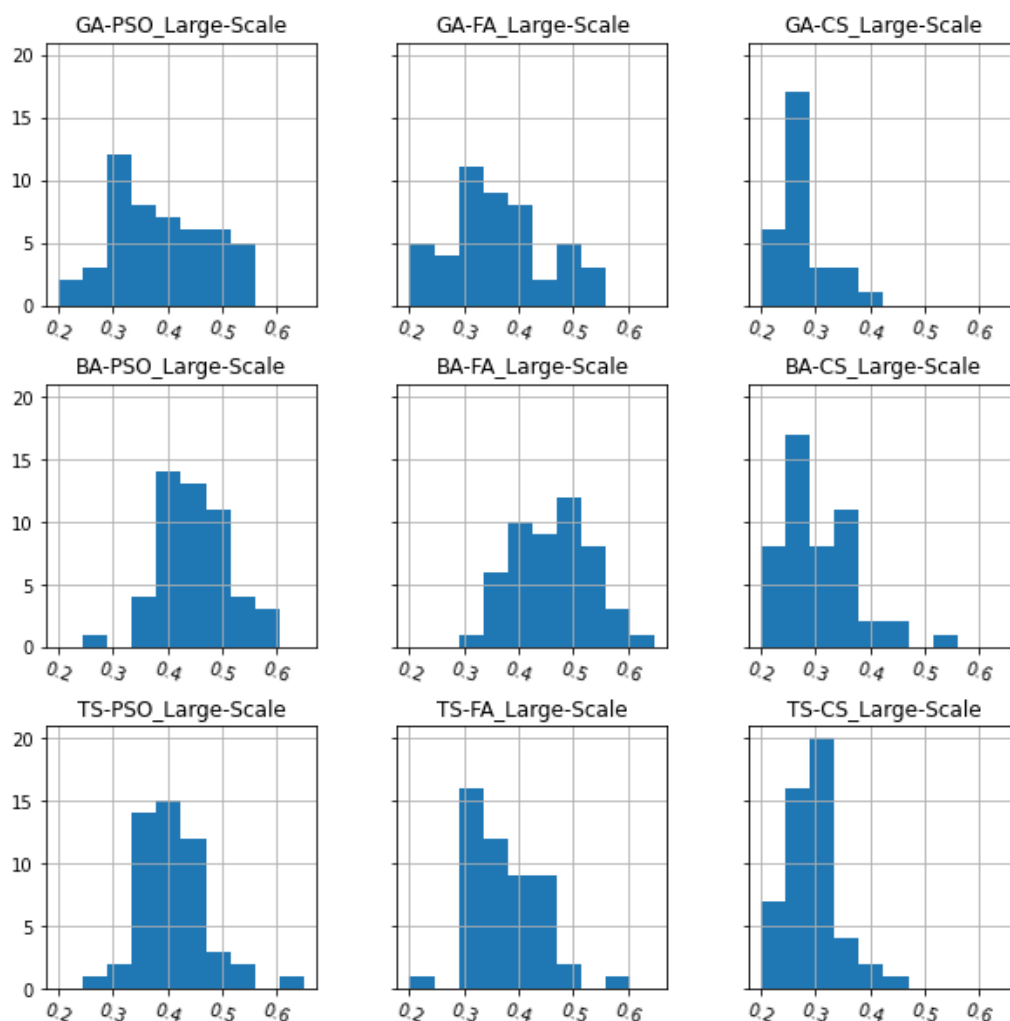


**Γράφημα 24:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα.

Αντίστοιχα οι κατανομές των αποτελεσμάτων των υβριδικών σχημάτων για την μελέτη περίπτωσης συστήματος υποστήριξης ζωής σε διαστημική κάψουλα παρουσιάζονται στο Γράφημα 24. Οι κατανομές των ΒΣΣ και ΑΠ αποκτούν θετική λοξότητα με τις περισσότερες τιμές να βρίσκονται κοντά στο ελάχιστο που έχει επιτευχθεί. Επίσης, η ΒΣΣ έχει ως αποτέλεσμα λεπτόκυρτη κατανομή σε αντίθεση με τις ΑΠ και ΑΚ που εμφανίζουν μεσόκυρτη και πλατύκυρτη, αντίστοιχα.

Σχετικά με την μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας τα αποτελέσματα που περιέχονται στον

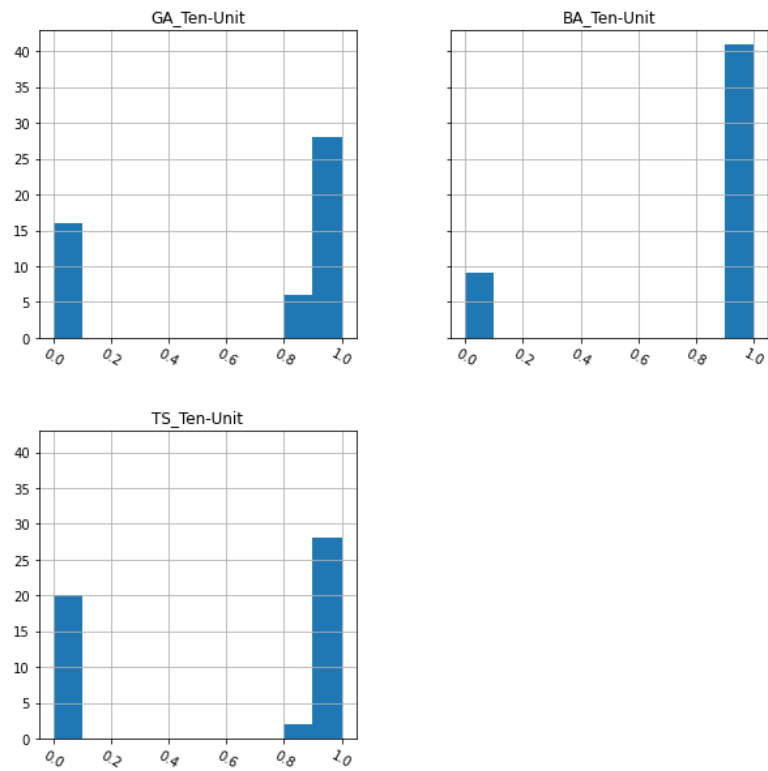
Πίνακας 34 ανέδειξαν την AN-ΑΠ να υπερνικά των υπολοίπων υβριδικών σχημάτων με μέγιστη συνολική αξιοπιστία 0.619061. Επιπρόσθετα εμφανίζει την καλύτερη μέση απόδοση 0.461725 με ικανοποιητική τυπική απόκλιση  $6.9825e-2$  καθορίζοντας την σταθερή ως προς την απόδοση της. Συγκρίνοντας το με τα αποτελέσματα 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.



**Γράφημα 25:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας.

Στο Γράφημα 25 παρουσιάζονται οι κατανομές των αποτελεσμάτων για την μελέτη περίπτωσης συστήματος μεγάλης κλίμακας. Όπως φαίνεται, οι κατανομές των αποτελεσμάτων παρουσιάζουν θετική λοξότητα, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων βρίσκονται μακριά από το μέγιστο που έχει επιτευχθεί. Επίσης οι κατανομές

παρουσιάζουν πλατύκυρτες και μεσόκυρτες κατανομές. Ωστόσο η κατανομή της AN-ΑΠ εμφανίζει την καλύτερη κατανομή, καθώς φαίνεται να αποκτά οριακά αρνητική λοξότητα.

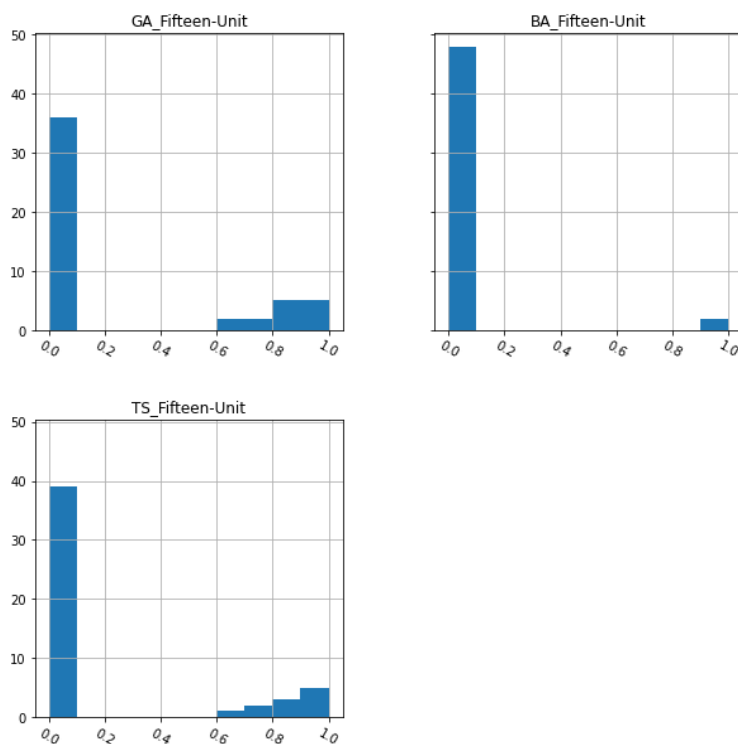


**Γράφημα 26:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δέκα υποσυστημάτων.

Οι

Πίνακας 35 Πίνακας 36 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 AN 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.

Το Γράφημα 26 παρουσιάζει τις κατανομές των αποτελεσμάτων της μελέτης περίπτωσης δομής δέκα υποσυστημάτων. Οι εν λόγω κατανομές φαίνονται να αποκτούν αρνητική λοξότητα, ωστόσο είναι πλατύκυρτες καθώς σε αρκετές περιπτώσεις απέδωσαν ανέφικτες λύσεις.

