

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΝΑΣ ΕΥΡΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΤΗΣΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ  
ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

υπό

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΑΓΓΕΛΗ**

Μηχανικού Αεροσκαφών, Αποφοίτου Τμήματος Μηχανικών Σχολής Ικάρων (ΣΜΑ), 2000

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2007



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5242/1  
Ημερ. Εισ.: 23-03-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
629.134 6  
ΑΓΓ

© 2007 Κωνσταντίνος Αγγέλης

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

- Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αθανάσιος Ζηλιασκόπουλος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Τέταρτος Εξεταστής Δρ. Δημήτριος Παντελής  
Διδάσκων ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Πέμπτος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Γεώργιο Κοζανίδη, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα ενασχόλησης με ένα αντικείμενο που με ενδιαφέρει σε μεγάλο βαθμό αφού έχει άμεση σχέση με το αντικείμενο της επαγγελματικής μου δραστηριότητας. Επιπρόσθετα, τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Οφείλω ευχαριστίες στον φίλο και συνάδελφό μου Γεώργιο Παλαιολόγο για την ανεκτίμητη βοήθειά του στον προγραμματισμό με Visual Basic. Επίσης, ευχαριστώ τον φίλο μου Άγγελο Κώττα για την παροχή διάφορων διευκολύνσεων, απαραίτητων για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Δημήτριο και Αικατερίνη Αγγέλη, καθώς και στα αδέρφια μου, Ευάγγελο και Γλυκερία, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία στην οικογένειά μου.

Κωνσταντίνος Αγγέλης

**ΕΝΑΣ ΕΥΡΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ  
ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ  
ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΓΓΕΛΗΣ**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής: Λέκτορας Γεώργιος Κοζανίδης

**Περίληψη**

Οποιοδήποτε στρατιωτικό ή πολιτικό αεροσκάφος πρέπει να καθηλώνεται για εκτέλεση εργασιών συντήρησης μετά τη συμπλήρωση ορισμένου αριθμού ωρών πτήσης από την τελευταία του προγραμματισμένη επιθεώρηση. Ο σχεδιασμός πτήσεων και συντήρησης ασχολείται με το πρόβλημα λήψης αποφάσεων σχετικά με ποια διαθέσιμα αεροσκάφη πρέπει να πετάξουν και πόσο, και ποια αεροσκάφη πρέπει να καθηλωθούν για εκτέλεση εργασιών συντήρησης, σε ένα σύνολο αεροσκαφών που συγκροτούν μία Μονάδα. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας της Μονάδας κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Με γνώμονα τα ανωτέρω, αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία ένας ευρετικός αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται σε τεχνικές που χρησιμοποιούνται από πολλούς στρατιωτικούς οργανισμούς σε παγκόσμιο επίπεδο. Μελετάται η συμπεριφορά του αλγόριθμου σε τυχαία προβλήματα και τα αποτελέσματά του συγκρίνονται με την αναλυτική λύση, η οποία λαμβάνεται με τη χρήση ενός εμπορικού πακέτου βελτιστοποίησης. Η εργασία ολοκληρώνεται με συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Συντήρηση Αεροσκαφών.....</b>	<b>1</b>
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Επίπεδα Συντήρησης Πολιτικών Αεροσκαφών.....	2
1.3	Επίπεδα Συντήρησης Στρατιωτικών Αεροσκαφών.....	3
1.4	Τάσεις της Φιλοσοφίας Συντήρησης Αεροσκαφών.....	4
1.5	Σχέση Διαδικασιών Συντήρησης – Επιχειρήσεων.....	6
1.6	Αντικείμενο της Εργασίας.....	7
1.7	Το Πρόβλημα FMP στην Πολεμική Αεροπορία.....	8
1.8	Δομή της Εργασίας.....	9
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Αναδρομή στη Βιβλιογραφία.....</b>	<b>11</b>
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Περιγραφή Προβλήματος.....</b>	<b>16</b>
3.1	Γενικά.....	16
3.2	Περιγραφή Προβλήματος.....	17
3.3	Διάγραμμα Ροής Αεροσκαφών.....	18
3.4	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	21
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Μορφοποίηση Προβλήματος – Περιγραφή Αλγορίθμου.....</b>	<b>23</b>
4.1	Μορφοποίηση Προβλήματος.....	23
4.2	Στόχος Αλγορίθμου .....	28
4.3	Βασικά Στάδια Αλγορίθμου.....	30
4.4	Προγραμματισμός Έργου Συντήρησης.....	31
4.5	Προγραμματισμός Παραγόμενου Πτητικού Έργου.....	33
4.6	Εμβάθυνση στη Λειτουργία του Αλγορίθμου.....	34
4.7	Περιορισμοί.....	36
4.8	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	37
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Περιγραφή Κώδικα.....</b>	<b>39</b>
5.1	Δομή της Βάσης Δεδομένων.....	39

5.2	Περιγραφή Λειτουργικών Μονάδων.....	42
5.3	Βοηθητικές Εφαρμογές Λογισμικού.....	45
5.4	Γεννήτρια Τυχαίων Προβλημάτων.....	46
5.5	Μαθηματικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης.....	47
5.6	Περίληψη Κεφαλαίου.....	50
<b>Κεφάλαιο 6</b>	<b>Πειράματα – Αποτελέσματα – Συγκρίσεις .....</b>	<b>51</b>
6.1	Κριτήρια Σύγκρισης.....	51
6.2	Λογική Πειραμάτων.....	52
6.3	Αριθμητικό Παράδειγμα 1.....	53
6.4	Αριθμητικό Παράδειγμα 2.....	54
6.5	Αριθμητικό Παράδειγμα 3.....	55
6.6	Αριθμητικό Παράδειγμα 4.....	56
6.7	Αριθμητικό Παράδειγμα 5.....	57
6.8	Αριθμητικό Παράδειγμα 6.....	58
6.9	Αριθμητικό Παράδειγμα 7.....	59
6.10	Αριθμητικό Παράδειγμα 8.....	60
6.11	Αριθμητικό Παράδειγμα 9.....	61
6.12	Αριθμητικό Παράδειγμα 10.....	62
6.13	Αριθμητικό Παράδειγμα 11.....	63
6.14	Αριθμητικό Παράδειγμα 12.....	64
6.15	Αριθμητικό Παράδειγμα 13.....	65
6.16	Αριθμητικό Παράδειγμα 14.....	66
6.17	Επεξεργασία Αποτελεσμάτων (Όροι $z$ & $z_1 - z_4$ ).....	67
6.18	Υπολογιστικός Χρόνος.....	72
6.19	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	74
<b>Κεφάλαιο 7</b>	<b>Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας.....</b>	<b>75</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>78</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1: Εξαγόμενες τιμές παραμέτρων από το πρόγραμμα Fortran.....	47
Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 1.....	54
Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 2.....	55
Πίνακας 6-3: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 3.....	56
Πίνακας 6-4: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 4.....	57
Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 5.....	58
Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 6.....	59
Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 7.....	60
Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 9.....	62
Πίνακας 6-9: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 10.....	63
Πίνακας 6-10: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 11.....	64
Πίνακας 6-11: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 12.....	65
Πίνακας 6-12: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 13.....	66
Πίνακας 6-13: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 14.....	67
Πίνακας 6-14: Μέση απόκλιση αποτελεσμάτων VB από AMPL.....	68
Πίνακας 6-15: Χρόνοι επίλυσης αριθμητικών παραδειγμάτων.....	72



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1: Διάγραμμα ροής αεροσκαφών.....	19
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα ροής A/Φ με μεγάλη απαίτηση πτητικού έργου.....	29
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα ροής A/Φ με μικρή απαίτηση πτητικού έργου.....	29
Σχήμα 5-1: Σχέσεις πινάκων της βάσης δεδομένων .....	41
Σχήμα 5-2: Σχέσεις λειτουργικών μονάδων (modules).....	42
Σχήμα 5-3: Λειτουργική μονάδα «MainRoutines».....	44

# Κεφάλαιο 1 Συντήρηση Αεροσκαφών

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται μία εισαγωγή στην έννοια της συντήρησης αεροσκαφών. Αρχικά γίνεται αντιπαραβολή των στόχων και κάποιων ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που αφορούν τη συντήρηση των αεροσκαφών της Πολεμικής έναντι της Πολιτικής Αεροπορίας. Τονίζονται η σημασία της συντήρησης μέσω των σύγχρονων τάσεων στη φιλοσοφία της και η άρρηκτη σχέση μεταξύ επιχειρησιακών διαδικασιών και συντήρησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το αντικείμενο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ορισμένες εφαρμογές του στην Πολεμική Αεροπορία. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μία σύντομη περιγραφή των βασικών ενοτήτων της εργασίας.

## 1.1 Γενικά

Η Πολεμική Αεροπορία (ΠΑ) και η πολιτική αεροπορική βιομηχανία παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες, αλλά η λειτουργία της κάθε μίας εμφανίζει και σημαντικές διαφορές από την άλλη. Η ασφάλεια είναι ο σημαντικότερος παράγοντας και στους δύο οργανισμούς. Εντούτοις, ενώ στην πολιτική αεροπορία δίδεται μεγαλύτερη βαρύτητα στη μεγιστοποίηση του κέρδους, ο κύριος στόχος στην ΠΑ είναι η μεγιστοποίηση της ετοιμότητας αντιμετώπισης εξωτερικών απειλών. Επομένως, τα επιχειρησιακά προβλήματα της ΠΑ πρέπει γενικά να αντιμετωπίζονται διαφορετικά από τα παραδοσιακά προβλήματα που προκύπτουν στην πολιτική αεροπορία.

## 1.2 Επίπεδα Συντήρησης Πολιτικών Αεροσκαφών

Ένα σημαντικό μέρος του συνολικού λειτουργικού προϋπολογισμού ενός στόλου δαπανάται για τη συντήρηση των Α/Φ που ανήκουν σε αυτόν. Στην πολιτική αεροπορία, υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα συντήρησης που διαφέρουν το ένα από το άλλο στη φιλοσοφία, τη διάρκεια και τη συχνότητα εκτέλεσης. Αυτά είναι:

- Έλεγχος τύπου «Α»: Αυτοί οι έλεγχοι εκτελούνται κάθε 65-100 ώρες πτήσης (ΩΠ) ή μία φορά την εβδομάδα. Περιλαμβάνουν την επιθεώρηση όλων των κυρίων εξαρτημάτων και συστημάτων των Α/Φ, όπως των κινητήρων, του συστήματος προσγείωσης και των επιφανειών ελέγχου πτήσης.
- Έλεγχος τύπου «Β»: Αυτοί οι έλεγχοι εκτελούνται κάθε 300-600 ΩΠ και περιλαμβάνουν τη λίπανση όλων των κινούμενων μερών και τη λεπτομερή οπτική επιθεώρηση διάφορων συγκροτημάτων, όπως των κυρίων πτερύγων και του ουραίου πτερώματος. Τόσο οι έλεγχοι τύπου «Α» όσο και οι τύπου «Β» εκτελούνται συνήθως κατά τη διάρκεια της νύχτας, έτσι ώστε το Α/Φ να είναι διαθέσιμο το επόμενο πρωί. Εάν ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι διαθέσιμος, οι συγκεκριμένοι έλεγχοι εκτελούνται επιτόπου στα αεροδρόμια που ούτως ή άλλως χρησιμοποιούν τα Α/Φ.
- Έλεγχος τύπων «C» και «D»: Αυτοί είναι περισσότερο χρονοβόροι και δαπανηροί, εκτελούνται κάθε ένα και τέσσερα έτη αντίστοιχα, και για την εκτέλεσή τους απαιτείται καθήλωση του Α/Φ για αρκετές εβδομάδες. Αυτοί

οι έλεγχοι εκτελούνται μόνο σε ειδικές εγκαταστάσεις που διαθέτουν τον απαραίτητο εξοπλισμό και τεχνογνωσία.

### **1.3 Επίπεδα Συντήρησης Στρατιωτικών Αεροσκαφών**

Τα στρατιωτικά Α/Φ είναι συνήθως κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με τον τύπο τους ή την αποστολή για την οποία προορίζονται. Τυπικές αποστολές είναι η εκπαίδευση των χειριστών, η αναγνώριση και αναχαίτιση των εχθρικών Α/Φ, ο βομβαρδισμός επιγείων στόχων κλπ. Τα πρότυπα ασφάλειας που χρησιμοποιούνται από τις ΠΑ διαφόρων χωρών είναι συχνά παρόμοια, επειδή γενικά καθορίζονται από τον κατασκευαστή των Α/Φ και ο αριθμός των κατασκευαστών Α/Φ παγκοσμίως είναι περιορισμένος. Κάθε Α/Φ πρέπει να καθηλώνεται για εκτέλεση προγραμματισμένης συντήρησης μόλις συμπληρώνει ορισμένο αριθμό ωρών πτήσης (ΩΠ) από την τελευταία προγραμματισμένη επιθεώρησή του. Πέραν των ωρολογιακών επιθεωρήσεων, υπάρχουν επίσης περιορισμοί σχετικοί με τον ημερολογιακό χρόνο και τον αριθμό προσγειώσεων. Σπάνια κάποιο Α/Φ καθηλώνεται λόγω συμπλήρωσης του ημερολογιακού του ορίου για εκτέλεση συντήρησης. Σύμφωνα με την πολιτική που ακολουθείται, οι χρονοβόρες ημερολογιακές επιθεωρήσεις εκτελούνται ταυτόχρονα με τις ωρολογιακές, όταν εκ των πραγμάτων είναι καθηλωμένο το Α/Φ.

Η Ελληνική Πολεμική Αεροπορία (Hellenic Air Force - HAF), που παρείχε την εφαρμογή που παρακίνησε αυτήν την μελέτη, υποστηρίζεται από ένα πρόγραμμα συντήρησης τριών επιπέδων (βαθμών) ως εξής:

- Συντήρηση 1<sup>ου</sup> βαθμού (Organizational Level Maintenance – OLM):

Εκτελείται επιτόπου στο χώρο στον οποίο επιχειρεί το Α/Φ και περιλαμβάνει

επιθεωρήσεις, εκτέλεση επισκευών, αποκατάσταση βλαβών και αντικατάσταση εξαρτημάτων.

- Συντήρηση 2<sup>ου</sup> βαθμού (Intermediate Level Maintenance– ILM): Λαμβάνει χώρα σε ειδικό σταθμό συντήρησης, στον οποίο εκτελούνται αποκλειστικά εργασίες αυτού του επιπέδου, εντός της Μητρικής Μονάδας του Α/Φ και περιλαμβάνει εκτέλεση πιο λεπτομερών επιθεωρήσεων, καθώς και επισκευές και αντικατάσταση εξαρτημάτων που δεν μπορούν να γίνουν από τους φορείς 1<sup>ου</sup> βαθμού συντήρησης.
- Συντήρηση 3<sup>ου</sup> βαθμού (Depot Level Maintenance – DLM): Εκτελείται σε ειδικές εγκαταστάσεις από ειδικά εκπαιδευμένους επαγγελματίες. Περιλαμβάνει την εκτέλεση πιο λεπτομερών επιθεωρήσεων, εκτεταμένων επισκευών και αντικατάσταση εξαρτημάτων, εργασίες γενικά που είναι υπεράνω των εκτελεστικών δυνατοτήτων των δύο προηγούμενων επιπέδων συντήρησης.