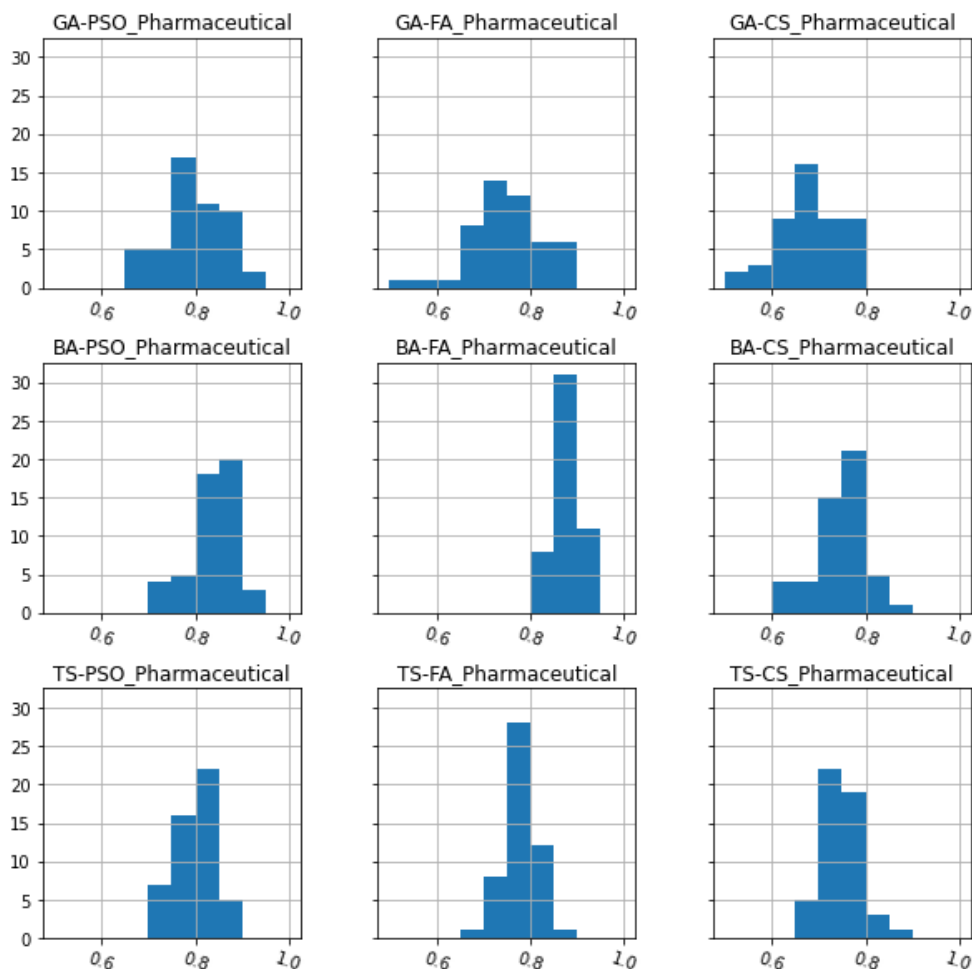


**Γράφημα 27:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων.

Αντίστοιχα στο Γράφημα 27 παρουσιάζονται οι κατανομές των αποτελεσμάτων για την μελέτη περίπτωσης συστήματος δομής δεκαπέντε υποσυστημάτων. Οι κατανομές, φαίνεται να είναι πλατύκυρτες και να αποκτούν θετική λοξότητα, το οποίο σημαίνει ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, αδυνατούσαν να επιφέρουν εφικτές λύσεις ως επί το πλείστον. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα του προβλήματος, το οποίο αποτελείται από μεγάλο πλήθος μεταβλητών απόφασης και εύρος τιμών αυτών.

Τέλος, ο Πίνακας 37 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  $2.8e-12$ .

Οι κατανομές των αποτελεσμάτων για την μελέτη περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων παρουσιάζονται στο Γράφημα 28. Όπως φαίνεται από το γράφημα, τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από τον ΑΝ και τον ΑΑΚ εμφανίζουν λεπτόκυρτες κατανομές που αποκτούν αρνητική λοξότητα. Αυτό σημαίνει ότι τα εν λόγω υβριδικά να εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα απόδοσης των λύσεων, σε αντίθεση με τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από τον ΓΑ που παρουσιάζει πλατύκυρτες κατανομές.



**Γράφημα 28:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων μελέτης περίπτωσης συστήματος γραμμής παραγωγής εργοστασίου φαρμάκων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα και όσον αφορά την εφαρμογή των υβριδικών σχημάτων στις μελέτες περίπτωσης βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, το Υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας και Αλγόριθμου Πυγολαμπίδας ξεπέρασε σε απόδοση όλα τα υπόλοιπα υβριδικά σχήματα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική 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 Πίνακας 38. Ορίζοντας την μηδενική υπόθεση του Friedman test ότι οι μέσες τιμές των δειγμάτων, που (πρακτικά) αποτελούνται από τα ανεξάρτητα τρεξίματα κάθε αλγορίθμου για κάθε μια από τις μελέτες περίπτωσης που καλείται να προσεγγίσει, είναι μεταξύ τους ίσες και κατά συνέπεια οι μέθοδοι έχουν ίδια συμπεριφορά, σε αντίθεση με την εναλλακτική υπόθεση. Επίσης ο εν λόγω πίνακας



περιέχει την μέση βαθμολογία των αλγορίθμων που χρησιμοποιείται στην διεξαγωγή του Τεστ Friedman και προκύπτει έπειτα από την βαθμολόγηση της απόδοσης τους για κάθε μελέτη περίπτωσης. Περαιτέρω επεξήγηση του Friedman test γίνεται στο Παράρτημα Α2.

**Πίνακας 38:** 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

Παρατηρείται ότι η τιμή του p-value είναι σχεδόν μηδενική, γεγονός που σημαίνει ότι, με επίπεδο σημαντικότητας 5%, απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση, με αποτέλεσμα να υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών των υβριδικών σχημάτων. Επίσης, όπως παρατηρείται στον Πίνακα 38 το Υβριδικό σχήμα που αποτελείται Αλγόριθμος Νυχτερίδας και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων διαθέτει την καλύτερη μέση βαθμολογία αποτελεσμάτων. Επομένως επιβεβαιώνεται ότι το ΑΝ-ΑΠ ήταν το υβριδικό σχήμα με την καλύτερη στατιστική απόδοση.

Επιπλέον παρατηρείται ότι τα υβριδικά σχήματα που αποτελούνται από την Αναζήτηση με Απαγορευμένες Καταστάσεις, παρουσιάζουν την χαμηλότερη στατιστική απόδοση, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στην διαδικασία δημιουργίας νέων λύσεων, οι οποίες είναι τελείως στοχαστικές δίχως να αντλούν κάποια πληροφορία μέσω νοημοσύνης.

Με δεδομένο ότι οι επιμέρους μέθοδοι των υβριδικών σχημάτων προσεγγίζουν τους επιμέρους στόχους του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας, έγινε η ερευνητική υπόθεση ότι δύναται κανείς να σχηματίσει ένα ισχυρό υβριδικό σχήμα, εφόσον επιλέξει (επιμέρους) μεθόδους που πετύχουν καλή στατιστική απόδοση στα (επιμέρους) προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας και κατανομής εφεδρείας. Προκειμένου να στηριχθεί η εν λόγω υπόθεση, έγινε προσέγγιση των μελετών περίπτωσης που αποτελούν προβλήματα κατανομής αξιοπιστίας με τις μεθόδους ΒΣΣ, ΑΠ και ΑΚ, ενώ εκείνων που αποτελούν προβλήματα κατανομής εφεδρείας με τις ΓΑ, ΑΝ και ΑΚΚ. Όπως αναφέρεται παραπάνω το υβριδικό σχήμα ΑΝ-ΑΠ πέτυχε την καλύτερη στατιστική απόδοση στα προβλήματα αξιοπιστίας – εφεδρείας. Σύμφωνα με την υπόθεση, αναμένεται η ΑΝ και η ΑΠ να παρουσιάσουν την καλύτερη

στατιστική απόδοση στα προβλήματα κατανομής εφεδρείας και κατανομής αξιοπιστίας, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τις μελέτες περίπτωσης που περιγράφουν το πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας, η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων πέτυχε την καλύτερη ποιότητα λύσης, όμως και οι τρεις μέθοδοι που εφαρμόστηκαν φαίνονται να παρουσιάζουν σχετικά όμοια στατιστική απόδοση. Αναφορικά με τις μελέτες περίπτωσης που περιγράφουν το πρόβλημα κατανομής εφεδρείας, ο Αλγόριθμος της Νυχτερίδας υπερνικά των υπόλοιπων μεθόδων παρουσιάζοντας την καλύτερη ποιότητα λύσεων. Επομένως, τα αποτελέσματα των εν λόγω μελετών περίπτωσης δεν ήταν τα αναμενόμενα, απορρίπτοντας την ερευνητική υπόθεση ότι επιλέγοντας (επιμέρους) μεθόδους που πετυχαίνουν την καλύτερη στατιστική απόδοση στους επιμέρους στόχους του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας, δύναται να σχηματιστεί ένα ισχυρό υβριδικό σχήμα.

Συγκριτικά με τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στην βιβλιογραφία το υβριδικό σχήμα AN-ΑΠ εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με την ΒΒΣΣ, την ΠΔΦΤΑΜ την ΠΔΦΑΣ και την ΑΙΑΑΕ. Οι εν λόγω μέθοδοι της βιβλιογραφίας έχουν εφαρμοστεί με ΠΚΑΣ μεγέθους 13500 και παραπάνω, σε αντίθεση με τις 5000 του AN-ΑΠ. Ωστόσο, η ΣΑΦΠ υπερνικά των παραπάνω μεθόδων καθώς και των υβριδικών σχημάτων αφού επιτυγχάνει την καλύτερη στατιστική απόδοση για ΠΚΑΣ μεγέθους 5000.

Δεδομένου ότι όταν αυξάνεται το ΠΚΑΣ αυξάνεται η ποιότητα των λύσεων, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα με σειρές μεγαλύτερων παραμέτρων πληθυσμού και γενεών ώστε να προσδιοριστεί αν υπάρχει σημαντική αλλαγή της ποιότητας των λύσεων ως προς τον χρόνο που απαιτείται για την προσέγγιση τους. Η λογική πίσω από αυτό, είναι να απαντηθεί το ερώτημα αν η αύξηση των κοινών παραμέτρων αποδίδει σημαντικό όφελος και συγκεκριμένα αν αξίζει να δαπανηθεί περισσότερος χρόνος για την προσέγγιση λύσεων.

Ο Πίνακας 39 περιέχει τον χρόνο που απαιτείται και την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης κάθε υβριδικού σχήματος για τις μελέτες περίπτωσης κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας και πιο συγκεκριμένα την μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος (ΜΠ1), σειριακού παράλληλου (ΜΠ2), περίπλοκου συστήματος γέφυρας (ΜΠ3), συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης (ΜΠ4), συστήματος μεγάλης κλίμακας (ΜΠ7) και εργοστασίου παραγωγής φαρμάκων (ΜΠ10). Πραγματοποιήθηκαν 50 ανεξάρτητες εκτελέσεις για σειρές κοινών παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν ΠΚΑΣ μεγέθους 5000 και 10000.

Για την ποσοτικοποίηση της αλλαγής μεταξύ της ποιότητας ως προς χρόνο για τα διαφορετικά σειρές κοινών παραμέτρων πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του όρου  $\Delta Q/\Delta t$  %, όπου αντιπροσωπεύει την ποσοστιαία μεταβολή της ποιότητας ως προς τον χρόνο που

απαιτείται στα δύο διαφορετικά σετ κοινών παραμέτρων. Ο εν λόγω όρος υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \% = \frac{Q_1 - Q_2}{t_1 - t_2} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Πίνακας 39: Χρόνοι και ποιότητα υβριδικών σχημάτων σε διαφορετικούς ΠΚΑΣ.