#### **1.4 Τάσεις της Φιλοσοφίας Συντήρησης Αεροσκαφών**

Οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζονται από τους στρατιωτικούς οργανισμούς σε όλο τον κόσμο είναι η ετοιμότητα, η δυνατότητα ανταπόκρισης στο κόστος και ο συνεχώς αυξανόμενος λειτουργικός φόρτος εργασίας. Αφ' ετέρου, οι σχετικοί προϋπολογισμοί γίνονται όλο και περισσότερο σφιχτοί. Αυτό οδηγεί στην παρατεταμένη χρήση των υπάρχοντων οπλικών συστημάτων σε βάθος χρόνου πολύ μεγαλύτερο από το αρχικά σχεδιασμένο. Το Α/Φ B-52 Stratofortress, για παράδειγμα, που ξεκίνησε τις επιχειρήσεις του για λογαριασμό της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ

(United States Air Force – USAF) το 1954, αναμένεται να αποσυρθεί όχι νωρίτερα από το 2040 [21].

Εντούτοις, ο υψηλός λειτουργικός φόρτος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα από τους γηρασμένους στόλους. Το κόστος συντήρησης τείνει να αυξάνεται, η διαθεσιμότητα του στόλου να μειώνεται και η απόκτηση των ανταλλακτικών που δεν είναι πλέον υπό παραγωγή γίνεται δαπανηρή και δύσκολη. Τα οπλικά συστήματα χρειάζονται επίσης συνεχείς βελτιώσεις για να παραμείνουν ανταγωνιστικά στο σαφώς πιο απαιτητικό σύγχρονο πεδίο μάχης. Υπολογίζεται ότι, ενώ η ανάπτυξη και η παραγωγή ενός στρατιωτικού Α/Φ αποτελούν μόνο περίπου το 30% του συνολικού κόστους, το υπόλοιπο 70% αφορά λειτουργίες υποστήριξης, όπως το σχεδιασμό του προγράμματος και τη διαχείριση στοιχείων, την εκπαίδευση, την ανάπτυξη και ενημέρωση των τεχνικών εγχειριδίων, την αγορά και διαχείριση ανταλλακτικών και εξοπλισμού υποστήριξης, καθώς και την εκτέλεση συντήρησης, τροποποιήσεων, βελτιώσεων και ικανοποίηση απαιτήσεων που απορρέουν από τη χρήση γηρασμένων Α/Φ [21].

Σύμφωνα με τον David Spong, Αντιπρόεδρο και Γενικό Διευθυντή Αεροπορικής Υποστήριξης της εταιρείας Boeing, μίας από τις πρωτοπόρους παγκοσμίως αεροπορικές βιομηχανίες που μάλιστα είναι και ο μεγαλύτερος κατασκευαστής πολιτικών και στρατιωτικών Α/Φ, "καθώς το κόστος και η εξέλιξη των σύγχρονων οπλικών συστημάτων αυξάνεται και οι αμυντικοί προϋπολογισμοί είναι συνεχώς υπό πίεση, οι πελάτες ψάχνουν τρόπους να κερδίσουν τα μέγιστα από τις επενδύσεις τους, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα των συστημάτων που ήδη έχουν." [21]

Πρόσφατα, το βρετανικό Υπουργείο Άμυνας υπέγραψε μια καινοτόμο σύμβαση αξίας περίπου £130,000,000 με την BAE Systems, μια μεγάλη πολυεθνική αμυντική βιομηχανία, για τη συνδυασμένη συντήρηση και αναβάθμιση του στόλου των Α/Φ Tornado GR4 της βασιλικής ΠΑ. Η σύμβαση υπογραμμίζει τη δέσμευση του Υπουργείου για παροχή υπηρεσιών αντάξιων των χρημάτων των φορολογουμένων [3].

Επίσης, η αυξανόμενη σημασία της αποτελεσματικής συντήρησης των στρατιωτικών Α/Φ αναγνωρίστηκε πρόσφατα από την κοινότητα Operations Research and Management Science. Το βραβείο Franz Edelman INFORMS 2006 για την εξαιρετική πρακτική επιχειρησιακής έρευνας και επιστήμης διαχείρισης δόθηκε στο Warner Robins Air Logistics Center (WR-ALC). Το WR-ALC, που βρίσκεται στην πολιτεία Georgia των ΗΠΑ, είναι υπεύθυνο για την επισκευή, τροποποίηση και επιθεώρηση Α/Φ διάφορων αποστολών της USAF, όπως τα F-15 Eagle και Strike Eagle, τα C-130 Hercules, τα C-5 Galaxy, τα G-17 Globemaster III, καθώς επίσης και των εξαρτημάτων των αντίστοιχων ηλεκτρονικών συστημάτων τους. Σε συνεργασία με τις Realization Technologies και το Πανεπιστήμιο του Tennessee, το WR-ALC κατόρθωσε χρησιμοποιώντας την «Κρίσιμη Αλυσίδα» (Critical Chain), η οποία είναι μία τεχνική επιχειρησιακής έρευνας, να μειώσει τον αριθμό των υπό συντήρηση 3<sup>ου</sup> βαθμού Α/Φ C-5 από δώδεκα σε επτά μόνο σε διάστημα οκτώ μηνών. Σαν άμεση συνέπεια, ο απαιτούμενος χρόνος επιθεώρησης και επισκευής των Α/Φ C-5 μειώθηκε κατά 33% [15].

## **1.5 Σχέση Διαδικασιών Συντήρησης - Επιχειρήσεων**

Ενώ έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σημασία των διαδικασιών συντήρησης, έχει αγνοηθεί η άμεση σύνδεσή τους με τις επιχειρησιακές διαδικασίες. Παραδοσιακά, οι

διαδικασίες συντήρησης εξετάζονται χωριστά από τις αντίστοιχες επιχειρησιακές. Ένας από τους κύριους λόγους για αυτόν το διαχωρισμό ήταν η δυσκολία στην ανταλλαγή πληροφοριών και η έλλειψη επικοινωνίας μεταξύ των επιχειρησιακών φορέων και των φορέων συντήρησης. Κατά συνέπεια, αυτές οι δύο λειτουργίες έχουν εμφανιστεί συχνά να λειτουργούν ανταγωνιστικά, αν και ο απώτερος στόχος τους είναι κοινός.

Η αλματώδης πρόοδος των συστημάτων διαχείρισης πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχει καταστήσει δυνατή τη μελέτη ολόκληρου του οργανισμού διαχείρισης του στόλου ως ενιαίου συστήματος και τη βελτιστοποίηση όλων των κυρίων τμημάτων του προς την επίτευξη της πρωταρχικής αποστολής.

## **1.6 Αντικείμενο της Εργασίας**

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται το πρόβλημα του συνδυασμένου προγραμματισμού πτήσεων και συντήρησης (Flight and Maintenance Planning - FMP) των στρατιωτικών Α/Φ. Το πρόβλημα FMP θέτει την ερώτηση ποια διαθέσιμα Α/Φ πρόκειται να πετάξουν και πόσο, και σε ποια καθηλωμένα Α/Φ θα εκτελεστούν εργασίες συντήρησης, από μία ομάδα Α/Φ που συγκροτούν μια Μονάδα. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η μέγιστη διαθεσιμότητα της Μονάδας κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Το πρόβλημα FMP είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα λήψης αποφάσεων στην ΠΑ. Αν και αφορά αποφάσεις τόσο επιχειρησιακές όσο και συντήρησης, στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζεται ως ενιαίο επιχειρησιακό πρόβλημα.

Για να εξεταστεί το πρόβλημα FMP, δημιουργήθηκε ένας κώδικας σε Visual Basic. Ο κώδικας προσαρμόστηκε σε μία βάση δεδομένων της Microsoft Access, στην



οποία εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος σε μορφή πινάκων. Μέσω του κώδικα Visual Basic προκύπτει η βέλτιστη λύση, σύμφωνα με την οποία μεγιστοποιείται η διαθεσιμότητα των Α/Φ, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις των επιχειρήσεων και της συντήρησής τους. Η συμπεριφορά του κώδικα διερευνάται μέσω τυχαίων προβλημάτων, τα οποία επιλύονται παράλληλα μέσω ενός εμπορικού πακέτου βελτιστοποίησης. Όλα τα αποτελέσματα συγκρίνονται και επισημαίνεται η ευελιξία και η δυνατότητα εφαρμογής του εργαλείου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

## **1.7 Το Πρόβλημα FMP στην Πολεμική Αεροπορία**

Το πρόβλημα FMP στην ΠΑ διαφέρει σημαντικά από παρόμοια προβλήματα που εξετάζονται στην Πολιτική Αεροπορία για διάφορους λόγους. Η πρώτη διαφορά είναι στην αντικειμενική συνάρτηση, που στην περίπτωση της ΠΑ, είναι η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας του στόλου, δεδομένου ότι οι αποφάσεις δεν επηρεάζονται στον ίδιο βαθμό με την Πολιτική Αεροπορία από οικονομικά μεγέθη. Επιπλέον, οι απαιτήσεις πτήσεων εκφράζονται από το συνολικό χρόνο που πρέπει να πετάξουν όλα τα Α/Φ κατά τη διάρκεια μίας ορισμένης χρονικής περιόδου, σε αντίθεση με την Πολιτική Αεροπορία στην οποία οι απαιτήσεις πτήσεων αφορούν αεροπορικά ταξίδια, μεταξύ συγκεκριμένων αερολιμένων, που πρέπει να πραγματοποιηθούν από το στόλο των Α/Φ.

Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη εργασία αφορά μία καθαρά στρατιωτική εφαρμογή στην οποία εμπλέκονται Α/Φ με αποστολή την υπεράσπιση του εθνικού εναέριου χώρου, το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές που σχετίζονται με την κοινωνική προσφορά της ΗΑΦ. Ενδεικτικά αναφέρονται η δασοπυρόσβεση, η επείγουσα μεταφορά ασθενών/τραυματιών, η έρευνα

για αγνοούμενους υπό αντίξοες συνθήκες και η αποστολή ομάδων διάσωσης σε δυσπρόσιτα μέρη, δραστηριότητες για τις οποίες, σε μεγάλο ποσοστό, είναι υπεύθυνη η ΗΑΦ.

Η έλλειψη αποτελεσματικού συγχρονισμού της λειτουργίας επιχειρήσεων και συντήρησης σε αυτές τις εφαρμογές μπορεί να έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα που έλαβε χώρα τον Αύγουστο του 2006, όταν πυρκαγιά στην περιοχή της Χαλκιδικής έκαψε περισσότερα από 13.000 στρέμματα παρθένου δάσους, καθώς επίσης και δεκάδες σπιτιών, τουριστικών συγκροτημάτων και γεωργο-κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων. Στην κορύφωσή της τη δεύτερη ημέρα, η πυρκαγιά είχε εξαπλωθεί σε ένα μέτωπο 30 και πλέον χιλιομέτρων. Αξιωματούχοι της κυβέρνησης αναγνώρισαν ότι ο χαμηλός αριθμός πυροσβεστικών Α/Φ που έσπευσαν αρχικά στην περιοχή οφειλόταν στο ότι τρία Α/Φ ήταν καθηλωμένα λόγω μηχανικών βλαβών και άλλα έξι λόγω εκτέλεσης προγραμματισμένης συντήρησης [2].

## 1.8 Δομή της Εργασίας

Η υπόλοιπη εργασία είναι δομημένη ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στη σχετική βιβλιογραφία που αφορά κυρίως εφαρμογές από την Πολιτική Αεροπορία, δεδομένου ότι οι δημοσιεύσεις που εξετάζουν προβλήματα που συναντώνται σε στρατιωτικούς οργανισμούς είναι αρκετά περιορισμένες.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται το πρόβλημα του ενιαίου σχεδιασμού πτήσεων και συντήρησης των αεροσκαφών μίας αεροπορικής Μονάδας.

Στο Κεφάλαιο 4 μορφοποιείται μαθηματικά το πρόβλημα και περιγράφεται η λειτουργία του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για την επίλυσή του.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται εν συντομία ο κώδικας Visual Basic που βασίζεται στη λογική του ανωτέρω αλγορίθμου και δύο εφαρμογές λογισμικού (μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών και ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης) που χρησιμοποιούνται στην εκτέλεση των πειραμάτων και την αξιολόγηση της απόδοσης του κώδικα Visual Basic.

Στο Κεφάλαιο 6 περιέχονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση τυχαίων προβλημάτων, μέσω του κώδικα Visual Basic και του μοντέλου βελτιστοποίησης, τα οποία συγκρίνονται ως προς τις τιμές τους αλλά και το χρόνο που καταναλώθηκε για την εξαγωγή τους.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 7 που περιέχει μία περίληψή της και προτάσεις για τη βελτίωση του κώδικα, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, στο μέλλον.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται ορισμένες ερευνητικές προσπάθειες που εστιάζουν σε προβλήματα παρόμοια με αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Αναφέρονται δημοσιεύσεις που αφορούν σε προβλήματα σχεδιασμού και προγραμματισμού αεροσκαφών, ανάθεσης στόλου, λήψης αποφάσεων και αντιμετώπισης ανωμαλιών. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με το πλησιέστερο σε αυτήν τη μεταπτυχιακή εργασία απόσπασμα της παγκόσμιας δημοσιευμένης έρευνας, που εντοπίζεται στον τομέα της στρατιωτικής βιβλιογραφίας.

Στο παρελθόν έχουν ερευνηθεί διάφορα προβλήματα σχεδιασμού και προγραμματισμού Α/Φ, αν και η πλειοψηφία της δημοσιευμένης έρευνας εστιάζεται στον προγραμματισμό παρά στο σχεδιασμό. Στη συνέχεια παρατίθενται οι πιο αντιπροσωπευτικές προσπάθειες προσέγγισης του ευρύτερου προβλήματος διαχείρισης στόλου Α/Φ, που εντοπίστηκαν στη σχετική βιβλιογραφία, κατηγοριοποιημένες ανάλογα με κάποιο περισσότερο εξειδικευμένο πρόβλημα στο οποίο επέλεξε να εστιάσει ο κάθε ερευνητής.

Στο πλαίσιο του σχεδιασμού, οι Samaranayake et al. [26] εισάγουν και τεκμηριώνουν την εφαρμογή ενός λογισμικού για τη διαχείριση δραστηριοτήτων συντήρησης Α/Φ μεγάλης κλίμακας.

Οι Kurokawa και Takeshita [19] προτείνουν μια μέθοδο νευρωνικών δικτύων για το σχεδιασμό εναέριων μεταφορών στην Αμυντική ΠΑ της Ιαπωνίας. Αυτή η μέθοδος χωρίζει το κύριο πρόβλημα σε τρία υποπροβλήματα που λύνονται διαδοχικά από τρία νευρωνικά μπλοκ.