Μέθοδος	Μέγεθος	ΜΠ1		ΜΠ2		ΜΠ3		ΜΠ4		ΜΠ7		ΜΠ10	
		5000	10000	5000	10000	5000	10000	5000	10000	5000	10000	5000	10000
ΓΑ-ΒΣΣ	Χρόνος	44.472	87.287	42.033	84.261	44.636	89.822	42.114	83.482	54.302	109.584	45.644	91.402
	Ποιότητα	<b>0.92388</b> 9	0.93126 3	0.99996 5	0.99997 5	0.99984 6	0.99988 9	0.99991 3	0.99983 9	0.53679 2	0.76802 3	<b>0.93188</b> 7	0.93444 3
ΓΑ-ΑΠ	Χρόνος	45.103	105.569	49.377	99.933	43.341	86.034	45.733	117.877	48.079	103.646	44.396	111.932
	Ποιότητα	0.91121 1	0.92008 2	0.99995 6	0.99996 7	0.99972 1	0.99985 1	0.99990 9	0.99987 9	0.53468 3	0.66321 6	0.89835 5	0.92975 0
ΓΑ-ΑΚ	Χρόνος	50.534	102.758	48.628	96.437	51.323	103.098	48.538	97.456	55.171	110.722	51.056	104.794
	Ποιότητα	0.88798 7	0.92206 8	0.99989 9	0.99996 1	0.99975 3	0.99986 7	0.99891 4	0.99993 5	0.40704 9	0.47800 3	0.79141 9	0.93436 4
ΑΝ-ΒΣΣ	Χρόνος	93.465	245.331	91.111	238.984	93.396	250.919	85.506	217.258	214.979	639.107	132.664	371.917
	Ποιότητα	0.91944 2	<b>0.93162</b> 4	0.99996 2	<b>0.99997</b> 7	0.99984 5	<b>0.99988</b> 9	0.99994 2	<b>0.99995</b> 4	0.60494 4	<b>0.85404</b> 8	0.90435 9	0.95206 7
ΑΝ-ΑΠ	Χρόνος	109.411	324.29	112.502	353.027	105.488	300.497	117.529	392.853	213.956	679.229	142.282	419.914
	Ποιότητα	0.92220 3	0.93037 0	<b>0.99997</b> 1	0.99997 6	<b>0.99986</b> 0	0.99988 5	<b>0.99994</b> 9	0.99995 4	<b>0.61906</b> 1	0.80433 8	0.92295 6	<b>0.95512</b> 1
ΑΝ-ΑΚ	Χρόνος	101.779	259.555	97.931	252.333	100.681	260.844	93.2764	232.154	218.545	638.25	138.771	383.739
	Ποιότητα	0.90634 4	0.92562 9	0.99995 1	0.99997 3	0.99979 8	0.99987 9	0.99991 6	0.99994 5	0.52509 8	0.60461 2	0.85230 1	0.91738 7
ΑΑΚ-ΒΣΣ	Χρόνος	18.235	35.901	17.728	35.496	18.055	36.586	16.441	33.385	37.567	74.861	24.866	47.807
	Ποιότητα	0.90690 9	0.91687 6	0.99994 4	0.99995 6	0.99984 9	0.99986 8	0.99980 9	0.99989 0	0.60891 6	0.62192 2	0.87148 3	0.88412 9
ΑΑΚ-ΑΠ	Χρόνος	17.926	47.994	23.075	76.065	17.039	46.683	27.284	100.278	28.66	63.401	25.788	75.834

Μάριος Θυμιάνης

Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

---

	Ποιότητα	0.90666 3	0.91570 2	0.99995 2	0.99996 8	0.99969 5	0.99976 8	0.99970 2	0.99985 1	0.57491 4	0.76731 7	0.87033 2	0.91300 2
ΑΑΚ-ΑΚ	Χρόνος	25.449	49.939	24.517	49.525	25.113	50.132	23.837	48.201	37.998	75.59	29.181	58.428
	Ποιότητα	0.89424 8	0.91793 3	0.99992 6	0.99996 3	0.99973 2	0.99987 3	0.99975 6	0.99990 1	0.45363 2	0.49932 1	0.85027 9	0.88948 0

---

Ο Πίνακας 40 περιέχει τα αποτελέσματα, έπειτα από τον υπολογισμό της ποσοστιαίας μεταβολής της ποιότητας υβριδικών σχημάτων ως προς τον χρόνο. Οι υπολογισμοί του όρου (5.1) πραγματοποιήθηκαν για κάθε μελέτη περίπτωσης κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας για έκαστος υβριδικό σχήμα, όπου το πρώτο μέλος του όρου αντιπροσωπεύει την ποιότητα και τον χρόνο για αριθμό προσεγγίσεων αντικειμενικής συνάρτησης μεγέθους 10000 και το δεύτερο μεγέθους 5000 αντίστοιχα.

**Πίνακας 40:** Ποσοστιαία μεταβολή ποιότητας υβριδικών σχημάτων ως προς τον χρόνο.

Μέθοδος	ΜΠ1	ΜΠ2	ΜΠ3	ΜΠ4	ΜΠ7	ΜΠ10
ΓΑ-ΒΣΣ	1.70e-2	2.31e-5	9.47e-5	-1.80e-4	4.18e-1	5.58e-3
ΓΑ-ΑΠ	1.40e-2	2.17e-5	3.04e-4	-4.3e-5	2.31e-1	4.64e-2
ΓΑ-ΑΚ	6.5e-2	1.29e-4	2.20e-4	2.08e-3	1.27e-1	2.66e-1
ΑΝ-ΒΣΣ	8.00e-3	9.54e-6	2.80e-5	9.11e-6	5.87e-2	1.99e-2
ΑΝ-ΑΠ	3.00e-3	1.83e-6	1.27e-05	1.72e-6	3.98e-2	1.15e-2
ΑΝ-ΑΚ	1.20e-2	1.39e-5	5.08e-5	2.10e-5	1.89e-2	2.65e-2
ΑΑΚ-ΒΣΣ	5.60e-2	7.22e-5	1.00e-4	4.77e-4	3.48e-2	5.51e-2
ΑΑΚ-ΑΠ	3.00e-2	3.12e-5	2.47e-4	2.04e-4	5.53e-1	8.52e-2
ΑΑΚ-ΑΚ	9.60e-2	1.50e-4	5.63e-4	5.96e-4	1.21e-1	1.34e-1

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 40, η ποσοστιαία μεταβολή είναι αρκετά μικρή γεγονός που υποδεικνύει ότι η ποιότητα βελτιώνεται ελάχιστα όταν αυξάνεται ο ΠΚΑΣ καθώς η διαφορά  $\Delta Q$  της ποιότητας στους διαφορετικούς ΠΚΑΣ, είναι αρκετά μικρή. Αντιθέτως, όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση του ΠΚΑΣ οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης, με αποτέλεσμα η διαφορά  $\Delta t$  του χρόνου να είναι σημαντική. Επιπρόσθετα, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις και συγκεκριμένα το ΓΑ-ΒΣΣ και το ΓΑ-ΑΠ στην μελέτη περίπτωση συστήματος προστασίας υπερτάχυνσης (ΜΠ4), όπου ο όρος εμφανίζει αρνητικό πρόσημο, το οποίο σημαίνει ότι τα εν λόγω υβριδικά σχήματα δεν παρουσιάζουν βελτίωση στην ποιότητας όταν το ΠΚΑΣ αυξάνεται, καθώς η διαφορά  $\Delta Q$  της ποιότητας είναι αρνητική. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μια ραγδαία αύξηση του ΠΚΑΣ δεν επιφέρει κάποια πρακτική αξία καθώς η βελτίωση της ποιότητας είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με τον χρόνο εκτέλεσης που απαιτείται για την επίτευξη της.

#### 5.4 Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ με Μέθοδο Ποινής

Κατόπιν ερμηνείας των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος Στοχαστικής Αναζήτησης Φράκταλ με μέθοδο Ποινής (Penalty Guided Stochastic Fractal Search) των (Mellal and Zio, 2016) υπερνικά των υβριδικών σχημάτων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας καθώς και των υπολοίπων μεθόδων της βιβλιογραφίας. Συνεπώς επιλέχθηκε να αναπτυχθεί επιπλέον, η μέθοδος ΣΑΦΠ προκειμένου να εξεταστεί αν μπορεί να αποτελέσει μια ισχυρή μέθοδο που θα απαρτίζει την εφαρμογή περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

Η μέθοδος της Στοχαστικής Αναζήτησης Φράκταλ αντλεί έμπνευση από τις θεωρίες των φράκταλ, οι οποίες ορίζουν το μαθηματικό μοντέλο διάχυσης ενός σωματιδίου και την δημιουργία ομοιόμορφων μοτίβων που παρατηρούνται στην φύση, όπως αυτά των χιονονιφάδων (Salimi, 2015).

Η εν λόγω μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης και των δύο επιμέρους στόχων του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας και μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικα 5.1. Κάθε σημείο (point) αντιπροσωπεύει έναν αναζητητή (agent) του πληθυσμού που μετακινείται στον χώρο λύσεων. Η θέση του  $P_i$  αποτελείται από την κατανομή της αξιοπιστίας και την κατανομή της εφεδρείας του συστήματος. Μπορεί να περιγραφεί από την σχέση:

$$P_i = [r_1, r_2, \dots, r_m; n_1, n_2, \dots, n_m] \quad (5.2)$$

Τα σημεία διαχέονται στον χώρο λύσεων και δημιουργούν νέα σημεία χρησιμοποιώντας τον τυχαίο περίπατο Gauss (Gaussian random walk). Η εν λόγω διαδικασία ονομάζεται διαδικασία διάχυσης (Diffusion Process) και μπορεί να περιγραφεί από την σχέση:

$$P_i = \text{Gaussian}(\mu_p, \sigma) \quad (5.3)$$

όπου η παράμετρος της μέσης τιμής  $\mu_p$  ισούται με την απόλυτη θέση  $|P_i|$  του  $i$ -οστού σημείου και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  υπολογίζεται ως  $\sigma = \left| \frac{\log(N_{gen})}{N_{gen}} \cdot (P_i - BP) \right|$ , με  $N_{gen}$  το πλήθος των γενεών και  $BP$  την θέση του καλύτερου σημείου του πληθυσμού.

Έπειτα ακολουθούν δύο διαδικασίες ενημέρωσης (two updating processes) των θέσεων προκειμένου να βελτιωθούν οι υπάρχουσες υποψήφιες λύσεις. Κατά την πρώτη διαδικασία ενημέρωσης οι υποψήφιες λύσεις βαθμολογούνται βασιζόμενες στην απόδοσή τους, με 1 η χειρότερη έως  $\lambda$  η καλύτερη, ώστε να προσδιοριστεί η πιθανότητα το  $i$ -οστό σημείο να επηρεάζεται από το καλύτερο σημείο του πληθυσμού. Η εν λόγω πιθανότητα  $P_{\alpha_i}$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{\alpha_i} = \frac{\text{rank}(P_i)}{\lambda} \quad (5.4)$$

όπου με  $\lambda$  συμβολίζεται ο αριθμός του πληθυσμού και  $\text{rank}(P_i)$  ο βαθμός του  $i$ -οστού σημείου του πληθυσμού.

Στην συνέχεια για κάθε σημείο του πληθυσμού πραγματοποιείται ο έλεγχος  $P_{\alpha_i} < \varepsilon$ , όπου ως  $\varepsilon$  συμβολίζεται ένας τυχαίος αριθμός που παράγεται ξεχωριστά για κάθε σημείο στο

διάστημα  $[0,1]$ . Αν το κριτήριο του ελέγχου ικανοποιείται, τότε οι μεταβλητές απόφασης  $k$  του  $i$ -οστού σημείου ενημερώνονται από την σχέση:

$$P'_i(k) = P_r(k) - \varepsilon \cdot (P_t(k) - P_i(k)) \quad (5.5)$$

όπου με  $P'_i$  ορίζεται η νέα θέση του σημείου, ενώ τα  $P_r$  και  $P_t$  αποτελούν δύο τυχαία σημεία του πληθυσμού.

Ύστερα εκτελείται η δεύτερη διαδικασία ενημέρωσης, όπου αρχικά πραγματοποιείται βαθμολόγηση των νέων υποψήφιας λύσεων ώστε να υπολογισθεί η πιθανότητα  $P_{\alpha_i}$ , σύμφωνα με την (5.4) και να διεξαχθεί ο έλεγχος  $P_{\alpha_i} < \varepsilon$  για τα σημεία του πληθυσμού. Αν το κριτήριο του ελέγχου ικανοποιείται, τότε η θέση του  $i$ -οστού σημείου ενημερώνεται από την σχέση:

$$P''_i = \begin{cases} P'_i - \hat{\varepsilon} \cdot (P'_t - BP), & \varepsilon' > 0.5 \\ P'_i + \hat{\varepsilon} \cdot (P'_t - P'_r), & \varepsilon' < 0.5 \end{cases} \quad (5.6)$$

όπου με  $P'_t$  και  $P'_r$  συμβολίζονται τα τυχαία σημεία που επιλέχθηκαν κατά την πρώτη διαδικασία ενημέρωσης,  $\hat{\varepsilon}$  και  $\varepsilon'$  τυχαίοι αριθμοί που παράγονται ξεχωριστά για κάθε σημείο από την κανονική κατανομή Gauss (Gaussian Normal distribution) και τυχαία στο διάστημα  $[0,1]$ , αντίστοιχα. Η εν λόγω μέθοδος μπορεί να περιγραφεί από τον Ψευδοκώδικας 5.1.

Όσον αφορά την διαχείριση των περιορισμών οι (Mellal and Zio, 2016) αναφέρουν πως εφαρμόζουν ένα μηχανισμό μεθόδου ποινής (penalty method) κατά την οποία ωθούν την αναζήτηση προς την βέλτιστη λύση του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας. Η προαναφερθείσα τεχνική μειώνει την ποιότητα της λύσης, όταν αυτή παραβιάζει κάποιον περιορισμό και μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω σχέση:

$$R'_s(r, n) = R_s(r, n) - \sum_{j=1}^M \phi_j \cdot \max(0, g_j(r, n) - b_j)^2 \quad (5.7)$$

όπου ως  $\phi_j$  συμβολίζεται η παράμετρος ποινής (penalty parameter) του  $j$ -οστού περιορισμού, η οποία είναι μια θετική σταθερά,  $g_j(r, n)$  είναι η τιμή και  $b_j$  το ανώτατο όριο του  $j$ -οστού περιορισμού. Έτσι όταν η τιμή του περιορισμού λάβει τιμή μικρότερη από αυτήν του ανώτατου ορίου και η λύση είναι εφικτή, ο όρος της ποινής μηδενίζεται.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή του μηχανισμού μεθόδου ποινής πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά πειράματα για την μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος, εφαρμόζοντας στην μια περίπτωση τον εν λόγω μηχανισμό (μηχανισμός 1) και στην άλλη αυτόν που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας (μηχανισμός 2).

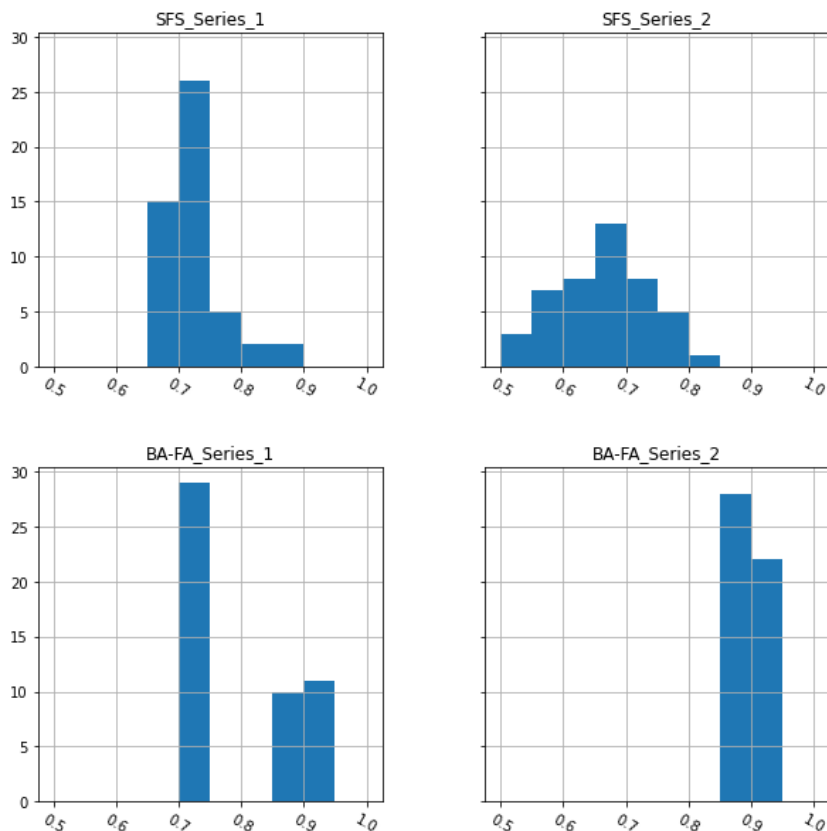


**Ψευδοκώδικας 5.1: Στοχαστική Αναζήτηση Φράκταλ με μέθοδο Ποινής (Penalty  
Guided Stochastic Fractal Search)**

---

- 1: Αρχικοποίηση παραμέτρων
  - 2: Αρχικοποίηση πληθυσμού σημείων
  - 3: **Για** γενιές  $I$  έως  $N$
  - 4:     **Για** σημείο από  $1$  έως  $\lambda$
  - 5:         Δημιουργία νέων σημείων με διαδικασία διάχυσης από σχέση (5.3)
  - 6:     **Τέλος**
  - 7:     Βαθμολόγηση των σημείων και υπολογισμός πιθανότητας  $P_{\alpha_i}$  από σχέση (5.4)
  - 8:     **Για** σημείο  $I$  έως  $\lambda$
  - 9:         **Αν**  $P_{\alpha_i} < \varepsilon$
  - 10:             **Για** απόφαση μεταβλητής  $I$  έως  $k$
  - 11:                 Ενημέρωση μεταβλητής απόφασης από σχέση (5.5)
  - 12:             **Τέλος**
  - 13:         **Τέλος**
  - 14:     **Τέλος**
  - 15:     **Για** κάθε νέο σημείο  $I$  έως  $\lambda$
  - 16:         Βαθμολόγηση των νέων σημείων και υπολογισμός πιθανότητας  $P_{\alpha_i}$  από σχέση (5.4)
  - 17:         **Αν**  $P_{\alpha_i} < \varepsilon$
  - 18:             Ενημέρωση θέσης από σχέση (5.6)
  - 19:         **Τέλος**
  - 20:     **Τέλος**
  - 21:     **Εάν** η ποιότητα του βέλτιστου σημείου είναι καλύτερη από την ποιότητα του παλιού
  - 22:         Ενημέρωση της βέλτιστης
  - 23:     **Τέλος**
  - 24: **Τέλος**
- 

Ο

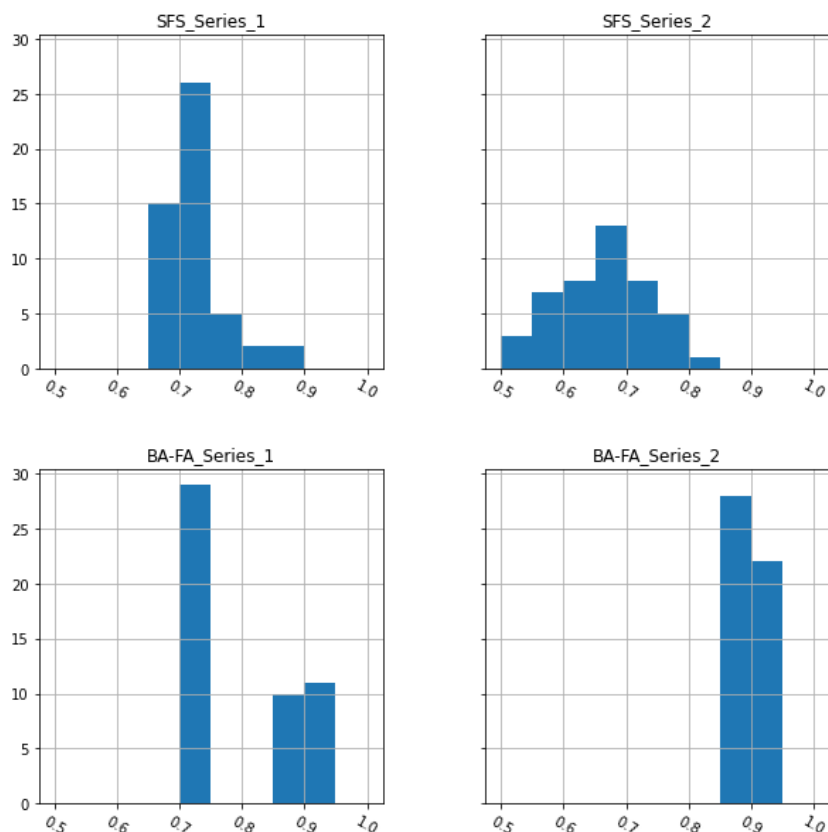


**Γράφημα 29:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικούς μηχανισμούς διαχείρισης περιορισμών.

Επίσης, παρατηρείται στον Πίνακα 41 ότι η χρήση του μηχανισμού των (Mellal and Zio, 2016) απαιτεί περισσότερο χρόνο εκτέλεσης. Δεδομένου ότι οι παραπάνω μέθοδοι πετυχαίνουν καλύτερη ποιότητα λύσεων, προσδιορίστηκε αν υπάρχει σημαντική αλλαγή της ποιότητας των λύσεων ως προς τον χρόνο που απαιτείται για την προσέγγιση τους, δηλαδή αν αξίζει να δαπανηθεί περισσότερος χρόνος για την χρήση του.

Πίνακας 41 περιέχει τα αποτελέσματα έπειτα από εφαρμογή των δύο διαφορετικών μηχανισμών στην μέθοδο της ΣΑΦ και το υβριδικό σχήμα AN-ΑΠ. Παρατηρείται ότι όταν εφαρμόζεται ο μηχανισμός των (Mellal and Zio, 2016), οι μέθοδοι πετυχαίνουν καλύτερη απόδοση, όμως ως προς την μέση απόδοση μονό η ΣΑΦ εμφανίζει βελτίωση.

Ωστόσο από τις κατανομές αποτελεσμάτων του εν λόγω μηχανισμού (μηχανισμός 1) στο Γράφημα 29, παρατηρείται ότι οι κατανομές αποκτούν θετική λοξότητα, δηλαδή τα ανεξάρτητα πειράματα δίνουν κυρίως τιμές κοντά στο ελάχιστο που έχει επιτευχθεί. Επιπλέον, η χρήση του συγκεκριμένου μηχανισμού στο AN-ΑΠ έχει ως αποτέλεσμα την μεσόκυρτη κατανομή, το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των ανεξάρτητων πειραμάτων δεν συσσωρεύονται αρκετά γύρω από την μέση τιμή τους, καθιστώντας το υβριδικό σχήμα χειρότερο ως προς την σταθερότητα απόδοσης λύσεων.