Στο πλαίσιο του προγραμματισμού, οι Clarke et al. [8] εισάγουν ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τόσο τις απαιτήσεις συντήρησης όσο και των επιχειρήσεων (πληρωμάτων πτήσης). Οι Keskinocak και Tayur [17] εξετάζουν ένα πρόβλημα προγραμματισμού Α/Φ στο οποίο η άφιξη των απαιτήσεων των πελατών είναι δυναμική. Οι Stojkovic et al. [28] προτείνουν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό των πτήσεων που λαμβάνει υπόψη τις μεταφορές πληρωμάτων, τις περιόδους ανάπαυσης, τις συνδέσεις επιβατών και τη συντήρηση. Οι Klabjan et al. [18] εξετάζουν σύνθετα προβλήματα που περιλαμβάνουν το σχεδιασμό του προγράμματος, τη δρομολόγηση των Α/Φ και τον προγραμματισμό των πληρωμάτων. Στην εργασία τους ο χρόνος αναχώρησης μίας πτήσης μπορεί να αλλάξει ελαφρώς, εφ' όσον παραμένει εντός ενός ορισμένου χρονικού πλαισίου.

Επίσης, τα προβλήματα ανάθεσης στόλου έχουν μελετηθεί εκτενώς στο παρελθόν. Οι Rushmeier και Κοντογιώργης [25] παρουσιάζουν ένα μοντέλο mixed-integer multicommodity flow για την ανάθεση στόλου μεγάλης κλίμακας, που λαμβάνει υπ' όψη ποικίλους περιορισμούς. Οι Clarke et al. [9] μορφοποιούν μαθηματικά το πρόβλημα εναλλαγής (rotation) των Α/Φ και το λύνουν μέσω της χαλάρωσης Lagrange και της subgradient βελτιστοποίησης. Οι Barnhart et al. [4] παρουσιάζουν ένα μοντέλο με το οποίο λύνουν ταυτόχρονα τα προβλήματα ανάθεσης στόλου και δρομολόγησης των Α/Φ. Οι Barnhart et al. [5] μορφοποιούν και λύνουν το πρόβλημα ανάθεσης στόλου και

επεξηγούν την εφαρμογή του σε ένα πραγματικό παράδειγμα από μια μεγάλη αεροπορική εταιρεία. Οι Lohatepanont και Barnhart [22] παρουσιάζουν σύνθετα μοντέλα και αλγορίθμους για την επίλυση του σχεδιασμού του προγράμματος Α/Φ και της ανάθεσης στόλου.

Έχει υπάρξει επίσης ένα ρεύμα δημοσιεύσεων που εξετάζουν προβλήματα λήψης αποφάσεων σχετικών με δρομολόγηση Α/Φ στο πλαίσιο της λειτουργίας αεροπορικών εταιρειών. Οι Feo and Bard [11] μοντελοποιούν το πρόβλημα δρομολόγησης της συντήρησης ως set partitioning πρόβλημα και χρησιμοποιούν ευρετικούς αλγορίθμους για να μορφοποιήσουν τη δρομολόγηση της συντήρησης. Συνδυάζουν, επίσης, το πρόβλημα δρομολόγησης με το πρόβλημα τοποθέτησης των σταθμών συντήρησης. Οι Gopalan και Talluri [13] και Talluri [29] ερευνούν το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης δρομολόγησης ενός Α/Φ, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι ικανοποιούνται ορισμένες βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις προγραμματισμένης συντήρησης. Οι Sriram και Haghani [27] παρουσιάζουν μια μορφοποίηση του προβλήματος προγραμματισμού της συντήρησης και έναν ευρετικό αλγόριθμο για τη λύση του.

Διάφοροι ερευνητές παρουσιάζουν μοντέλα για την αντιμετώπιση ανωμαλιών που προκύπτουν στη λειτουργία των αεροπορικών εταιρειών. Οι Yan και Lin [30] μελετούν το πρόβλημα καθορισμού εναλλακτικών προγραμμάτων για τα Α/Φ στην περίπτωση προσωρινής μη ύπαρξης διαθέσιμων αερολιμένων. Οι Rosenberger et al. [24] παρουσιάζουν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για την επαναδρομολόγηση των Α/Φ προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος που προκύπτει ως αποτέλεσμα των δυσλειτουργιών στα συστήματα αερομεταφορών. Οι LAN et al. [20] παρουσιάζουν δύο προσεγγίσεις που εμπλέκουν τη δρομολόγηση των Α/Φ και την αναθεώρηση των χρόνων

αναχώρησής τους, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η οποιαδήποτε αναστάτωση και δυσφορία των επιβατών.

Τέλος, αρκετοί ερευνητές παρουσιάζουν εκτενείς μελέτες μοντέλων και μεθόδων για προβλήματα σχετικά με τη λειτουργία των αεροπορικών εταιρειών. Οι Arguello et al. [1] μελετούν μοντέλα και μεθόδους για τη δυναμική διαχείριση της λειτουργίας αεροπορικών εταιρειών σε περιπτώσεις ανώμαλων καταστάσεων. Οι Gopalan και Talluri [14] ερευνούν μοντέλα και τεχνικές επίλυσης για διάφορα αεροπορικά προβλήματα που περιλαμβάνουν τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανάθεση στόλου και δρομολόγηση της συντήρησης. Ο Johnson [16] παρουσιάζει μια αναθεώρηση μοντέλων για προβλήματα δρομολόγησης Α/Φ. Οι Barnhart et al. [6] παρουσιάζουν μια ανασκόπηση διάφορων σημαντικών περιοχών εφαρμογών επιχειρησιακής έρευνας στη βιομηχανία αεροπορικών μεταφορών, καθώς επίσης και μια συνοπτική περίληψη της κατάστασης προόδου.

Εξετάζοντας το σύνολο των προαναφερομένων δημοσιεύσεων, γίνεται σαφές ότι η ερευνητική βιβλιογραφία που εξετάζει τη λειτουργία αεροπορικών εταιρειών είναι αρκετά πλούσια. Παρόλα αυτά, καμία από τις ανωτέρω εργασίες δεν αναφέρεται στον τύπο προβλήματος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 1, το μεγαλύτερο μέρος της δημοσιευμένης έρευνας σε αυτήν την περιοχή έχει κατευθυνθεί προς τα προβλήματα που απασχολούν την εμπορική βιομηχανία αερογραμμών, η οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετικούς στόχους και απαιτήσεις από τις ΠΑ.

Η μόνη σχετική αναφορά με το πρόβλημα FMP που γνωρίζουμε είναι ένα τεχνικό εγχειρίδιο της USAF που περιγράφει ένα πρακτικό γραφικό εργαλείο για τον

προγραμματισμό των περιοδικών επιθεωρήσεων των Α/Φ. Το εν λόγω εργαλείο χρησιμοποιεί μία γραφική απεικόνιση της κατάστασης των Α/Φ αναφορικά με τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης τους μέχρι την καθήλωσή τους για εκτέλεση κατά φάσεις επιθεώρησης. Παράλληλα, μέσω αυτού του εργαλείου επιλέγονται τα Α/Φ που θα πραγματοποιήσουν συγκεκριμένες πτήσεις-αποστολές. Η συγκεκριμένη τεχνική, που χρησιμοποιείται επίσης από την ΗΑΦ και πολλές άλλες ΠΑ, περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.



## **Κεφάλαιο 3 Περιγραφή Προβλήματος**

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς το πρόβλημα του ενιαίου σχεδιασμού πτήσεων και συντήρησης των αεροσκαφών μίας αεροπορικής Μονάδας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται εμπειρικά από πολλές ΠΑ και μέσω της ανάλυσής του τονίζεται η χρησιμότητα και συμβολή του στην επίτευξη μέγιστης διαθεσιμότητας Α/Φ.

### **3.1 Γενικά**

Η εξέταση του προβλήματος FMP σε αυτή την εργασία παρακινήθηκε από ένα πραγματικό παράδειγμα από τη HAF. Η HAF είναι αρμόδια για την άμυνα του εναέριου χώρου της Ελλάδας. Εντός αυτής, προϊστάμενη αρχή είναι το Γενικό Επιτελείο Αεροπορίας. Στο επόμενο επίπεδο της οργανωτικής δομής της HAF ανήκουν το Αρχηγείο Τακτικής Αεροπορίας, η Διοίκηση Αεροπορικής Υποστήριξης και η Διοίκηση Αεροπορικής Εκπαίδευσης. Όλες οι Μονάδες που είναι αρμόδιες για τις επιχειρήσεις και τις εναέρια αποστολές ανήκουν στο Αρχηγείο Τακτικής Αεροπορίας και αποτελούν τις Πτέρυγες Μάχης που διαιρούνται σε Μοίρες.

Το πρόβλημα που μελετήθηκε αποτελεί ένα συνηθισμένο επιχειρησιακό πρόβλημα σε μία τυπική Πτέρυγα Μάχης της HAF. Η Πτέρυγα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από τρεις Μοίρες, κάθε μία από τις οποίες αποτελεί

τη βάση για Α/Φ διάφορων τύπων. Με τον όρο «Πτέρυγα», από τώρα και στο εξής θα εννοείται το σύνολο των Μοιρών.

### 3.2 Περιγραφή Προβλήματος

Στην αρχή κάθε χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, η Διοίκηση της Πτέρυγας γνωστοποιεί τις απαιτήσεις πτήσεων για κάθε συνδυασμό Μοιρών και χρονικών περιόδων. Αυτές οι απαιτήσεις καθορίζουν το συνολικό χρόνο που όλα τα Α/Φ κάθε Μοίρας πρέπει να πετάξουν κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου του ορίζοντα. Αν στην Πτέρυγα ανήκουν Α/Φ διαφορετικών τύπων εισάγονται ξεχωριστές απαιτήσεις για κάθε τύπο Α/Φ, επειδή διαφοροποιούνται τόσο οι ικανότητες πτήσης όσο και οι απαιτήσεις συντήρησης. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκε για χρήση σε έναν συγκεκριμένο τύπο Α/Φ. Φυσικά, ο ίδιος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί επανειλημμένα ώστε να ικανοποιηθούν όλα τα σχέδια πτητικών απαιτήσεων, αν εμπλέκονται περισσότεροι από ένας τύποι Α/Φ.

Για κάθε συγκεκριμένο Α/Φ, ορίζεται ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης του ως ο συνολικός υπόλοιπος χρόνος που αυτό το Α/Φ μπορεί να πετάξει μέχρι να καθηλωθεί για εκτέλεση εργασιών προγραμματισμένης συντήρησης. Αυτή το χρονικό διάστημα αναφέρεται επίσης ως "bank time" στη σχετική στρατιωτική βιβλιογραφία [10]. Ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης ενός αεροσκάφους είναι θετικός αν και μόνο αν αυτό το Α/Φ είναι πτήσιμο. Οποιαδήποτε στιγμή, ο συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης μιας Μοίρας είναι ίσος με το άθροισμα των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης όλων των Α/Φ που ανήκουν σε αυτήν την Μοίρα. Ο συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης της Πτέρυγας είναι ίσος με το άθροισμα των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης όλων των

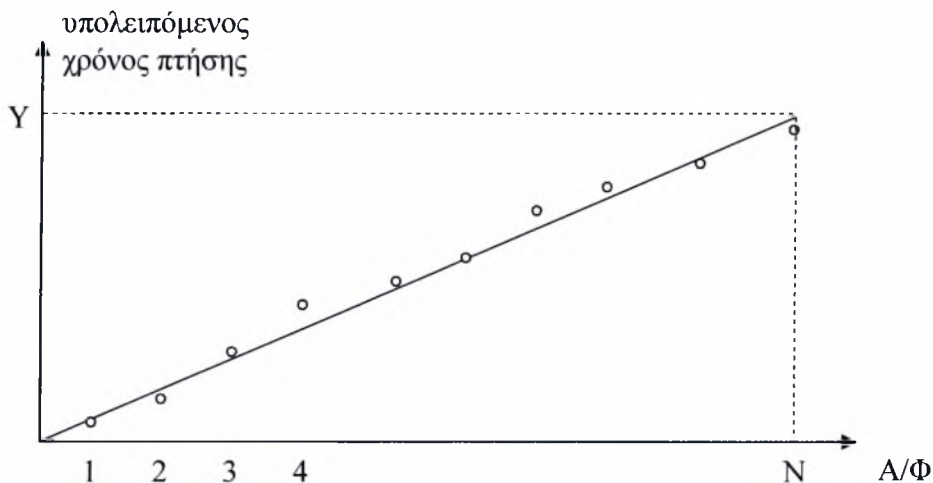
Μοιρών. Σαφώς, υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί υπολειπόμενων χρόνων πτήσης μεμονωμένων Α/Φ που μπορούν να οδηγήσουν στον ίδιο συνολικό υπολειπόμενο χρόνο πτήσης μίας Μοίρας ή ολόκληρης της Πτέρυγας.

Ομοίως, ορίζεται ο υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης ενός μη διαθέσιμου αεροσκάφους ως ο συνολικός υπολειπόμενος αριθμός  $E/\Omega$  που χρειάζεται να αποδοθούν σε αυτό το Α/Φ προκειμένου να ολοκληρωθούν οι εργασίες συντήρησής του. Ο υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης ενός Α/Φ είναι θετικός αν και μόνο αν αυτό το Α/Φ υποβάλλεται σε έλεγχο συντήρησης και δεν είναι επομένως πτήσιμο.

Για τις ανάγκες συντήρησης της Πτέρυγας υπάρχει ένας σταθμός συντήρησης αρμόδιος για την παροχή συντήρησης στα Α/Φ της Πτέρυγας. Αυτός ο σταθμός έχει ορισμένες θέσεις για Α/Φ και δυνατότητα παροχής  $E/\Omega$ , η οποία μπορεί μεν να ποικίλει από περίοδο σε περίοδο, αλλά είναι προκαθορισμένη από την αρχή του ορίζοντα προγραμματισμού. Δεδομένων των απαιτήσεων πτήσης για κάθε συνδυασμό Μοιρών και περιόδων και τους περιορισμούς που πηγάζουν από την χωρική και χρονική χωρητικότητα του σταθμού συντήρησης, ο στόχος είναι να εκδοθεί ένα πρόγραμμα πτήσεων και συντήρησης για κάθε μεμονωμένο Α/Φ σε κάθε Μοίρα της Πτέρυγας, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται κάποιο κατάλληλο μέτρο της απόδοσης.

### **3.3 Διάγραμμα Ροής Αεροσκαφών**

Όπως αναφέρθηκε στο τέλος του Κεφαλαίου 2, η ΗΑΦ και πολλές άλλες ΠΑ λύνουν το πρόβλημα FMP χρησιμοποιώντας εμπειρικά ένα διδιάστατο γραφικό εργαλείο αποκαλούμενο «διάγραμμα ροής Α/Φ», το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα ροής αεροσκαφών

Ο κάθετος άξονας αυτού του διαγράμματος ροής αντιπροσωπεύει τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης που μετριέται σε ώρες πτήσης (ΩΠ) και ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τους δείκτες των διαθέσιμων Α/Φ σε αύξουσα σειρά των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης τους. Ο δείκτης του Α/Φ με το μικρότερο υπολειπόμενο χρόνο πτήσης ορίζεται ίσος προς 1 και αντίστοιχα Ν είναι ο δείκτης του Α/Φ με το μεγαλύτερο υπολειπόμενο χρόνο, όπου Ν είναι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων Α/Φ. Έστω η γραμμή που συνδέει την αρχή των αξόνων με το σημείο με συντεταγμένες (Ν, Υ), όπου Υ είναι ο μέγιστος χρόνος που ένα Α/Φ μπορεί να πετάξει μεταξύ δύο διαδοχικών ελέγχων συντήρησης, ή «διάστημα φάσης» όπως αναφέρεται στη στρατιωτική βιβλιογραφία. Με την απεικόνιση κάθε Α/Φ σε αυτήν την γραφική παράσταση, μπορούμε να έχουμε μία άμεση εικόνα της συνολικής διαθεσιμότητας της Μονάδας.

Για να περιγραφεί η ομαλότητα της κατανομής του συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης όλων των Α/Φ γίνεται χρήση ενός «συνολικού δείκτη απόκλισης». Αυτός

ο δείκτης είναι ίσος με το άθροισμα των κάθετων αποστάσεων (αποκλίσεων) κάθε σημείου που αντιστοιχεί σε ένα Α/Φ από τη γραμμή που συνδέει την αρχή των αξόνων με το σημείο (N, Y). Όσο μικρότερο είναι αυτό το άθροισμα, τόσο πιο ομαλή είναι και κατανομή του συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης. Στην ιδανική περίπτωση, ο συνολικός δείκτης απόκλισης είναι ίσος με μηδέν, οπότε σε αυτήν την περίπτωση όλα τα σημεία βρίσκονται επί της ιδανικής ευθείας. Όταν εισάγονται τα προγράμματα πτήσεων μεμονωμένων Α/Φ, υπάρχει πρόθεση να κρατηθεί κάθε σημείο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ιδανική γραμμή, προκειμένου ο συνολικός δείκτης απόκλισης να παραμείνει όσο το δυνατόν μικρότερος. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στην έκδοση των προγραμμάτων πτήσεων και συντήρησης των μεμονωμένων Α/Φ στην Πτέρυγα Μάχης του παραδείγματος.

Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η γραφική παράσταση που περιγράφεται ανωτέρω είναι απλός. Με την παροχή ενός ευρέος φάσματος υπολειπόμενων χρόνων πτήσης Α/Φ που ισαπέχουν, μπορεί να εξασφαλιστεί μια ομαλή ακολουθία που καθορίζει τη σειρά με την οποία τα Α/Φ εισέρχονται στο σταθμό συντήρησης. Αυτό αποτρέπει στη συνέχεια πιθανές διακοπές στη ροή των Α/Φ προς το σταθμό συντήρησης και εξασφαλίζει την ομαλή εκμετάλλυσή του. Κατ' επέκταση, αποτρέπει την καθήλωση των Α/Φ για εκτέλεση προγραμματισμένων επιθεωρήσεων σε λανθασμένη χρονική στιγμή και την ξαφνική έλλειψη ανταλλακτικών. Παράλληλα, επιτρέπει στους Αξιωματικούς Συντήρησης των Μονάδων να ελέγχουν σε έναν βαθμό τις ΩΠ μεμονωμένων Α/Φ και τους παρέχει μια γραφική απεικόνιση των μελλοντικών προγραμματισμένων απαιτήσεων συντήρησης. Το πιο σημαντικό, εξασφαλίζει ένα αρκετά σταθερό επίπεδο διαθεσιμότητας Α/Φ.

Η συνολική διαθεσιμότητα χρόνου πτήσης είναι ίση με το άθροισμα των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης όλων των Α/Φ και επισημαίνεται ότι υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί υπολειπόμενων χρόνων πτήσης που μπορούν να οδηγήσουν στην ίδια συνολική διαθεσιμότητα. Έστω ένα πρόβλημα με τέσσερα Α/Φ, στα οποία το διάστημα φάσης είναι ίσο με 120 ώρες. Για μια συνολική διαθεσιμότητα χρόνου πτήσης 300 ωρών, ένας πιθανός συνδυασμός μεμονωμένων υπολειπόμενων χρόνων πτήσης είναι 30-30-120-120, και ένας άλλος 30-60-90-120. Σύμφωνα με την τεχνική που περιγράφεται ανωτέρω, η τελευταία κατανομή είναι προτιμητέα, επειδή εξασφαλίζει καλύτερο διαχωρισμό των προγραμματισμένων επιθεωρήσεων και εξασφαλίζει μια ομαλή εναλλαγή (rotation) των Α/Φ, δηλαδή μια ομαλή χρησιμοποίηση του σταθμού συντήρησης και ένα αρκετά σταθερό επίπεδο διαθεσιμότητας Α/Φ.

### **3.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου**

Σε αυτό το κεφάλαιο δόθηκε μία συνοπτική περιγραφή του προβλήματος FMP. Δεδομένων των προγραμματισμένων απαιτήσεων πτήσης των Α/Φ - για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού - που πρέπει να καλυφθούν, των απαιτήσεων συντήρησης που απορρέουν από την κατανάλωση ΩΠ από τα Α/Φ και της περιορισμένης δυνατότητας παροχής συντήρησης στα Α/Φ από τον αντίστοιχο σταθμό, αναζητείται ένα συνδυασμένο πρόγραμμα πτητικής εκμετάλλευσης των Α/Φ και παροχής συντήρησης, ώστε να επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των Α/Φ. Περιγράφεται το διάγραμμα ροής Α/Φ, ένα γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται εμπειρικά και φαίνεται να έχει θετικά αποτελέσματα στην επίτευξη του επιδιωκόμενου

στόχου. Στη λογική του εν λόγω διαγράμματος στηρίζεται ο αλγόριθμος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

## Κεφάλαιο 4 Μορφοποίηση Προβλήματος – Περιγραφή

### Αλγορίθμου

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται η μορφοποίηση του προβλήματος και γίνεται μία σύντομη περιγραφή του στόχου του αλγορίθμου που αναπτύσσεται στη συνέχεια. Ακολουθεί η περιγραφή των βασικών σταδίων του αλγορίθμου. Κατόπιν, επιχειρείται μία προσπάθεια εμβάθυνσης στη λειτουργία του και τονίζεται η επίδραση ορισμένων παραμέτρων, που δρουν ως περιορισμοί, στη διαδικασία επίλυσης.

#### 4.1 Μορφοποίηση Προβλήματος

Σε αυτό το υποκεφάλαιο μορφοποιείται μαθηματικά το ενιαίο πρόβλημα σχεδιασμού πτήσεων και συντήρησης των αεροσκαφών μίας αεροπορικής Μονάδας, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα σύνολα, οι μεταβλητές απόφασης και οι παράμετροι που εμπλέκονται στο πρόβλημα:

##### **Σύνολα:**

$M$ : σύνολο των Μοιρών που ανήκουν στην Πτέρυγα Μάχης,

$N_m$ : σύνολο των Α/Φ που ανήκουν στη Μοίρα  $m$ .

##### **Μεταβλητές Απόφασης:**

$z_1$ : ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων Α/Φ της Πτέρυγας σε όλες τις περιόδους,

$z_2$ : ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων Α/Φ της κάθε Μοίρας σε όλες τις περιόδους,



$z_3$ : ελάχιστο συνολικό υπόλοιπο ΩΠ των Α/Φ της Πτέρυγας σε όλες τις περιόδους,

$z_4$ : ελάχιστο συνολικό υπόλοιπο ΩΠ των Α/Φ της κάθε Μοίρας σε όλες τις περιόδους,

$a_{mni}$ : δυαδική μεταβλητή απόφασης που παίρνει την τιμή 1 αν το Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  είναι πτήσιμο την περίοδο  $t$ , διαφορετικά παίρνει την τιμή 0,

$y_{mni}$ : υπολειπόμενος χρόνος πτήσης (σε ώρες) του Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  στην αρχή της περιόδου  $t$ ,

$x_{mni}$ : χρόνος πτήσης του Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  κατά τη διάρκεια της περιόδου  $t$ ,

$g_{mni}$ : υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης (σε Ε/Ω) του Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  στην αρχή της περιόδου  $t$ ,

$h_{mni}$ : χρόνος συντήρησης του Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  κατά τη διάρκεια της περιόδου  $t$ ,

$d_{mni}$ : δυαδική μεταβλητή απόφασης που παίρνει την τιμή 1 αν το Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  εξέρχεται του σταθμού συντήρησης στην αρχή της περιόδου  $t$ , διαφορετικά παίρνει την τιμή 0,

$f_{mni}$ : δυαδική μεταβλητή απόφασης που παίρνει την τιμή 1 αν το Α/Φ  $n$  της Μοίρας  $m$  εισέρχεται στο σταθμό συντήρησης στην αρχή της περιόδου  $t$ , διαφορετικά παίρνει την τιμή 0,

$q_t, p_{mnb}, r_{mni}$ : βοηθητικές δυαδικές μεταβλητές απόφασης.

## Παράμετροι:

$T$ : διάρκεια (αριθμός χρονικών περιόδων) του υπό εξέταση ορίζοντα προγραμματισμού,

$S_{mi}$ : προγραμματισμένο πτητικό έργο (σε ΩΠ) της Μοίρας  $m$  για τη χρονική περίοδο  $t$ ,

$B_t$ : χρονική χωρητικότητα (αριθμός διαθέσιμων  $E/\Omega$ ) του σταθμού συντήρησης τη χρονική περίοδο  $t$ ,

$G$ : υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης  $A/\Phi$  το οποίο μόλις εισέρχεται στο σταθμό συντήρησης,

$Y$ : υπολειπόμενος χρόνος πτήσης  $A/\Phi$  το οποίο μόλις εξέρχεται του σταθμού συντήρησης,

$C$ : αριθμός θέσεων  $A/\Phi$  στο σταθμό συντήρησης,

$AI_{mn}$ : κατάσταση (0/1) του  $A/\Phi$   $n$  της Μοίρας  $m$  στην πρώτη περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού,

$YI_{mn}$ : υπολειπόμενος χρόνος πτήσης του  $A/\Phi$   $n$  της Μοίρας  $m$  στην πρώτη περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού,

$GI_{mn}$ : υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης του  $A/\Phi$   $n$  της Μοίρας  $m$  στην πρώτη περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού,

$X_{max}$ : μέγιστος χρόνος πτήσης ενός  $A/\Phi$  κατά τη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου,

$Y_{min}$ : ελάχιστος υπολειπόμενος χρόνος πτήσης ενός πτήσιμου  $A/\Phi$ ,

$G_{min}$ : ελάχιστος υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης ενός καθηλωμένου  $A/\Phi$ ,

$L, U$ : πραγματικοί αριθμοί που δηλώνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση του παραγόμενου πτητικού έργου από το αντίστοιχο προγραμματισμένο,

$K$ : ένας αρκετά μεγάλος αριθμός.

Η μαθηματική μορφοποίηση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } z_1 \\
 & \text{Max } z_2 \\
 & \text{Max } z_3 \\
 & \text{Max } z_4 \\
 & \text{s.t. } z_1 \leq \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} a_{mnt}, \quad t = 2, \dots, T+1 \\
 & z_2 \leq \sum_{n=1}^{|N_m|} a_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad t = 2, \dots, T+1 \\
 & z_3 \leq \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} y_{mnt}, \quad t = 2, \dots, T+1 \\
 & z_4 \leq \sum_{n=1}^{|N_m|} y_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad t = 2, \dots, T+1 \\
 & y_{mnt+1} = y_{mnt} - x_{mnt} + Yd_{mnt+1}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad n = 1, \dots, |N_m|, \quad t = 1, \dots, T \\
 & d_{mnt+1} \geq a_{mnt+1} - a_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad n = 1, \dots, |N_m|, \quad t = 1, \dots, T \\
 & a_{mnt+1} - a_{mnt} + 1.1(1-d_{mnt+1}) \geq 0.1, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad n = 1, \dots, |N_m|, \quad t = 1, \dots, T \\
 & g_{mnt+1} = g_{mnt} - h_{mnt} + Gf_{mnt+1}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad n = 1, \dots, |N_m|, \quad t = 1, \dots, T \\
 & f_{mnt+1} \geq a_{mnt} - a_{mnt+1}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad n = 1, \dots, |N_m|, \quad t = 1, \dots, T \\
 & a_{mnt} - a_{mnt+1} + 1.1(1-f_{mnt+1}) \geq 0.1, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad n = 1, \dots, |N_m|, \quad t = 1, \dots, T \\
 & LS_{mt} \leq \sum_{n=1}^{|N_m|} x_{mnt} \leq US_{mt}, \quad m = 1, \dots, |M|, \quad t = 1, \dots, T
 \end{aligned}$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} h_{mnt} \leq B_t, \quad t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} (1 - a_{mnt}) \leq C, \quad t = 2, \dots, T + 1$$

$$B_t \leq \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} h_{mnt} + K(1 - q_t), \quad t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} g_{mnt} \leq \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N_m|} h_{mnt} + Kq_t, \quad t = 1, \dots, T$$

$$y_{mnt} + Kp_{mnt} \leq K, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$a_{mnt+1} \leq (y_{mnt} - x_{mnt})K + Kp_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$g_{mnt} + Kr_{mnt} \leq K, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$1 - a_{mnt+1} \leq (g_{mnt} - h_{mnt})K + Kr_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$y_{mnt} \leq Ya_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 2, \dots, T + 1$$

$$g_{mnt} \leq G(1 - a_{mnt}), \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 2, \dots, T + 1$$

$$x_{mnt} \leq X_{max}a_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$y_{mnt} \geq Y_{min}a_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 2, \dots, T + 1$$

$$g_{mnt} \geq G_{min}(1 - a_{mnt}), \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 2, \dots, T + 1$$

$$x_{mnt} \leq y_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$h_{mnt} \leq g_{mnt}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$a_{mn1} = A1_{mn}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|$$

$$y_{mn1} = Y1_{mn}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|$$

$$g_{mn1} = G1_{mn}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|$$

$$x_{mnt}, h_{mnt} \geq 0; \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

$$y_{mnt}, g_{mnt} \geq 0; \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 2, \dots, T + 1$$

$$p_{mnt}, r_{mnt}, q_t \text{ binary}, \quad m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 1, \dots, T$$

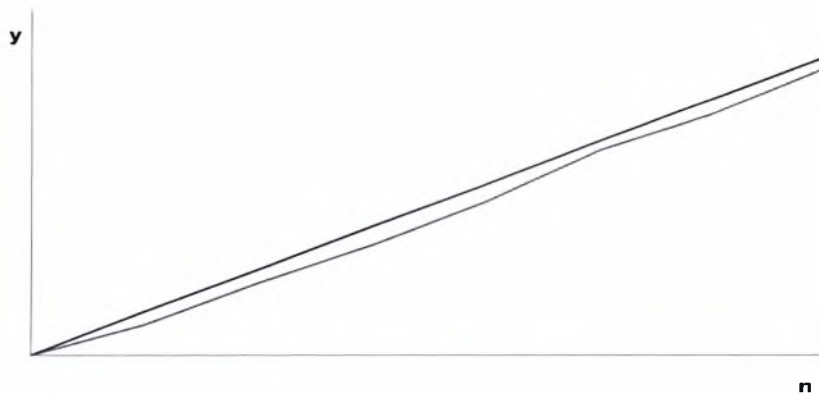
$$a_{mnt}, d_{mnt}, f_{mnt} \text{ binary, } m = 1, \dots, |M|, n = 1, \dots, |N_m|, t = 2, \dots, T + 1$$

## 4.2 Στόχος Αλγορίθμου

Στόχος του αλγορίθμου είναι να εξάγει αποτελέσματα τέτοια, ώστε η νοητή γραμμή που περιγράφει τα υπόλοιπα ΩΠ των Α/Φ να συγκλίνει με την ευθεία που αντιστοιχεί στην ιδανική περίπτωση.