**Γράφημα 29:** Κατανομές ανεξάρτητων πειραμάτων για διαφορετικούς μηχανισμούς διαχείρισης περιορισμών.

Επίσης, παρατηρείται στον Πίνακα 41 ότι η χρήση του μηχανισμού των (Mellal and Zio, 2016) απαιτεί περισσότερο χρόνο εκτέλεσης. Δεδομένου ότι οι παραπάνω μέθοδοι πετυχαίνουν καλύτερη ποιότητα λύσεων, προσδιορίστηκε αν υπάρχει σημαντική αλλαγή της ποιότητας των λύσεων ως προς τον χρόνο που απαιτείται για την προσέγγιση τους, δηλαδή αν αξίζει να δαπανηθεί περισσότερος χρόνος για την χρήση του.

**Πίνακας 41:** Αποτελέσματα διαφορετικών μηχανισμών διαχείρισης περιορισμών.

Μέθοδος	Μηχανισμός	$R_s$	Μέση Απόδοση	Λοξότητα $\alpha$	Τυπική Απόκλιση $\eta$	Χρόνος	ΠΚΑΣ
AN-ΑΠ	1	0.924763 3	0.890447 4	0.4402	7.3072e-2	158.990	5000
AN-ΑΠ	2	0.922203 9	0.895552 1	-0.6620	1.6133e-2	109.411	5000
ΣΑΦ	1	0.886050 2	0.725065 0	1.9211	4.5004e-2	4.556	5000
ΣΑΦ	2	0.807580 3	0.641623 7	-0.5628	9.8768e-2	2.999	5000

Ο Πίνακας 42 περιέχει τα αποτελέσματα του υπολογισμού της ποσοστιαίας μεταβολής της ποιότητας των παραπάνω μεθόδων ως προς τον χρόνο. Οι υπολογισμοί του όρου  $\Delta Q/\Delta t$  %

(5.1), πραγματοποιήθηκαν για τα αποτελέσματα του Πίνακα 41 για τις δύο μεθόδους, όπου το πρώτο μέλος του όρου αντιπροσωπεύει την ποιότητα και τον χρόνο για τον μηχανισμό 1 και το δεύτερο για τον μηχανισμό 2 που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

**Πίνακας 42:** Ποσοστιαία μεταβολή ποιότητας διαφορετικών μηχανισμών διαχείρισης περιορισμών ως προς τον χρόνο.

Μέθοδος	ΜΠ1
AN-ΑΠ	5.1621e-5
ΣΑΦ	5.0398e-2

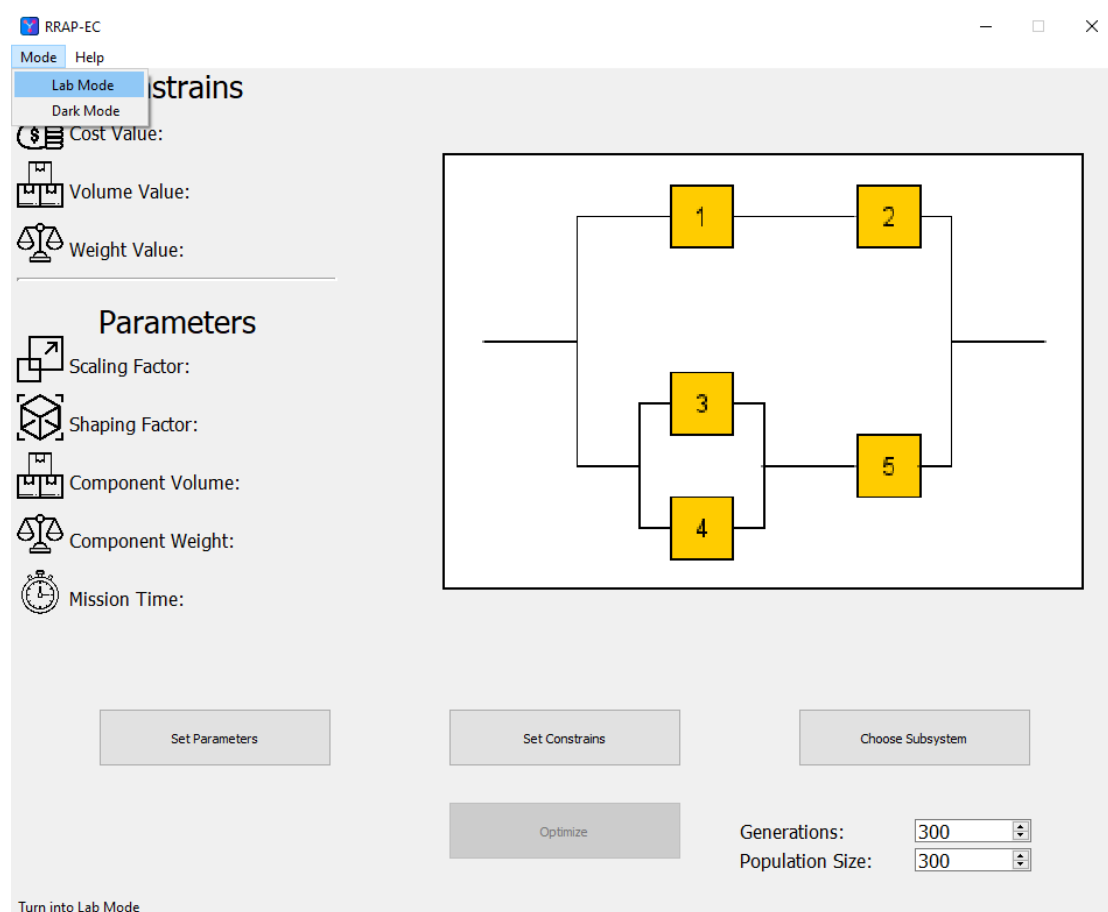
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 42, η ποσοστιαία μεταβολή είναι αρκετά μικρή γεγονός που υποδεικνύει ότι η χρήση του μηχανισμού 1 δεν επιφέρει σημαντικό όφελος, καθώς η διαφορά  $\Delta Q$  της ποιότητας στους διαφορετικούς μηχανισμούς είναι αρκετά μικρή. Αντιθέτως, η χρήση του συγκεκριμένου μηχανισμού οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης, με αποτέλεσμα η διαφορά  $\Delta t$  του χρόνου να είναι σημαντική.

Ο μηχανισμός αυτός δεν έχει κάποια πρακτική αξία, καθώς δεδομένου ότι η βέλτιστη λύση των προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας βρίσκεται κοντά στην συνολική αξιοπιστία  $R_s = 1$ , ο μηχανισμός είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να ωθεί τις υποψήφιες λύσεις προς την βέλτιστη λύση. Πιο συγκεκριμένα, στα προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας, οι ανέφικτες λύσεις απαρτίζουν λύσεις υψηλής συνολικής αξιοπιστίας, με αποτέλεσμα όσο πιο μικρή είναι η τιμή κατά την οποία παραβιάζεται ο περιορισμός τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα μια λύση καλής ποιότητας να βρίσκεται κοντά στο διάλυμα που περιγράφει την συγκεκριμένη ανέφικτη.

Συνεπώς ο εν λόγω μηχανισμός αποδέχεται αυτές τις ανέφικτες λύσεις επιβαρύνοντας την ποιότητα τους, τόσο όσο χρειάζεται ώστε να εστιάσει την αναζήτηση γύρω από την περιοχή που βρίσκονται. Αυτό σημαίνει ότι η παράμετρος ποινής  $\phi_j$  απαιτεί ρύθμιση για κάθε  $j$  περιορισμό κάθε φορά που προσεγγίζει ένα διαφορετικό πρόβλημα.

## 6 Εφαρμογή Περιβάλλοντος Διεπαφής Χρήστη

Επιπλέον, αναπτύχθηκε σε γλώσσα Python μια εφαρμογή<sup>2</sup> (application) η οποία αποτελεί ένα πρώιμο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Η εν λόγω εφαρμογή δύναται να υπολογίσει την κατανομή της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και την εφεδρεία αυτών σε κάθε υποσύστημα, που αναλογεί στην βέλτιστη αξιοπιστία για κάποιο εκ των βασικών υποσυστημάτων.