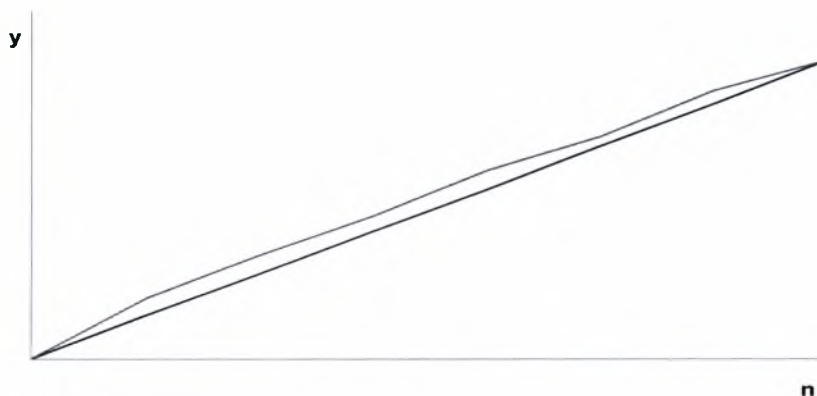
Η περίπτωση στην οποία η λύση του αλγορίθμου συμπίπτει με την ιδανική είναι εξαιρετικά σπάνια, τόσο για τον αλγόριθμο που περιγράφεται όσο και για οποιοδήποτε άλλο υπολογιστικό εργαλείο χρησιμοποιηθεί για τη λύση του προβλήματος. Η επίτευξη μιας τέτοιας λύσης προϋποθέτει την ύπαρξη συγκεκριμένων δεδομένων στο πρόβλημα, όπως για παράδειγμα τα υπόλοιπα των ΩΠ των Α/Φ στην αρχή του υπό εξέταση χρονικού ορίζοντα, το απαιτούμενο πτητικό έργο, το διαθέσιμο αριθμό Ε/Ω στο υπόστεγο συντήρησης, ακόμη και από τις παραμέτρους που έχουν τεθεί.

Στη γενική περίπτωση, ο στόχος είναι τα εξαγόμενα υπόλοιπα ΩΠ των Α/Φ να αποτελούν σημεία μίας γραμμής, η οποία είναι όσο το δυνατόν παράλληλη με την ιδανική γραμμή. Σε πρόβλημα με μεγάλο απαιτούμενο πτητικό έργο, σε σύγκριση με τα διαθέσιμα υπόλοιπα των ΩΠ των Α/Φ, η γραμμή-λύση που προκύπτει θα είναι παράλληλη στο μεγαλύτερο τμήμα της με την ιδανική ευθεία και θα βρίσκεται κάτω από αυτή (Σχήμα 4-1).



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα ροής A/Φ με μεγάλη απαίτηση πτητικού έργου

Αντίθετα, σε πρόβλημα με μικρό σχετικά απαιτούμενο πτητικό έργο, η εξαγόμενη γραμμή θα είναι σχεδόν παράλληλη με την ιδανική και πάνω από αυτή (Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-2: Διάγραμμα ροής A/Φ με μικρή απαίτηση πτητικού έργου

Η χρονική στιγμή στην οποία οι προαναφερθείσες γραμμές θα γίνουν παράλληλες δεν είναι γνωστή από την αρχή, αφού εξαρτάται από τα εκάστοτε δεδομένα και γι' αυτό ποικίλλει από πρόβλημα σε πρόβλημα. Υπενθυμίζεται ότι μέσω της παραλληλότητας των γραμμών, δηλαδή της ομαλότητας της κατανομής των

υπολειπόμενων χρόνων πτήσης των Α/Φ, εξασφαλίζεται η χωρίς προβλήματα εναλλαγή (rotation) των Α/Φ στο σταθμό συντήρησης.

Μέχρι αυτό το σημείο αναφέρθηκαν μόνο τα υπόλοιπα ΩΠ ως εξαγόμενα αποτελέσματα του αλγορίθμου αφού η γραφική τους απεικόνιση είναι το κριτήριο για την επιτυχή ή όχι λειτουργία του. Παρόλα αυτά, τα υπόλοιπα ΩΠ που προκύπτουν για τα Α/Φ των Μοιρών σε όλο το βάθος του χρονικού ορίζοντα που εξετάζεται αποτελούν δευτερεύουσας σημασίας μεταβλητές. Οι πραγματικές μεταβλητές απόφασης είναι οι χρόνοι πτήσης κάθε Α/Φ σε κάθε χρονική περίοδο. Όταν αυτές προσδιοριστούν, τότε στη συνέχεια υπολογίζονται εύκολα και τα αντίστοιχα υπόλοιπα ΩΠ.

Συνεπώς, πρωτεύων στόχος του αλγορίθμου είναι να υπολογίσει πόσο πρέπει να πετάξει κάθε Α/Φ σε κάθε χρονική περίοδο ώστε η γραφική παράσταση των αντίστοιχων υπόλοιπων ΩΠ να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την ιδανική ευθεία.

### **4.3 Βασικά Στάδια Αλγορίθμου**

Για να είναι δυνατή η σωστή λειτουργία του αλγορίθμου, πρέπει να εκτελείται αρχικά ο προγραμματισμός του έργου της συντήρησης για τα καθηλωμένα Α/Φ και κατόπιν να ακολουθεί ο προγραμματισμός του πτητικού έργου των πτήσιμων Α/Φ. Αυτό ισχύει διότι πρέπει να είναι γνωστός, από την αρχή της υπό εξέταση χρονικής περιόδου ( $t$ ), ο αριθμός των πτήσιμων Α/Φ της επόμενης χρονικής περιόδου ( $t+1$ ). Η γνώση του συγκεκριμένου στοιχείου συνδέεται άμεσα με τον αριθμό των διαθέσιμων θέσεων στο σταθμό συντήρησης (ΣΣ) και είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι καθορίζει ποια πτήσιμα Α/Φ θα πρέπει να εξαντλήσουν το υπόλοιπο των ΩΠ τους και εν συνεχεία να εισέρχονται για εκτέλεση εργασιών συντήρησης.

#### 4.4 Προγραμματισμός Έργου Συντήρησης

Η πρώτη σημαντική απόφαση που πρέπει να λαμβάνεται αναφορικά με τη λειτουργία του ΣΣ είναι ο καταμερισμός των διαθέσιμων Ε/Ω στα Α/Φ που καταλαμβάνουν τις θέσεις του. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η χρήση ενός κριτηρίου βάσει του οποίου θα καθορίζεται η προτεραιότητα στην παροχή των διαθέσιμων Ε/Ω στα κατηλωμένα Α/Φ.

Το κριτήριο αυτό πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη τον πτητικό φόρτο των Μοιρών, των οποίων Α/Φ υπάρχει ή υπάρχουν εντός του ΣΣ. Έτσι, εισάγεται η έννοια του Συντελεστή Πτητικού Φόρτου (Flight Load Factor – FLF), ο οποίος είναι ένας αδιάστατος αριθμός, που χαρακτηρίζει μία Μοίρα  $m$  για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο  $t$ , και ο οποίος μπορεί να οριστεί ως το πηλίκο του προγραμματισμένου πτητικού έργου της για την τρέχουσα χρονική περίοδο  $S_{mt}$  προς το άθροισμα των υπολοίπων των ΩΠ των Α/Φ της (πλήθος  $N_m$ ) στην αρχή της περιόδου  $t$ :

$$(FLF)_{mt} = \frac{S_{mt}}{\sum y_{mni}}, \quad n = 1, 2, \dots, N_m$$

Είναι προφανές ότι προτεραιότητα στη διάθεση Ε/Ω πρέπει να δοθεί στα Α/Φ της Μοίρας με το μεγαλύτερο FLF, διότι είτε είναι επιφορτισμένη με μεγαλύτερο πτητικό έργο από τις άλλες Μοίρες, είτε τα Α/Φ της υστερούν σε διαθέσιμα υπόλοιπα ΩΠ συγκρινόμενα με τα Α/Φ των άλλων Μοιρών ή και τα δύο ταυτόχρονα.

Αρχικά, συγκρίνονται οι διαθέσιμες Ε/Ω του ΣΣ με αυτές που απαιτούνται για ένα Α/Φ. Αν επαρκούν, αποδίδονται στο Α/Φ και αυτό καθίσταται πτήσιμο από την επόμενη χρονική περίοδο. Αν υπάρχει έλλειμμα διαθέσιμων Ε/Ω, στο Α/Φ αποδίδονται όσες υπάρχουν και η συντήρησή του συνεχίζεται την επόμενη χρονική περίοδο. Προκειμένου οι κατειλημμένες θέσεις του σταθμού συντήρησης να γίνουν



διαθέσιμες για τα διαθέσιμα Α/Φ που τελούν εν αναμονή εισόδου σε αυτό, η διάθεση των Ε/Ω στα υπό συντήρηση Α/Φ είναι συνεχής μέχρι την ολοκλήρωση των απαιτούμενων εργασιών.

Έστω ότι ένα Α/Φ από κάθε Μοίρα είναι στο σταθμό συντήρησης. Αναλυτικά, τα βήματα που θα εκτελέσει ο αλγόριθμος είναι τα ακόλουθα:

1. Υπολογισμός των FLF των Μοιρών.
2. Κατάταξη των Μοιρών σε φθίνουσα σειρά των FLF τους.
3. Σύγκριση των διαθέσιμων Ε/Ω (B) με τις απαιτούμενες (g) του Α/Φ που ανήκει στην πρώτη Μοίρα της λίστας του προηγούμενου βήματος. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

α.  $B > g$ , οπότε στο Α/Φ της πρώτης Μοίρας αποδίδονται  $h=g$  Ε/Ω και μένουν για τα Α/Φ των άλλων Μοιρών  $B' = B - h = B - g$  διαθέσιμες Ε/Ω. Συνέχεια στο βήμα 4.

β.  $B \leq g$ , οπότε στο Α/Φ της πρώτης Μοίρας αποδίδονται  $h=B$  Ε/Ω και δεν υπάρχουν διαθέσιμες Ε/Ω για τα Α/Φ των άλλων Μοιρών. Ο αλγόριθμος υπολογισμού των χρόνων συντήρησης τερματίζεται.

4. Επανάληψη του βήματος 3 για το δεύτερο, τρίτο κ.ο.κ. Α/Φ της λίστας.

Στην περίπτωση που υπάρχει τουλάχιστον μία Μοίρα με περισσότερα από ένα Α/Φ στο υπόστεγο, προκύπτει η ανάγκη επαναυπολογισμού του FLF της κάθε φορά στην οποία ολοκληρώνονται οι εργασίες συντήρησης σε κάποιο Α/Φ της. Ο παρανομαστής του νέου FLF της συγκεκριμένης Μοίρας θα είναι προσαυξημένος κατά το ποσό των διαθέσιμων ΩΠ που έχει κάθε Α/Φ μετά την ολοκλήρωση της συντήρησής του.

Ο FLF, εκτός από τον προγραμματισμό του έργου της συντήρησης, χρησιμοποιείται και για τον προγραμματισμό του πτητικού έργου.

#### 4.5 Προγραμματισμός Παραγόμενου Πτητικού Έργου

Ο καθορισμός των Α/Φ που τελικά εισέρχονται στο υπόστεγο είναι μία διαδικασία ιδιαίτερα σημαντική για την περαιτέρω εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αφορούν την πτητική εκμετάλλευση των Α/Φ. Σε κάθε περίπτωση, τα Α/Φ που αποστέλλονται για συντήρηση είναι αυτά με το ελάχιστο υπόλοιπο ΩΠ στη Μοίρα τους.

Η επιλογή των Μοιρών που θα αποστείλουν Α/Φ για συντήρηση γίνεται με χρήση του FLF και συγκεκριμένα η Μοίρα με το μεγαλύτερο FLF έχει προτεραιότητα έναντι των άλλων. Οι ενέργειες του αλγορίθμου εκτελούνται ξεχωριστά για κάθε Μοίρα ανά χρονική περίοδο, επαναλαμβάνονται μέχρι το τέλος του υπό εξέταση χρονικού ορίζοντα και είναι οι ακόλουθες:



1. Κατάταξη των Α/Φ σε αύξουσα σειρά των υπολοίπων ΩΠ τους.
2. Υπολογισμός της κλίσης της ιδανικής ευθείας την επόμενη χρονική περίοδο.
3. Υπολογισμός της απόκλισης  $dy$  των πραγματικών υπολοίπων ΩΠ των Α/Φ από τα ιδανικά.
4. Κατάταξη των  $dy$  σε φθίνουσα σειρά.
5. Κατανάλωση ΩΠ από κάθε Α/Φ μέχρι να αποκτήσει την  $dy$  του επόμενου Α/Φ στη λίστα. Διαδικασία που επαναλαμβάνεται μέχρι εξάντλησης του απαιτούμενου πτητικού έργου της Μοίρας και χωρίς παραβίαση των περιορισμών  $X_{max}$  και  $Y_{min}$ .

Στην επόμενη παράγραφο επιχειρείται μία προσπάθεια εμβάθυνσης στα ανωτέρω βήματα του αλγορίθμου, ώστε να επιτευχθεί η πληρέστερη κατανόησή τους.

#### 4.6 Εμβάθυνση στη Λειτουργία του Αλγορίθμου

Όπως φαίνεται στο γράφημα που περιγράφει την ιδανική κατάσταση (Σχήμα 3-1), τα  $y$  των  $A/\Phi$  αποτελούν σημεία μίας ευθείας που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και το σημείο  $(N, Y)$ , όπου  $N$  είναι το πλήθος των διαθέσιμων  $A/\Phi$  την επόμενη χρονική περίοδο. Άρα η κλίση  $s$  της ευθείας είναι  $Y/N$ . Ο δείκτης του διαθέσιμου  $A/\Phi$  με το ελάχιστο  $y$  είναι 1 και συνεπώς  $y=s(1)=s$ . Ομοίως, ο δείκτης του  $A/\Phi$  με το επόμενο μικρότερο  $y$  είναι 2 και το αντίστοιχο ιδανικό  $y=s(2)=2s$ .

Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι τα  $y$  είναι ταξινομημένα σε αύξουσα σειρά. Συνεπώς, για να επιτευχθεί σύγκριση της γραμμής που περιγράφει την πραγματική κατάσταση με την ιδανική γραμμή και κατόπιν προσπάθεια για ομαλοποίησή της, πρέπει αρχικά να ταξινομηθούν σε αύξουσα σειρά τα  $y$  των διαθέσιμων  $A/\Phi$  της επόμενης χρονικής περιόδου. Τα εν λόγω  $A/\Phi$  είναι γνωστά μετά την ολοκλήρωση του προγραμματισμού του έργου της συντήρησης, ο οποίος περιγράφηκε στο Υποκεφάλαιο 4.4.

Αφού ταξινομηθούν τα  $A/\Phi$  με βάση το  $y$  τους, υπολογίζεται η διαφορά  $dy=y-y_{opt}$ , δηλαδή η απόκλιση των πραγματικών υπολειπόμενων χρόνων πτήσης από τους αντίστοιχους βέλτιστους. Είναι προφανές ότι  $A/\Phi$  με  $dy>0$  βρίσκονται πάνω από την ιδανική ευθεία,  $dy<0$  κάτω από αυτήν και όταν  $dy=0$  το  $A/\Phi$  είναι επί της ιδανικής ευθείας.

Τα  $A/\Phi$  που βρίσκονται πάνω από την ιδανική ευθεία έχουν  $y$  μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ιδανικό, δηλαδή πλεόνασμα  $\Omega\Pi$ . Συνεπώς, είναι αναμενόμενο να πετάξουν περισσότερο από τα  $A/\Phi$  που βρίσκονται κάτω από την ιδανική ευθεία, υπό

την προϋπόθεση μη παραβίασης κάποιου περιορισμού. Ομοίως, τα  $A/\Phi$  κάτω από την ευθεία έχουν λιγότερες διαθέσιμες  $\Omega\Pi$  από τις αντίστοιχες ιδανικές, δηλαδή έλλειμμα  $\Omega\Pi$ . Όσο περισσότερο απέχει ένα  $A/\Phi$  κάτω από την ιδανική ευθεία, τόσο μειώνεται η πιθανότητα να πετάξει προκειμένου να μην απομακρυνθεί περισσότερο από αυτή. Υπογραμμίζεται ότι, σε κάθε περίπτωση πλην της εξόδου  $A/\Phi$  από το σταθμό συντήρησης, το  $y$  κάποιου  $A/\Phi$  μπορεί μόνο να μειωθεί, δηλαδή το  $A/\Phi$  να μετακινηθεί προς τα κάτω στο διάγραμμα ροής  $A/\Phi$ .

Υπάρχει περίπτωση στην οποία όλα τα  $A/\Phi$  βρίσκονται πάνω από την ιδανική ευθεία. Μία πρακτική προσέγγιση του θέματος θα ήταν το «κατέβασμα» των  $A/\Phi$  που είναι πιο κοντά στην ευθεία πάνω σε αυτή και στη συνέχεια των πιο απομακρυσμένων. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε λανθασμένη λύση, αφού μπορεί ορισμένα  $A/\Phi$  να αποκτούσαν τα επιθυμητά  $y$  αλλά τα  $y$  των υπολοίπων  $A/\Phi$  θα απείχαν συγκριτικά πολύ από τα ιδανικά. Επαναλαμβάνεται ότι σκοπός του αλγορίθμου είναι η εκμετάλλευση των  $A/\Phi$  με τρόπο τέτοιο ώστε η μορφή της γραμμής που περιγράφει τα  $y$  τους να μοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο με αυτήν της ιδανικής κατάστασης. Άρα, ο αλγόριθμος ξεκινά με τα  $A/\Phi$  που απέχουν περισσότερο από την ιδανική ευθεία και συνεχίζει σε φθίνουσα σειρά των  $dy$  τους.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση στην οποία όλα τα  $A/\Phi$  έχουν έλλειμμα  $\Omega\Pi$  θα μπορούσαν να κρατηθούν κοντά στην ιδανική ευθεία τα  $A/\Phi$  με τα μεγαλύτερα  $dy$  και να αναλώσουν χρόνο πτήσης τα πιο απομακρυσμένα. Με αυτόν τον τρόπο, σίγουρα δεν θα ήταν δυνατή η τροποποίηση της γραμμής που περιγράφει την πραγματική κατάσταση σε μία με μορφή που προσεγγίζει καλύτερα την ιδανική ευθεία. Έτσι, ο αλγόριθμος ξεκινάει από τα  $A/\Phi$  που απέχουν λιγότερο από την ιδανική ευθεία, δηλαδή αυτά με το μεγαλύτερο  $dy$  και ακολουθούν τα υπόλοιπα  $A/\Phi$  σε φθίνουσα σειρά των  $dy$  τους.

Έτσι στη γενική περίπτωση, τα  $A/\Phi$  ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά των  $dy$ , οπότε δημιουργείται μία λίστα. Το  $A/\Phi$  στην κορυφή της λίστας, δηλαδή αυτό με το μεγαλύτερο  $dy$ , καλείται να πετάξει τόσες ώρες όσες χρειάζονται για να φτάσει στο δεύτερο  $A/\Phi$  της λίστας. Έτσι, τα δύο πρώτα  $A/\Phi$  της λίστας αποκτούν το ίδιο  $dy$ , δηλαδή ισαπέχουν από τα αντίστοιχά τους σημεία της ιδανικής ευθείας. Άρα, τα δύο πρώτα  $A/\Phi$  της λίστας αποτελούν σημεία μίας ευθείας παράλληλης με την ιδανική. Στη συνέχεια, τα δύο πρώτα  $A/\Phi$  πετάνε τόσο μέχρι το  $dy$  τους να εξισωθεί με το  $dy$  του τρίτου  $A/\Phi$  της λίστας. Πλέον, τα σημεία που χαρακτηρίζουν το  $y$  των τριών πρώτων  $A/\Phi$  της Μοίρας ανήκουν σε μία ευθεία παράλληλη με την ιδανική. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να καλυφθεί η απαίτηση παραγωγής του προγραμματισμένου πτητικού έργου.

Με απλά λόγια, ο αλγόριθμος μπορεί να συγκριθεί με μία «σκούπα», η οποία ξεκινά από το  $A/\Phi$  με το μέγιστο  $dy$ , δηλαδή αυτό που βρίσκεται πάνω από την ιδανική γραμμή και ταυτόχρονα απέχει από αυτήν περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο  $A/\Phi$ . Στη συνέχεια, μετακινούμενη προς τα κάτω και παραμένοντας παράλληλη με την ιδανική ευθεία, παρασύρει σταδιακά τα διαθέσιμα  $A/\Phi$ . Με τον όρο «παρασύρει», εννοείται η κατανάλωση χρόνου πτήσης από κάθε  $A/\Phi$  που μετακινείται προς τα κάτω.

#### 4.7 Περιορισμοί

Στο πρόβλημα εμπλέκονται ορισμένες παράμετροι οι οποίες σκοπό έχουν να θέσουν όρια σε κάποιες λειτουργίες του αλγορίθμου. Αυτές που δρουν πιο καταλυτικά, λαμβάνοντας υπόψη τα πειράματα που εκτελέστηκαν, είναι οι  $X_{max}$  και  $Y_{min}$ . Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα του τρόπου με τον οποίο οι εν λόγω περιορισμοί μπορούν να επηρεάσουν τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Σε οποιαδήποτε επανάληψη μπορεί να προκύψει περίπτωση παραβίασης κάποιου περιορισμού. Αν, για παράδειγμα, ένα Α/Φ που καλείται να πετάξει  $x$  ώρες ώστε να αποκτήσει ίδια απόσταση από την ιδανική ευθεία σε σχέση με το επόμενο Α/Φ της λίστας και έχει υπόλοιπο ΩΠ  $y$ , με  $y < x + Y_{min}$ , είναι προφανές ότι πετώντας  $x$  ώρες, παραβιάζει τον περιορισμό  $Y_{min}$ . Φυσικά, ο αλγόριθμος δεν θα επιτρέψει την εν λόγω παραβίαση και τελικά το Α/Φ θα πετάξει ακριβώς  $(y - Y_{min})$  ώρες, εφόσον δεν παραβιάζεται κάποιος άλλος περιορισμός.

Άλλη περίπτωση είναι αυτή ενός Α/Φ το οποίο έχει ήδη πετάξει  $x_1$  ώρες κατά τη διάρκεια της υπό εξέταση χρονικής περιόδου και στην επόμενη επανάληψη καλείται να πετάξει επιπλέον  $x_2$  ώρες, με  $x_2 > X_{max} - x_1$ . Αν το Α/Φ πετούσε  $x_2$  ώρες θα παραβίαζε τον περιορισμό  $X_{max}$  και γι' αυτό τελικά πετάει ακριβώς  $(X_{max} - x_1)$  ώρες.

Όταν, σε κάποια επανάληψη, υπάρχει ομάδα Α/Φ που πρέπει να πετάξουν  $x$  ώρες έκαστο και λόγω ορισμένων από αυτά (ενός ή περισσότερων) ο αλγόριθμος οδηγείται προς παραβίαση κάποιου περιορισμού, τότε τα επηρεαζόμενα από τους περιορισμούς Α/Φ πετάνε το μέγιστο επιτρεπτό αριθμό ωρών που αντιστοιχεί στο καθένα και τα υπόλοιπα τελικά πετάνε  $x$  ώρες.

#### 4.8 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε η μαθηματική μορφοποίηση του προβλήματος. Ακολούθησαν εκτενής αναφορά στο στόχο του αλγορίθμου και περιγραφή των βασικών σταδίων του. Το πρώτο είναι ο προγραμματισμός του έργου της συντήρησης και το δεύτερο ο προγραμματισμός του πτητικού έργου. Αναλύθηκε η λειτουργία του αλγορίθμου, που στοχεύει στη σύγκλιση του πραγματικού διαγράμματος ροής Α/Φ με το ιδανικό. Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε μία προσπάθεια εμβάθυνσης στη λογική του αλγορίθμου και το κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με μία

αναφορά στη σημασία και το ρόλο ορισμένων περιορισμών επί της αλγοριθμικής λειτουργίας.

## Κεφάλαιο 5 Περιγραφή Κώδικα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται εν συντομία η δομή του λογισμικού, μέσω του οποίου, με χρήση κώδικα Visual Basic for Applications (VBA), υλοποιείται ο αλγόριθμος που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4. Γίνεται αναφορά στις λειτουργικές μονάδες της βάσης δεδομένων, που περιέχουν τον κώδικα VBA και στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εφαρμογές λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

### 5.1 Δομή της Βάσης Δεδομένων

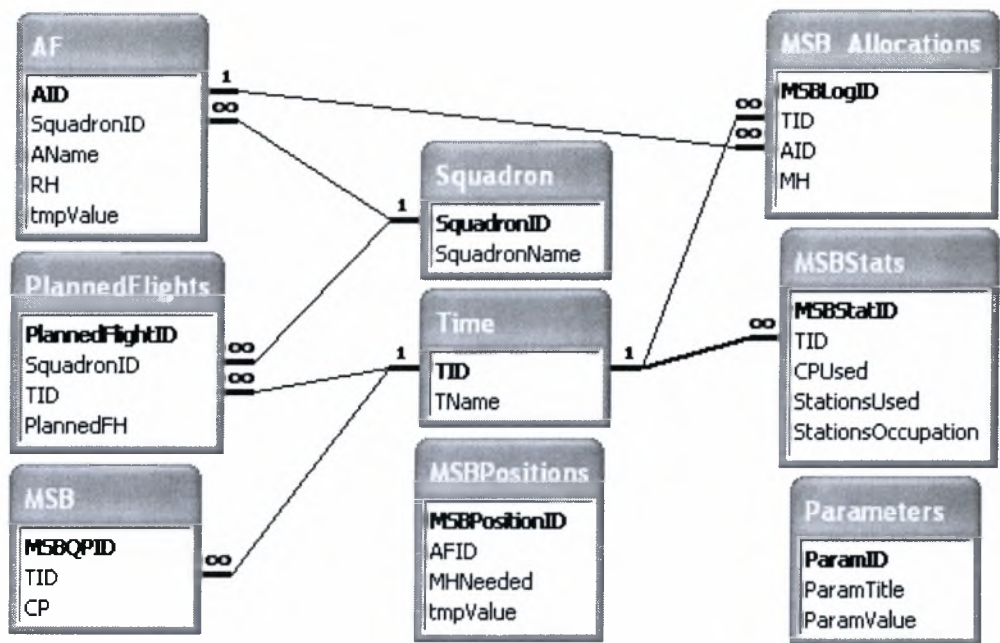
Η λογική του αλγορίθμου, που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4, αποτυπώνεται στον κώδικα Visual Basic που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Ο εν λόγω κώδικας περιέχεται σε μία βάση δεδομένων της Microsoft Access, μέσω της οποίας είναι δυνατή η εισαγωγή των δεδομένων υπό μορφή πινάκων. Οι σχέσεις μεταξύ των πινάκων φαίνονται στο Σχήμα 5-1.

Συνοπτικά παρατίθενται ορισμένες πληροφορίες για κάθε πίνακα της βάσης δεδομένων:

- «AF»: Σε αυτόν τον πίνακα εισάγονται οι πληροφορίες που αφορούν το κάθε Α/Φ στην αρχή του ορίζοντα προγραμματισμού, όπως η Μοίρα στην οποία ανήκει, το όνομα του (serial number ή Α/Φ 1 της 1<sup>ης</sup> Μοίρας κλπ.) και τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης του.



- «PlannedFlights»: Σε αυτόν τον πίνακα εισάγεται το προγραμματισμένο πτητικό έργο ανά Μοίρα και χρονική περίοδο.
- «MSB»: Σε αυτόν τον πίνακα εισάγεται η χωρητικότητα (capacity) του ΣΣ (Μοίρας Συντήρησης Βάσης) σε Ε/Ω για κάθε χρονική περίοδο.
- «Squadron»: Εδώ εισάγονται οι Μοίρες που εμπλέκονται στο πρόβλημα.
- «Time»: Σε αυτόν τον πίνακα εισάγεται το πλήθος των περιόδων του ορίζοντα προγραμματισμού.
- «MSBPositions»: Σε αυτόν τον πίνακα εισάγεται το πλήθος των σταθμών εργασίας του Σ.Σ και τα Α/Φ που είναι ενταγμένα στους σταθμούς αυτούς, καθώς και ο αριθμός των υπολειπόμενων Ε/Ω για την ολοκλήρωση της συντήρησης των καθηλωμένων Α/Φ στην αρχή του ορίζοντα προγραμματισμού.
- «MSB\_Allocations»: Σε αυτόν τον πίνακα αποθηκεύονται αφού «τρέξει» ο κώδικας οι αποδιδόμενες Ε/Ω του ΣΣ ανά Α/Φ και χρονική περίοδο.
- «MSBStats»: Σε αυτόν τον πίνακα, μετά το «τρέξιμο» του κώδικα, αποθηκεύονται στατιστικά στοιχεία σχετικά με την εκμετάλλευση του ΣΣ σε κάθε χρονική περίοδο.
- «Parameters»: Σε αυτόν τον πίνακα εισάγονται το όνομα και η τιμή κάθε παραμέτρου που εμπλέκεται στο πρόβλημα (π.χ.  $Y$ ,  $X_{\max}$  κλπ.).