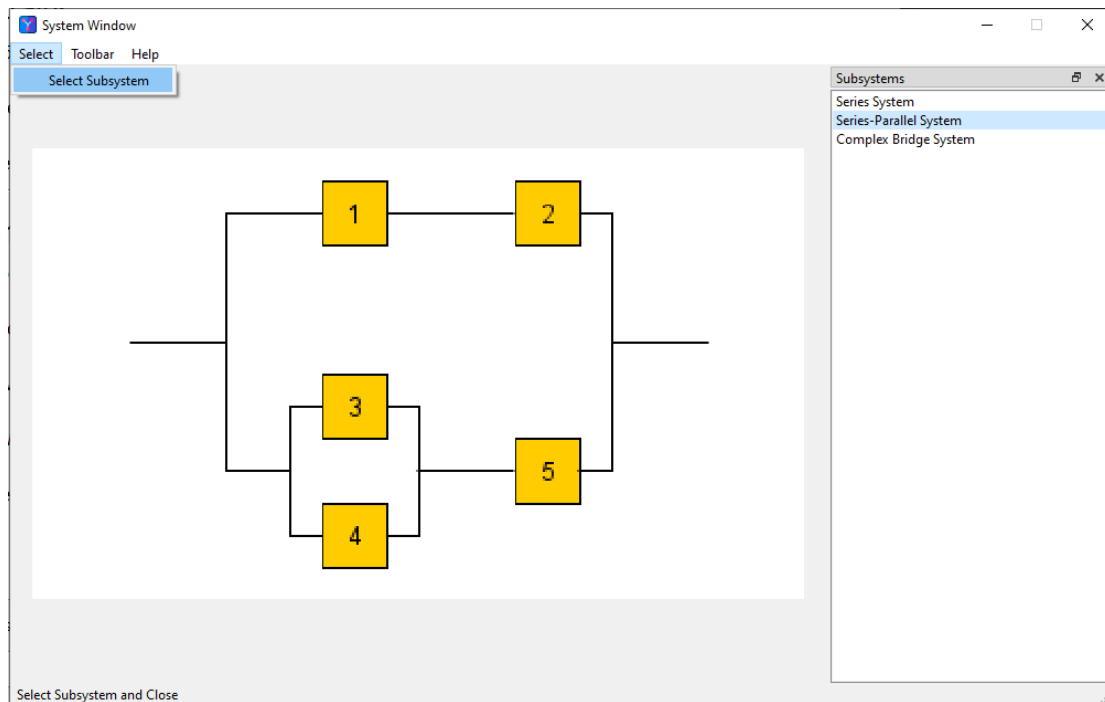


**Εικόνα 1:** Κεντρικό παράθυρο εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

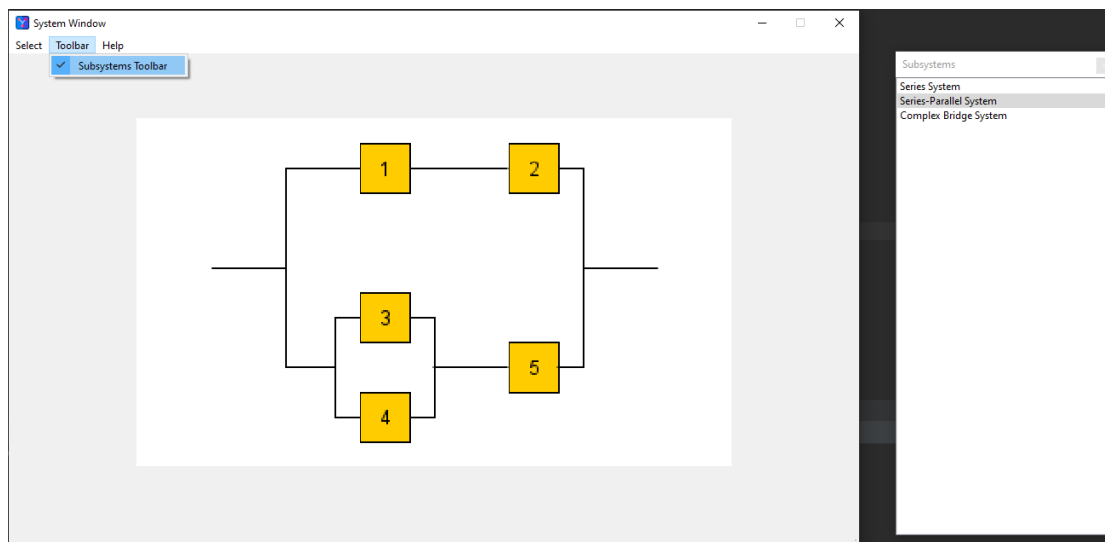
Κατά την εκκίνηση της εφαρμογής εμφανίζεται το κεντρικό παράθυρο (main window), στο οποίο περιέχονται όλα τα δεδομένα που περιγράφουν το σύστημα που ο χρήστης καλείται να εξετάσει. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, το εν λόγω παράθυρο περιέχει την γραφική

<sup>2</sup> Με τον όρο εφαρμογή αναφέρεται το πρόγραμμα υπολογίστη περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη και όχι η εφαρμογή μιας μεθόδου.

αναπαράσταση του βασικού υποσυστήματος, τους περιορισμούς που το περιγράφουν και τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που αποτελούν τα επιμέρους υποσυστήματα του.



Εικόνα 2: Παράθυρο επιλογής βασικού υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

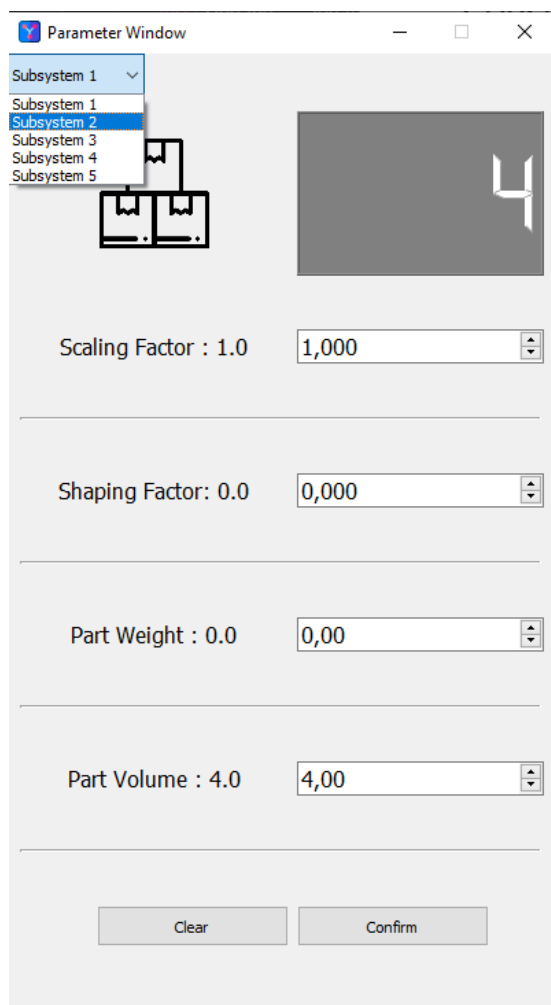


Εικόνα 3: Ξεχωριστό παράθυρο λίστας βασικών υποσυστημάτων εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

Το κουμπί Επιλογή Υποσυστήματος (Choose Subsystem) του κεντρικού παραθύρου οδηγεί στο παράθυρο επιλογής βασικού υποσυστήματος (System Window) (Εικόνα 2), το οποίο περιέχει μια λίστα με τα βασικά υποσυστήματα από τα οποία ο χρήστης δύναται να επιλέξει. Αναλυτικότερα η λίστα αποτελείται από τα υποσυστήματα που περιγράφονται στην

Μελέτη περίπτωσης σειριακού συστήματος, Μελέτη Περίπτωσης Σειριακού – Παράλληλου Συστήματος και την Μελέτη Περίπτωσης Περίπλοκου Συστήματος Γέφυρας , τα οποία αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο Προβλήματα Κατανομής Αξιοπιστίας - Εφεδρείας.

Αφού επιλεγεί το υποσύστημα, ο χρήστης καλείται να οριστικοποιήσει την επιλογή του στην καρτέλα Επιλογής (Select) πατώντας το κουμπί Επιλογής Υποσυστήματος (Select Subsystem), όπου επιστρέφεται στο κεντρικό παράθυρο σε μορφή γραφικής αναπαράστασης (Εικόνα 1). Η προαναφερθείσα λίστα μπορεί να αποτελέσει ξεχωριστό παράθυρο και να μετακινηθεί (Εικόνα 3), έτσι η καρτέλα Εργαλειοθήκη (Toolbar) παρέχει την δυνατότητα εμφάνισης και απόκρυψης της.

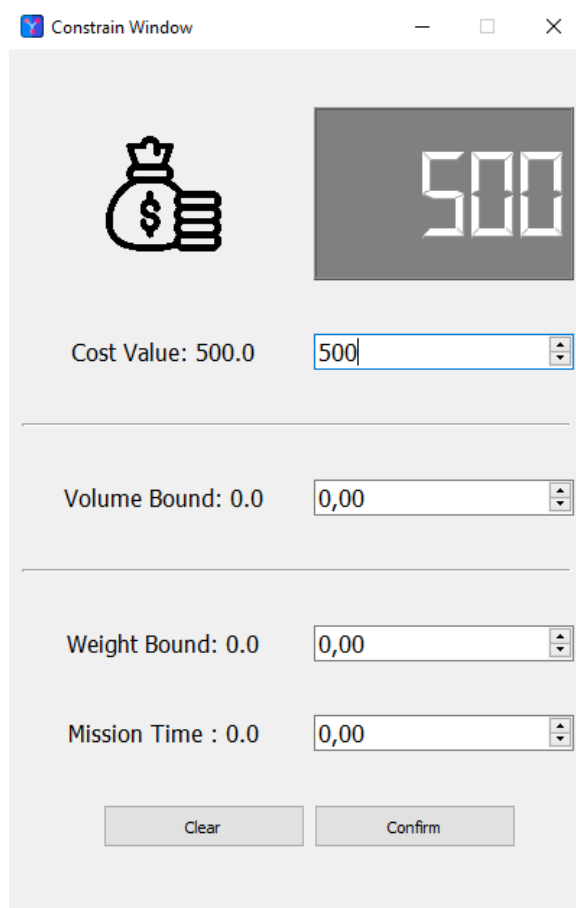


**Εικόνα 4:** Παράθυρο ορισμού παραμέτρων υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

Προκειμένου να εξατομικευθεί το υπό μελέτη σύστημα, ο χρήστης διαθέτει την δυνατότητα να συμπληρώσει τα δεδομένα, ειδικότερα τα φυσικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων, καθώς και τους περιορισμούς του όγκου, του βάρους και του κόστους. Συνεπώς, πιέζοντας το κουμπί Ορισμού Παραμέτρων (Set Parameters) του κεντρικού παραθύρου

εμφανίζεται το Παράθυρο Παραμέτρων (Parameter Window) (Εικόνα 4), όπου ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει τις παραμέτρους των φυσικών χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων που αποτελούν τα επιμέρους υποσυστήματα. Η καρτέλα υποσυστημάτων (Subsystems) παρέχει την δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων του υπό διερεύνηση βασικού υποσυστήματος.

Όσον αφορά τους περιορισμούς του συστήματος, ο χρήστης πατώντας το κουμπί Ορισμού Περιορισμών (Set Constrains) του κεντρικού παραθύρου, δύναται να συμπληρώσει στο Παράθυρο Περιορισμών (Constrain Window) (Εικόνα 5) το ανώτατο όριο των περιορισμών κόστους, όγκου, βάρους καθώς και τον χρόνο λειτουργίας κατά τον οποίο ένα εξάρτημα δεν πρέπει να αστοχήσει (Mission Time).

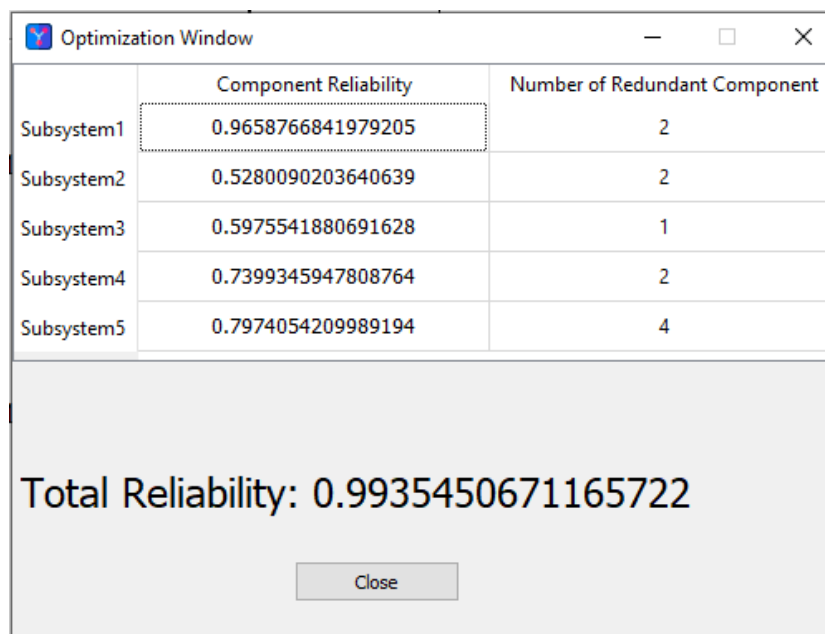


**Εικόνα 5:** Παράθυρο ορισμού περιορισμών υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιεί ως προεπιλεγμένη μέθοδο το υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας με Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας, η οποία έχει επιτύχει την καλύτερη στατιστική απόδοση κατά την πειραματική διαδικασία.



Ύστερα από την ρύθμιση παραμέτρων των υβριδικών σχημάτων, επιλέχθηκαν οι παράμετροι των υβριδικών σχημάτων που θα αποτελέσουν την προεπιλογή (default) στην εν λόγω εφαρμογή. Εντούτοις, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να συμπληρώσει τον αριθμό των γενεών και του πληθυσμού που περιγράφουν το κατ' επιλογή υβριδικό σχήμα, στο κεντρικό παράθυρο. Η τιμή των εν λόγω παραμέτρων δεν μπορεί να ξεπερνά το όριο των 500, ώστε η εφαρμογή (application) να μην απαιτεί πολλούς υπολογιστικούς πόρους, με κίνδυνο να προκαλέσει εσφαλμένη λειτουργία του υπολογιστικού συστήματος.