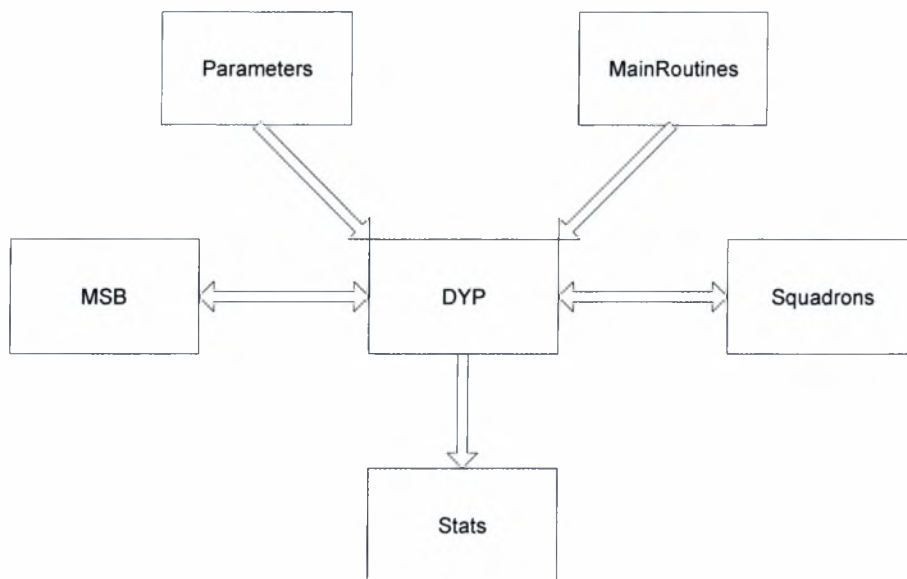


Σχήμα 5-1: Σχέσεις πινάκων της βάσης δεδομένων

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει έξι λειτουργικές μονάδες (modules), οι οποίες περιέχουν τον κώδικα. Επιγραμματικά, αυτές είναι:

- «DYP»
- «MainRoutines»
- «MSB»
- «Parameters»
- «Squadrons»
- «Stats»

Οι σχέσεις μεταξύ των λειτουργικών μονάδων, που καθορίζουν την μεταφορά ή ανταλλαγή δεδομένων, απεικονίζεται στο Σχήμα 5-2.



Σχήμα 5-2: Σχέσεις λειτουργικών μονάδων (modules)

Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρατίθεται μία σύντομη περιγραφή των εν λόγω λειτουργικών μονάδων.

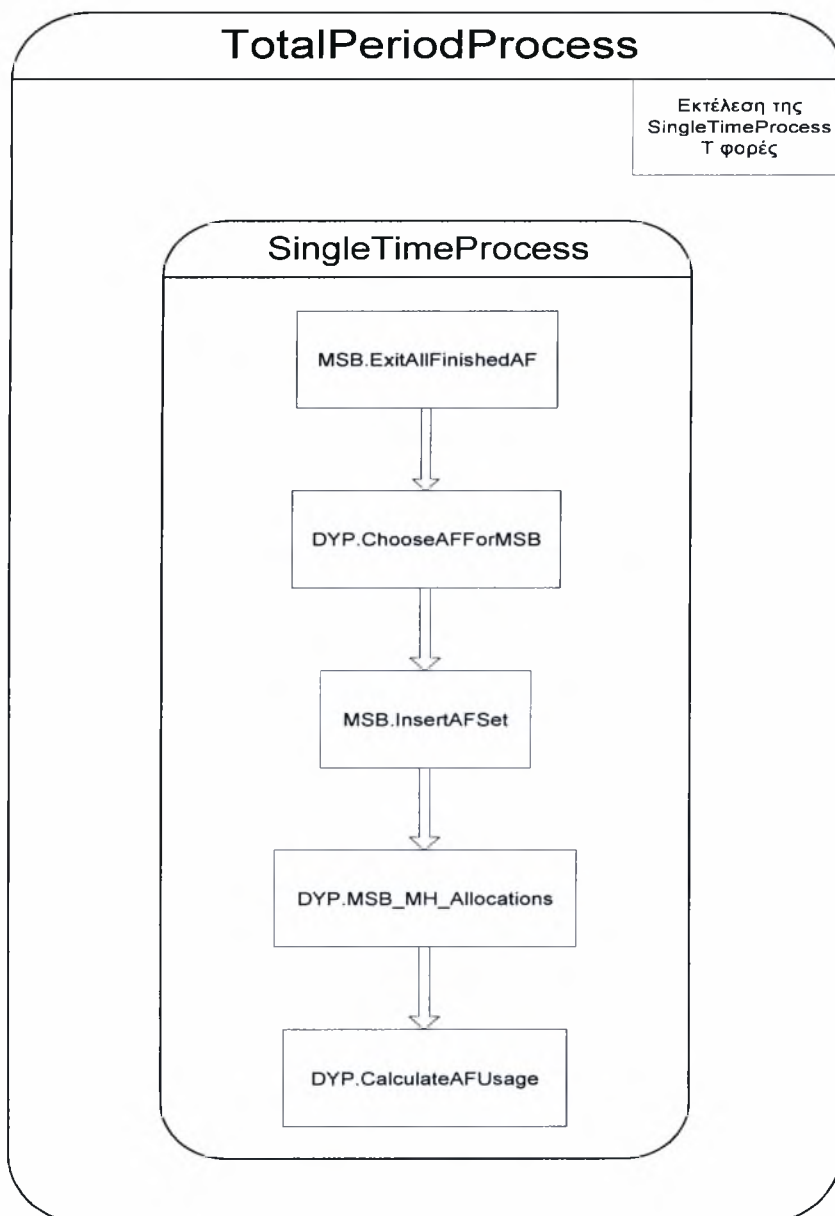
## 5.2 Περιγραφή Λειτουργικών Μονάδων

Η λειτουργική μονάδα «DYP» περιέχει ουσιαστικά όλη την λογική των αποφάσεων που λαμβάνονται κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου. Μετά τη λήψη των αποφάσεων, δίνει εντολές στις άλλες λειτουργικές μονάδες να εκτελέσουν τις αντίστοιχες ενέργειες. Ουσιαστικά, λειτουργεί σαν τον Διευθυντή Υποστήριξης σε μία πραγματική Πτέρυγα, ο οποίος είναι ο επικεφαλής Αξιωματικός Συντήρησης και είναι αυτός που έχει τον τελευταίο λόγο σε θέματα λήψης αποφάσεων που αφορούν τη συντήρηση των Α/Φ.

Η λειτουργική μονάδα «MainRoutines» περιλαμβάνει δύο ρουτίνες. Η «SingleTimeProcess» είναι κύρια ρουτίνα που εκτελείται ξεχωριστά για κάθε χρονική περίοδο του ορίζοντα προγραμματισμού. Περιλαμβάνει τις ακόλουθες υπορουτίνες:

- «MSB.ExitAllFinishedAF», η οποία είναι η αρμόδια υπορουτίνα για την εξαγωγή των Α/Φ, των οποίων η συντήρηση έχει ολοκληρωθεί, από το σταθμό συντήρησης,
- «DYP.ChooseAFForMSB», μέσω της οποίας επιλέγονται τα Α/Φ που πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια για εισαγωγή στο σταθμό συντήρησης και εκτέλεση προγραμματισμένης επιθεώρησης,
- «MSB.InsertAFSet», που είναι η υπορουτίνα μέσω της οποίας εκτελείται η εισαγωγή των Α/Φ στο σταθμό συντήρησης,
- «DYP.MSB\_MH\_Allocations», μέσω της οποίας αποφασίζεται και εκτελείται η κατανομή των διαθέσιμων Ε/Ω στα υπό συντήρηση Α/Φ, σύμφωνα με τη λογική του αλγορίθμου που περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 4.4 και
- «DYP.CalculateAFUsage», η οποία είναι η υπορουτίνα που καθορίζει την κατανομή του απαιτούμενου πτητικού έργου σε όλα τα πτήσιμα Α/Φ, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 4.5.

Η «TotalPeriodProcess» είναι ρουτίνα που πρέπει να εκτελεστεί από το χρήστη. Ο ρόλος της είναι η εκτέλεση όλων των υπολογισμών για όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού που έχει οριστεί. Η λειτουργία του module «MainRoutines» απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 5-3.



Σχήμα 5-3: Λειτουργική μονάδα «MainRoutines»

Η λειτουργική μονάδα «MSB» περιέχει όλες τις ρουτίνες με τις οποίες ο κώδικας μπορεί να διαβάσει δεδομένα σχετικά με το σταθμό συντήρησης ή να εκτελέσει ενέργειες στις οποίες εμπλέκεται ο τελευταίος. Δεν περιέχει τη λογική των αποφάσεων.

Η λειτουργική μονάδα «Parameters» περιέχει όλες τις ρουτίνες για την ανάγνωση των γενικών παραμέτρων του προγράμματος, όπως το διάστημα φάσης

( $Y$ ), τον συνολικό αριθμό των απαιτούμενων  $E/\Omega$  για την ολοκλήρωση της προγραμματισμένης επιθεώρησης ενός  $A/\Phi$  ( $G$ ), τον ελάχιστο αριθμό  $\Omega\Pi$  ενός διαθέσιμου  $A/\Phi$  ( $Y_{min}$ ) και τον μέγιστο αριθμό  $\Omega\Pi$  που μπορεί ένα  $A/\Phi$  να καταναλώσει κατά τη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου ( $X_{max}$ ).

Η λειτουργική μονάδα «Squadrons» περιέχει όλες τις ρουτίνες με τις οποίες μπορούν να διαβαστούν δεδομένα που αφορούν τα  $A/\Phi$  των Μοιρών, όπως για παράδειγμα οι υπολοιπόμενοι χρόνοι πτήσης τους. Παράλληλα, περιέχει τις ρουτίνες μέσω των οποίων μπορούν να εκτελεστούν ενέργειες στα  $A/\Phi$ , π.χ. κατανάλωση  $\Omega\Pi$ . Δεν περιέχει τη λογική των αποφάσεων.

Η λειτουργική μονάδα «Stats» περιέχει ρουτίνες που σχετίζονται με τη συλλογή στατιστικών στοιχείων κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Σε συγκεκριμένα σημεία της διαδικασίας εκτέλεσης, γίνεται κλήση αυτών των ρουτινών και αποθηκεύονται οι στατιστικές μετρήσεις σε κατάλληλους πίνακες της βάσης δεδομένων.

### 5.3 Βοηθητικές Εφαρμογές Λογισμικού

Για τη μελέτη της λειτουργίας του κώδικα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, εκτελέστηκαν διάφορα πειράματα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν προβλήματα που διέφεραν ως προς τα αριθμητικά δεδομένα. Για να είναι εφικτή η εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων έπρεπε να πληρούνται δύο προϋποθέσεις:

- Τα προς μελέτη προβλήματα έπρεπε να είναι τυχαία,
- Τα εξαγόμενα αποτελέσματα έπρεπε να συγκριθούν ως προς την ορθότητά τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενός δοκιμασμένου υπολογιστικού εργαλείου.

Για τους ανωτέρω λόγους χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα ένα πρόγραμμα Fortran και ένα μοντέλο AMPL.

## 5.4 Γεννήτρια Τυχαίων Προβλημάτων

Για τις ανάγκες της εκτέλεσης των πειραμάτων, μέσω των οποίων συγκρίθηκαν οι επιδόσεις του κώδικα που αναπτύχθηκε με τις αντίστοιχες του μοντέλου AMPL, χρησιμοποιήθηκε μία γεννήτρια τυχαίων προβλημάτων. Η εν λόγω γεννήτρια είναι ένα πρόγραμμα σε Fortran και αποτελεί το αποτέλεσμα μίας άλλης εργασίας που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Η εκτέλεση του προγράμματος Fortran περιλαμβάνει εννέα βήματα. Στα τρία πρώτα, ζητείται από τον χρήστη να καθορίσει το πλήθος των Μοιρών, των περιόδων του ορίζοντα προγραμματισμού και των Α/Φ κάθε Μοίρας. Σε κάθε ένα από τα επόμενα βήματα ο χρήστης καλείται να επιλέξει μία τιμή για έξι παραμέτρους – χαρακτηριστικά του προβλήματος. Επιγραμματικά αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Βήμα 1: Καθορισμός πτητικού έργου ( $S_{mt}$ ) των Μοιρών.
- Βήμα 2: Καθορισμός δυνατότητας παροχής  $E/\Omega$  ( $B_i$ ) από τον σταθμό συντήρησης.
- Βήμα 3: Καθορισμός χωρητικότητας - αριθμού θέσεων Α/Φ ( $C$ ) του σταθμού συντήρησης.
- Βήμα 4: Καθορισμός μέγιστου αριθμού ΩΠ ενός Α/Φ σε μία χρονική περίοδο ( $X_{max}$ ).
- Βήμα 5: Καθορισμός συντελεστών ελαστικότητας πτητικών απαιτήσεων ( $L, U$ ).

- Βήμα 6: Καθορισμός αριθμού πτήσιμων Α/Φ την πρώτη χρονική περίοδο.

Οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων, ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη (1, 2 ή 3), φαίνονται στον Πίνακα 5-1.

Από το σύνολο των παραμέτρων του προβλήματος, οι τιμές των  $M$ ,  $N_m$ ,  $T$ ,  $Y$ ,  $G$  και  $Y_{min}$  παρέμειναν σταθερές. Επίσης, ο αριθμός των καθηλωμένων Α/Φ την πρώτη χρονική περίοδο τέθηκε ίσος με τη χωρητικότητα  $C$  του σταθμού συντήρησης. Οι συντελεστές  $L$  και  $U$  δεν μεταβλήθηκαν σε κανένα πρόβλημα και παρέμειναν ίσοι με τη μονάδα, διότι ο κώδικας Visual Basic δεν περιλαμβάνει τη δυνατότητα παραγωγής πτητικού έργου διαφορετικού από αυτό που έχει αρχικά προγραμματιστεί.

	1	2	3
$S_{mt}$	80 - 120	130 - 170	180 - 220
$B_t$	400 - 500	500 - 600	600 - 700
$C$	$[0.1 \cdot m \cdot n]$	$[0.15 \cdot m \cdot n]$	$[0.2 \cdot m \cdot n]$
$X_{max}$	30	50	70
$L, U$	$L = U = 1$	$L = 0.95, U = 1.05$	$L = 0.9, U = 1.1$
# πτήσιμων Α/Φ	$[0.9 \cdot n]$	$[0.8 \cdot n]$	-

Πίνακας 5-1: Εξαγόμενες τιμές παραμέτρων από το πρόγραμμα Fortran

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα του προγράμματος Fortran είναι σε μορφή αρχείων .txt συμβατών με το μαθηματικό μοντέλο που παρατίθεται στην επόμενη παράγραφο.

## 5.5 Μαθηματικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης

Το μοντέλο AMPL που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των τυχαίων προβλημάτων βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στο Υποκεφάλαιο 4.1.



Διαφοροποιείται από το τελευταίο ως προς την αντικειμενική συνάρτηση που αποτελεί συνδυασμό των μεταβλητών απόφασης ( $z_i, i=1, 2, 3, 4$ ), των οποίων η μεγιστοποίηση επιδιώκεται στο αρχικό μαθηματικό μοντέλο. Συγκεκριμένα, οι εν λόγω μεταβλητές απόφασης, αρχικά πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές η καθεμία και στη συνέχεια αθροιζόμενες, αποτελούν την αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου AMPL, ο τύπος της οποίας είναι ο ακόλουθος:

$$z = w_1 \cdot 150 \cdot z_1 + w_2 \cdot 450 \cdot z_2 + w_3 \cdot z_3 + w_4 \cdot 3 \cdot z_4 \quad (7.1)$$

Αναφορικά με τους συντελεστές των όρων  $z_i, i = 1, 2, 3, 4$ , επισημαίνεται η ύπαρξη των συντελεστών βαρύτητας  $w_i, i = 1, 2, 3, 4$  με  $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$  μέσω των οποίων καθορίζεται η έμφαση που δίνεται σε κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης. Στα πειράματα που εκτελέστηκαν, οι συντελεστές βαρύτητας τέθηκαν ίσοι με 0,25, ώστε οι λύσεις που προκύπτουν να ικανοποιούν στον ίδιο βαθμό την απαίτηση μεγιστοποίησης όλων των μεταβλητών απόφασης.

Παράλληλα, κάθε ένα από τα γινόμενα  $w_i \cdot z_i, i = 1, 2, 3, 4$  πολλαπλασιάζεται επί ένα σταθερό αριθμό, διαφορετικό για κάθε γινόμενο. Αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου αυτά να ανήκουν στην ίδια τάξη μεγέθους. Δεδομένου ότι οι μεταβλητές  $z_1$  και  $z_2$  αφορούν διαθεσιμότητα Α/Φ, ενώ οι  $z_3$  και  $z_4$  σύνολα υπολειπόμενων χρόνων πτήσης, τα γινόμενα  $w_1 \cdot z_1$  και  $w_2 \cdot z_2$  θα είναι στη γενική περίπτωση κατά πολύ μικρότερα από τα  $w_3 \cdot z_3$  και  $w_4 \cdot z_4$ . Άρα, χωρίς την εμπλοκή των σταθερών αριθμών στον τύπο (7.1), η συμβολή των μεταβλητών  $z_1$  και  $z_2$  στη διαμόρφωση της τιμής θα ήταν πολύ μικρή σε σχέση με τη συμβολή των  $z_3$  και  $z_4$ . Η επιλογή των τιμών των σταθερών αριθμών (150, 450, 1 και 3) τεκμηριώνεται στις επόμενες παραγράφους, στις οποίες φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η κάθε μεταβλητή απόφασης τη διαμόρφωση της τελικής τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Έστω ότι οι προαναφερόμενες σταθερές δεν λαμβάνονται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση, οπότε ο τύπος που την περιγράφει είναι:

$$z = w_1 \cdot z_1 + w_2 \cdot z_2 + w_3 \cdot z_3 + w_4 \cdot z_4 \quad (7.2)$$

Από τους ορισμούς των μεταβλητών απόφασης  $z_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  (Υποκεφάλαιο 4.1) και με δεδομένη την ισότητα των συντελεστών βαρύτητας προκύπτει ότι το γινόμενο  $w_3 \cdot z_3$  λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης (7.2). Συνεπώς, οι υπόλοιποι όροι πρέπει να πολλαπλασιαστούν με κατάλληλους συντελεστές μεγαλύτερους της μονάδας, ώστε να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τον όρο  $w_3 \cdot z_3$ .

Τα πειράματα που εκτελέστηκαν, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, αφορούν μία Πτέρυγα με τρεις Μοίρες, σε κάθε μία από τις οποίες ανήκουν οκτώ Α/Φ με διάστημα φάσης  $Y=300$ . Έστω ότι  $z^{(1)}$ ,  $z^{(2)}$  είναι οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που περιγράφεται από τη σχέση (7.2), οι οποίες διαφέρουν μόνο ως προς την τιμή του κριτηρίου  $z_4$  και συγκεκριμένα  $z_4^{(2)} = z_4^{(1)} + 1$ . Δηλαδή, η δεύτερη λύση εξασφαλίζει ότι ο ελάχιστος συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης της κάθε Μοίρας είναι μεγαλύτερος κατά μία μονάδα σε όλο το βάθος του υπό μελέτη χρονικού ορίζοντα. Η μοναδιαία αύξηση της τιμής του  $z_4$  τριπλασιάζεται σε επίπεδο Πτέρυγας, δεδομένου του πλήθους των Μοιρών. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή στην τιμή του  $z_4$  πρέπει να πολλαπλασιάζεται επί 3, όπως φαίνεται στη σχέση (7.1).

Αντίστοιχα, έστω  $z^{(3)}$  και  $z^{(4)}$  είναι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (7.2), οι οποίες διαφέρουν μόνο ως προς το κριτήριο  $z_1$ , με  $z_1^{(4)} = z_1^{(3)} + 1$ . Η απουσία των σταθερών στον τύπο (7.2) υπονοεί ότι η επιρροή όλων των κριτηρίων στην τιμή του  $z$  είναι η ίδια, το οποίο στην πραγματικότητα δεν ισχύει, αφού γενικά δεν μπορεί η ύπαρξη, για παράδειγμα, δύο περισσότερων πτήσιμων Α/Φ να ισοδυναμεί με την

ύπαρξη δύο επιπλέον ωρών πτήσης. Άρα, προκύπτει η ανάγκη αναγωγής του αριθμού των πτήσιμων Α/Φ σε επίπεδο Πτέρυγας σε ένα αριθμό συγκρίσιμο με τον συνολικό υπολειπόμενο χρόνο πτήσης. Λαμβάνοντας υπόψη το ισχύον διάστημα φάσης και πολλαπλασιάζοντας τον μέσο όρο του (150) με το κριτήριο  $z_l$  εξασφαλίζεται η δυνατότητα σύγκρισης των γινομένων  $w_1 \cdot z_l$  και  $w_3 \cdot z_3$ .

Η χρήση του συντελεστή 450 στον τύπο (7.1) δικαιολογείται με συνδυασμό των σκεπτικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους.

## 5.6 Περίληψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε περιγραφή της βάσης δεδομένων στην οποία περιέχεται ο κώδικας VBA και των κυριότερων ρουτινών του, οι οποίες περιέχουν τη λογική του ευρετικού αλγορίθμου που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια, δόθηκαν ορισμένα στοιχεία σχετικά με δύο εφαρμογές λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του κώδικα VBA και τα οποία είναι απαραίτητα για την κατανόηση των πειραμάτων που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 6.

## **Κεφάλαιο 6 Πειράματα – Αποτελέσματα – Συγκρίσεις**

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται τα πειράματα που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της μελέτης της συμπεριφοράς του κώδικα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.. Αρχικά, ορίζονται τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα υποκεφάλαια για τη σύγκριση του κώδικα με το μαθηματικό μοντέλο AMPL και περιγράφεται η λογική βάσει της οποίας πραγματοποιήθηκε η πειραματική δοκιμασία του κώδικα. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων καθώς και οι τιμές των κριτηρίων σύγκρισης που εξασφαλίστηκαν, από την επίλυση των προβλημάτων μέσω των δύο υπολογιστικών εργαλείων. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη σύγκριση των εν λόγω κριτηρίων και της συνολικής συμπεριφοράς και λειτουργίας των δύο μοντέλων.

### **6.1 Κριτήρια Σύγκρισης**

Για τη σύγκριση του κώδικα Visual Basic με το μοντέλο AMPL είναι απαραίτητη η ύπαρξη ορισμένων κατάλληλων κριτηρίων. Αυτά πρέπει να περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα των Α/Φ τόσο σε επίπεδο Πτέρυγας όσο και σε επίπεδο Μοιρών, δεδομένου ότι η μεγιστοποίησή της αποτελεί διαρκή επιδίωξη όλων των φορέων ενός στρατιωτικού οργανισμού. Ταυτόχρονα, οι εκάστοτε τιμές της καθορίζουν την επιτυχή ή όχι λειτουργία τόσο των επιχειρησιακών διαδικασιών όσο και των διαδικασιών συντήρησης.

Παρόλα αυτά, η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας δεν αποτελεί ικανοποιητικό μέτρο της αποτελεσματικότητας, αν δε συνοδεύεται από επαρκή συνολικά υπόλοιπα ΩΠ των Α/Φ, σε επίπεδα Πτέρυγας και Μοιρών αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια σύγκρισης των δύο υπολογιστικών εργαλείων οι μεταβλητές απόφασης  $z_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$  του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 4.1, καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου AMPL η οποία αποτελεί συνδυασμό των εν λόγω μεταβλητών.

Είναι προφανές ότι, εφόσον επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση των επιμέρους όρων της και κατ' επέκταση των μεταβλητών  $z_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ .

Τέλος, σημαντικό χαρακτηριστικό ενός υπολογιστικού εργαλείου αποτελεί ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση των προβλημάτων και για αυτόν το λόγο, χρησιμοποιείται ως επιπρόσθετο κριτήριο σύγκρισης. Αντίθετα με τα πρώτα πέντε κριτήρια, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος που καταναλώνει ένας αλγόριθμος, τόσο πιο πετυχημένος και εύχρηστος θεωρείται.

## 6.2 Λογική Πειραμάτων

Στα πειράματα που εκτελέστηκαν ακολουθήθηκε η λογική που περιγράφεται στη συνέχεια. Αρχικά, παράχθηκαν μέσω του προγράμματος Fortran διάφορα τυχαία προβλήματα με παραμέτρους και αρχικές συνθήκες, που λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές ή κυμαίνονται εντός συγκεκριμένων πεδίων τιμών, σύμφωνα πάντα με τις επιλογές του χρήστη (Υποκεφάλαιο 5.4). Κατόπιν, τα εν λόγω προβλήματα επιλύθηκαν μέσω του μοντέλου AMPL και καταγράφηκαν οι τιμές των κριτηρίων που αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 6.1, καθώς και ο χρόνος επίλυσής τους. Τα ίδια

προβλήματα επιλύθηκαν μέσω του κώδικα Visual Basic και η πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε με τη σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι μέσω του μοντέλου AMPL εξασφαλίζεται η βέλτιστη λύση οποιουδήποτε υπό εξέταση προβλήματος. Αντίθετα, ο κώδικας Visual Basic βασίζεται σε εμπειρικές τεχνικές, έχει δηλαδή τη λογική ενός ευρετικού αλγορίθμου. Συνεπώς, είναι αναμενόμενη η εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων μέσω του μοντέλου AMPL, αναφορικά με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Όσον αφορά το εύρος τιμών του χρόνου επίλυσης των προβλημάτων, αυτό αναμένεται να είναι πιο περιορισμένο στην περίπτωση χρησιμοποίησης του κώδικα Visual Basic, λόγω των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιεί.

### 6.3 Αριθμητικό Παράδειγμα 1

Τα χαρακτηριστικά της πρώτης ομάδας προβλημάτων που επιλύθηκαν με τους δύο προαναφερόμενους τρόπους είναι τα ακόλουθα:

- Προγραμματισμένο πτητικό έργο των τριων Μοιρών:  $80 \leq S_{mt} \leq 120$ ,
- Δυνατότητα παροχής E/Ω από τον ΣΣ:  $400 \leq B_t \leq 500$ ,
- Αριθμός θέσεων A/Φ στον ΣΣ:  $C = 2$ ,
- Μέγιστος αριθμός ΩΠ ενός A/Φ σε μία χρονική περίοδο:  $X_{max} = 30$ .

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 7-1.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	23	7	2797	533	2749	1,73
	VB	22	6	2797	533	2599	6
2	AMPL	23	7	3287	883	3134	2,26
	VB	22	6	3107	838	2905,25	5
3	AMPL	22	7	2892	853	2975,25	1,5
	VB	22	6	2892	853	2862,75	5
4	AMPL	22	7	3992	1044	3393,5	0,14
	VB	22	6	4017	1157	3372	7
5	AMPL	22	7	3831	998	3318,75	2
	VB	22	7	3831	998	3318,75	4
6	AMPL	23	7	3987	1062	3443,25	0,58
	VB	22	6	4046	1062	3308	6
7	AMPL	23	7	3271	843	3100	0,91
	VB	22	6	3247	842	2943,25	5
8	AMPL	23	7	2712	744	2886	8,86
	VB	22	6	2731	743	2740	4
9	AMPL	23	7	3987	1062	3443,25	0,59
	VB	22	6	4046	1062	3308	5
10	AMPL	23	7	3858	1061	3410,25	0,87
	VB	22	7	3839	1061	3368	5
11	AMPL	23	7	2407	664	2749,75	2,6
	VB	22	6	2407	664	2599,75	4
12	AMPL	22	7	3831	998	3318,75	2
	VB	22	7	3538	998	3245,5	5
13	AMPL	22	7	2892	853	2975,25	1,5
	VB	22	6	2892	853	2862,75	4
14	AMPL	23	7	2407	664	2749,75	2,6
	VB	22	6	2407	664	2599,75	4
15	AMPL	22	7	2947	596	2796,25	1918
	VB	22	7	2656	596	2723,5	4

Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 1

## 6.4 Αριθμητικό Παράδειγμα 2

Το πρόβλημα του Υποκεφαλαίου 6.3 ξαναλύθηκε με τη διαφορά ότι ο μέγιστος αριθμός ΩΠ ενός Α/Φ σε μία χρονική περίοδο τέθηκε ίσος προς 50. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6-2.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	23	7	2797	533	2749	3,3
	VB	22	6	2797	533	2599	5
2	AMPL	23	7	3287	883	3134	4,1
	VB	22	6	3106	838	2905	4
3	AMPL	22	7	2892	853	2975,25	5
	VB	22	6	2889	748	2783,25	5
4	AMPL	22	7	3992	1044	3393,5	2
	VB	22	6	4017	1157	3372	7
5	AMPL	22	7	3831	998	3318,75	9,2
	VB	22	7	3828	998	3318	5
6	AMPL	23	7	3