	Component Reliability	Number of Redundant Component
Subsystem1	0.9658766841979205	2
Subsystem2	0.5280090203640639	2
Subsystem3	0.5975541880691628	1
Subsystem4	0.7399345947808764	2
Subsystem5	0.7974054209989194	4

**Total Reliability: 0.9935450671165722**

Close

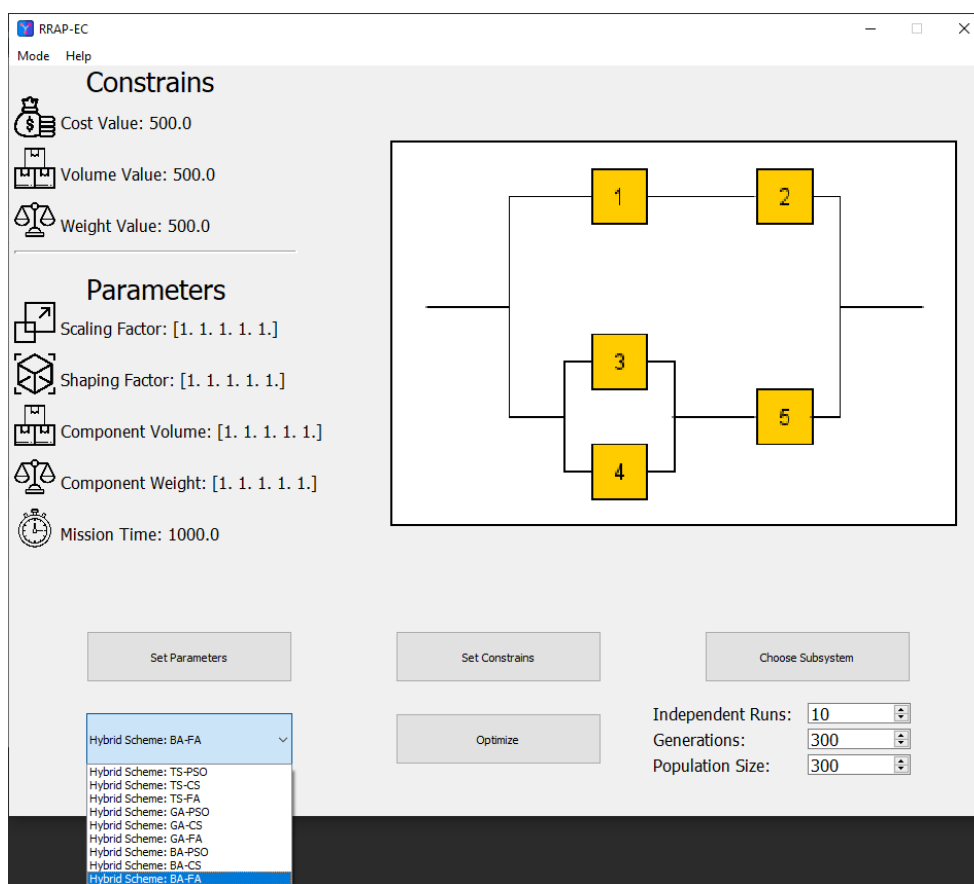
**Εικόνα 6:** Παράθυρο αποτελεσμάτων ανεξάρτητων εκτελέσεων εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

Δεδομένου ότι ο χρήστης έχει συμπληρώσει όλα τα παραπάνω, ενεργοποιείται στο κεντρικό παράθυρο το κουμπί της Βελτιστοποίησης (Optimize) το οποίο ξεκινάει την επαναληπτική διαδικασία. Μόλις ολοκληρώνεται η επαναληπτική διαδικασία, εμφανίζεται το Παράθυρο Βελτιστοποίησης (Optimization Window) όπου παρουσιάζονται στον χρήστη το διάγραμμα της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και της εφεδρείας αυτών σε κάθε υποσύστημα, που αναλογεί στην προσέγγιση της βέλτιστης αξιοπιστίας (Εικόνα 6).

Ωστόσο, ενεργοποιώντας την Λειτουργία Εργαστηρίου (Lab Mode) στην καρτέλα Λειτουργία (Mode) του κεντρικού παραθύρου, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διεξάγει πειράματα μεταξύ των υβριδικών σχημάτων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας (Εικόνα 7). Επιπρόσθετα, ο χρήστης δύναται να συμπληρώσει τον αριθμό των ανεξάρτητων επαναλήψεων (independent runs) για τις οποίες θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος. Η τιμή των εν λόγω επαναλήψεων δεν μπορεί να ξεπερνά το όριο των 500 επαναλήψεων, ώστε

να αποφευχθεί ο κίνδυνος να προκληθεί εσφαλμένη λειτουργία του υπολογιστικού συστήματος.

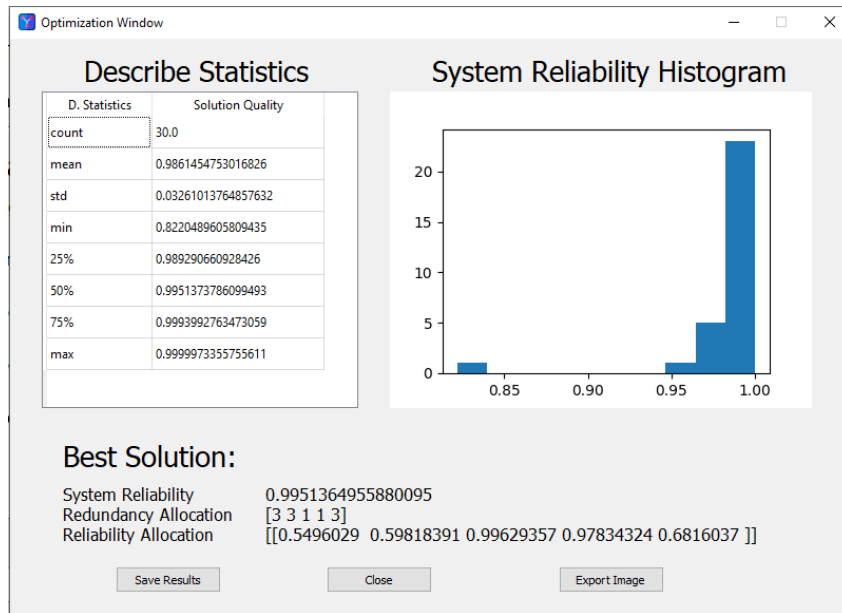
Εφόσον ο χρήστης έχει ενεργοποιήσει την Λειτουργία Εργαστηρίου, στο Παράθυρο Βελτιστοποίησης (Optimization Window) (Εικόνα 8) παρουσιάζονται η κατανομή της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων και η εφεδρεία αυτών σε κάθε υποσύστημα, που αναλογεί στην προσέγγιση της βέλτιστης αξιοπιστίας, το διάγραμμα κατανομής της βέλτιστης αξιοπιστίας των ανεξάρτητων επαναλήψεων και η περιγραφική στατιστική (descriptive statistics) των ανεξάρτητων αποτελεσμάτων.



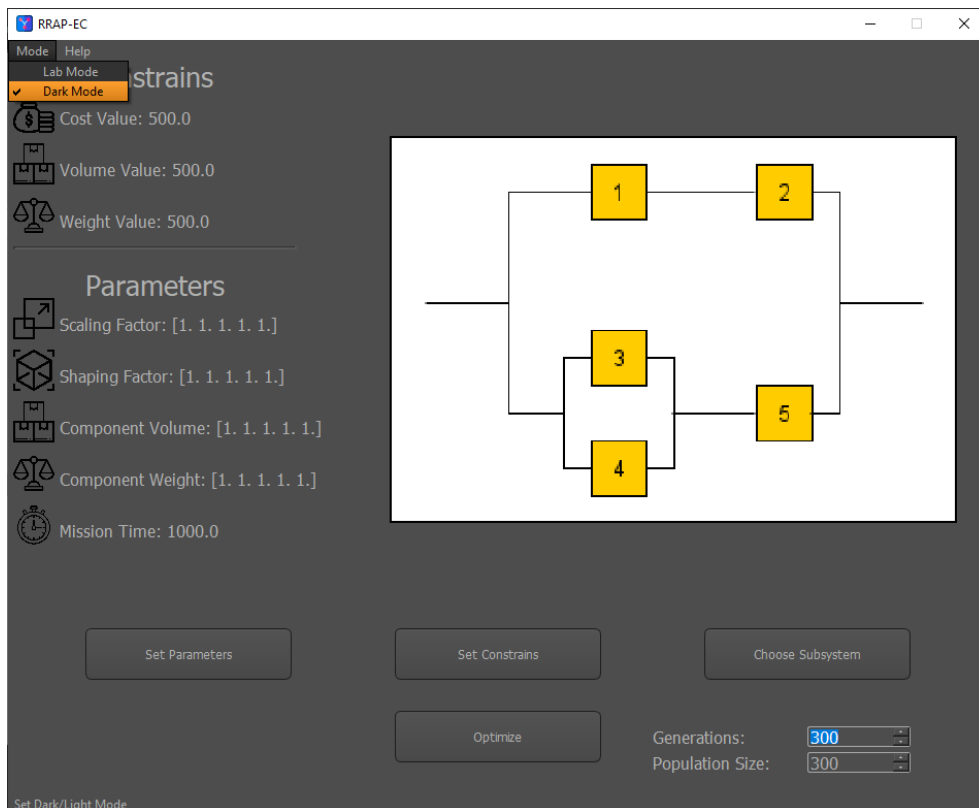
**Εικόνα 7:** Κεντρικό παράθυρο εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη σε λειτουργία εργαστήριου.

Επιπρόσθετα, το κουμπί Αποθήκευσης Αποτελεσμάτων (Save Results) παρέχει την δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων σε αρχείο μορφής τιμών διαχωρισμένων με κόμμα (comma separated values - .csv). Το εν λόγω αρχείο αποτελείται από τρεις στήλες, την βέλτιστη αξιοπιστία, την κατανομή εφεδρείας των εξαρτημάτων και την κατανομή της αξιοπιστίας αυτών, για κάθε ανεξάρτητη εκτέλεση. Εξίσου, το κουμπί Εξαγωγής Εικόνας (Export Image) πραγματοποιεί αποθήκευση του διαγράμματος κατανομής αποτελεσμάτων, σε μορφή φορητών γραφικών δικτύου (portable network graphics - .png).

Τέλος, στην καρτέλα Λειτουργία (Mode) του κεντρικού παραθύρου, ανάλογα με την προτίμηση του χρήστη, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ σκουρόχρωμης και ανοιχτόχρωμης λειτουργίας, (Εικόνα 9) πατώντας το κουμπί (Dark Mode).



Εικόνα 8: Κεντρικό παράθυρο εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη σε σκουρόχρωμη λειτουργία.



Εικόνα 9: Σκουρόχρωμης λειτουργίας ορισμού περιορισμών υποσυστήματος εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη.

## 7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν νοήμονες εξελικτικές μέθοδοι για την προσέγγιση προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και συγκεκριμένα τα προβλήματα κατανομής αξιοπιστία, κατανομής εφεδρείας και κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας, των οποίων η πρόκληση είναι να μεγιστοποιηθεί η συνολική αξιοπιστία του συστήματος ή να ελαχιστοποιηθεί το κόστος διατηρώντας ισορροπία μεταξύ των πόρων, ανεξάρτητα από τις διαμορφώσεις των υποσυστημάτων και τον χώρο λύσεων των μεταβλητών απόφασης (συνεχές, διακριτός ή μεικτός). Εξετάστηκαν 10 μελέτες περίπτωσης της βιβλιογραφίας, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται και τα τρία προβλήματα κατανομής, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ωστόσο, ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα θα αποτελούσε η μελέτη περιπτώσεων πραγματικών συστημάτων, όπου η συνδεσμολογία και το πλήθος των εξαρτημάτων σε κάθε υποσύστημα είναι προκαθορισμένα. Συνεπώς θα καλείται κανείς να επιλέξει την προδιαγραφή αξιοπιστίας μεταξύ των εξαρτημάτων που διατίθενται από τον κατασκευαστή.

Η προσέγγιση των προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας έγινε με την χρήση υβριδικών σχημάτων που διαχωρίζουν το πρόβλημα σε συνεχές και διακριτό μέρος, καθώς πρόκειται για πρόβλημα μεικτού χώρου λύσεων. Αναπτύχθηκαν 9 υβριδικά σχήματα, εκ των οποίων τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι το υβριδικό σχήμα Αλγόριθμος Νυχτερίδας με Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας (AN-ΑΠ) νικά των υπολοίπων τόσο στην ποιότητα της λύσης, όσο και στην στατιστική απόδοση του. Όσον αφορά την προσέγγιση των προβλημάτων κατανομής αξιοπιστίας και κατανομής εφεδρείας ξεχωριστά, τα αποτελέσματα ανέδειξαν πως η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων και ο Αλγόριθμος Νυχτερίδας απέδωσαν την καλύτερη απόδοση, αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα ώστε να διερευνηθεί αν η αύξηση του ΠΚΑΣ αποδίδει σημαντικό όφελος και συγκεκριμένα αν αξίζει να δαπανηθεί περισσότερος χρόνος για την προσέγγιση λύσεων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η μεταβολή της ποιότητας είναι ελάχιστη σε σχέση με αυτήν του χρόνου.

Συγκριτικά με μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στην βιβλιογραφία, το AN-ΑΠ δεν κατάφερε να υπερνικήσει ως προς την στατιστική απόδοση του, καθώς προκειμένου να προσεγγίσει την λύση σε πρακτικό χρόνο, ώστε να αποτελέσει την προεπιλεγμένη μέθοδο της εφαρμογής περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη (GUI) χρειάζεται να αποτελείται από μικρές παραμέτρους γενεών και πληθυσμού. Ωστόσο, τα αποτελέσματα στις περισσότερες των περιπτώσεων φέρουν να είναι κοντά σε αυτά της βιβλιογραφίας.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η ΣΑΦΠ, παρόλο τον χαμηλό αριθμό παραμέτρων γενεών και πληθυσμού, εμφανίζει την καλύτερη στατιστική απόδοση συγκριτικά των υπολοίπων. Για τον λόγο αυτό, στην πορεία της διπλωματικής εργασίας αναπαράχθηκε η μέθοδος της ΣΑΦΠ και παρατηρήθηκε ότι η αυξημένη απόδοση του οφείλεται στον μηχανισμό διαχείρισης περιορισμών. Ο εν λόγω μηχανισμός έχει αναπτυχθεί βασισμένος ότι η βέλτιστη λύση των προβλημάτων βελτιστοποίησης αξιοπιστίας είναι δεδομένη, με αποτέλεσμα να μην επιφέρει πρακτική αξία στην απόδοση της μεθόδου.

Μια ακόμη παρατήρηση αποτελεί ότι κατά την προσέγγιση ενός προβλήματος μικτού χώρου λύσεων, όπως αυτό της κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας, με χρήση υβριδικών σχημάτων όπου οι επιμέρους μέθοδοι επιλύουν το αντίστοιχο πρόβλημα, η επιλογή των επιμέρους μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί γνωρίζοντας την στατιστική απόδοση των μεθόδων στο αντίστοιχο πρόβλημα. Η εν λόγω παρατήρηση παρουσιάζεται κυρίως στα αποτελέσματα που εμφάνισαν τα υβριδικά σχήματα όταν αυξήθηκε ο αριθμός των κοινών παραμέτρων γενεών και πληθυσμού, όπου ανέδειξαν το AN-BΣΣ ως την στατιστικά καλύτερη μέθοδο προσέγγισης του προβλήματος κατανομής αξιοπιστίας - εφεδρείας. επίσης, όπως αναφέρεται προηγουμένως, η AN και η ΒΣΣ εμφανίζουν τα καλύτερα αποτελέσματα για τα επιμέρους προβλήματα κατανομής εφεδρείας και κατανομής αξιοπιστίας αντίστοιχα.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε μια εφαρμογή περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη, η οποία αποτελεί ένα πρώιμο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και πιο συγκεκριμένα στο πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας – εφεδρείας. Τα προβλήματα που καλείται να προσεγγίσει επιλέχθηκαν μεταξύ των μελετών περίπτωσης που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ την προεπιλεγμένη μέθοδο προσέγγισης αυτών αποτέλεσε το υβριδικό σχήμα Αλγόριθμου Νυχτερίδας με Αλγόριθμο Πυγολαμπίδας, έπειτα από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Η εφαρμογή καλείται να παρουσιάσει τα υπό μελέτη υποσυστήματα σε αναπαράσταση σχήματος και στην συνέχεια να εμφανίσει τα αποτελέσματα της μεθόδου.

Δεδομένου ότι τα υβριδικά σχήματα που αναπτύχθηκαν ώστε να προσεγγίζουν προβλήματα ενός αντικειμενικού στόχου, ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα θα αποτελούσε η προσαρμογή τους έτσι ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλαπλών αντικειμενικών στόχων (multi-objective). Επιπρόσθετα, ενδιαφέρον αποτελεί η ανάλυση της στατιστικής απόδοσης των υβριδικών σχημάτων για αρκετά υψηλότερες κοινές παραμέτρους γενιών και πληθυσμού. Επιπλέον, αντικείμενο για περαιτέρω έρευνας αποτελεί η μελέτη κάθε μεθόδου που απαρτίζει τα υβριδικά σχήματα, ώστε να βρεθούν και να αντιμετωπιστούν πιθανές αδυναμίες (π.χ. πρόωρη σύγκλιση ΒΣΣ).

Όπως αναφέρεται προηγουμένως η εφαρμογή περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη αποτελεί ένα πρώιμο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, συνεπώς η περαιτέρω ανάπτυξη της αποτελεί επέκταση της διπλωματικής εργασίας. Περαιτέρω ανάπτυξη της εφαρμογής θα αποτελούσε η δυνατότητα εξατομίκευσης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης θα δύναται να σχεδιάσει σε γραφικό περιβάλλον το υποσύστημα που πρόκειται να μελετήσει. Επιπρόσθετα, ενδιαφέρον αποτελεί η προσθήκη της δυνατότητας επιλογής του αντικειμενικού στόχου, μεταξύ ελαχιστοποίησης του κόστους ή μεγιστοποίησης της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος.

## 8 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>.

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.

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.res.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>.

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>.

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>.

Eiben, A.E. and Smith, J.E., 2004. Introduction to Evolutionary Computing. *Assembly Automation*, 24(3), pp.324–324. <https://doi.org/10.1108/aa.2004.24.3.324.1>.

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.

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>.

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>.

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>.



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

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>>.

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.

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.

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>.

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>.

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](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61068-4_1).

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

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>.

Tzanetos, A. and Dounias, G., 2020. Sonar inspired optimization (SIO) in engineering applications. *Evolving Systems*, 11(3), pp.531–539. <https://doi.org/10.1007/s12530-018-9250-z>.

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-Villacañas, 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>.

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>.

Weisstein, E.W., 2002. Heaviside Step Function. [Mathematics Resource] *Heaviside Step Function*. Available at: <<https://mathworld.wolfram.com/HeavisideStepFunction.html>>.

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](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6).

Yang, X.-S., 2014a. 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., 2014b. How to Deal with Constraints. 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>.

Σκαρλατάκης, Χ.Π., 2006. Σύστημα ελέγχου αεροστρόβιλου στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής συνδεδεμένου 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>>.

## Παράρτημα Α1

Η συνάρτηση βήματος Heaviside (Heaviside step function) είναι γνωστή ως μοναδιαία συνάρτηση βήματος (unit step function) και συμβολίζεται ως  $H(x)$  ή συνήθως ως  $u(x)$  ή  $\theta(x)$  (Weisstein, 2002). Η παραπάνω συνάρτηση ορίζεται ως εξής:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1/2, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (\text{A1.1})$$

## Παράρτημα Α2

Το Friedman test είναι το ανάλογο επαναλαμβανόμενων μετρήσεων ανάλυσης της διασποράς με μη-παραμετρικές στατιστικές διαδικασίες. Εφαρμόζεται προκειμένου να απαντηθεί το ερώτημα, αν μεταξύ δύο ή περισσότερων δειγμάτων πληθυσμών υπάρχουν τουλάχιστον δύο που έχουν διαφορετικές μέσες τιμές. Η μηδενική υπόθεση του Friedman test θεωρεί ότι οι μέσες τιμές των πληθυσμών είναι μεταξύ τους ίσες, αντιθέτως με την εναλλακτική υπόθεση (Derrac et al., 2011).

Κατά την διεξαγωγή του test συλλέγονται τα αποτελέσματα του κάθε αλγόριθμου για κάθε ένα από τα προβλήματα που έχει επιλύσει. Έπειτα για κάθε πρόβλημα  $i$ , κάθε αλγόριθμος  $j$  (για  $1 < j < k$ ) βαθμολογείται, βασιζόμενος στην απόδοση του, με βαθμό  $r_i^j$  ίσο με 1 για τον καλύτερο έως  $k$  για τον χειρότερο. Στην συνέχεια, υπολογίζεται η μέση απόδοση  $R_j$  του κάθε αλγόριθμου  $j$  για όλα τα προβλήματα, ακολουθώντας την σχέση  $R_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^j$ . Υιοθετώντας την μηδενική υπόθεση που αναφέρεται παραπάνω το Friedman Statistic υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_f = \frac{12 \cdot n}{k \cdot (k + 1)} \left( \sum_j R_j^2 - \frac{k \cdot (k + 1)^2}{4} \right) \quad (\text{A2.1})$$

όπου όταν  $k > 5$  και  $n > 10$  ακολουθεί την κατανομή  $\chi^2$  (chi-squared distribution) με  $k - 1$  βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom). Συνεπώς, γνωρίζοντας το Friedman Statistic ή τιμή του p-value υπολογίζεται ως  $P(\chi_{k-1}^2 \geq F_f)$ . Υπό την προϋπόθεση ότι η τιμή του p-value είναι σημαντική, απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση.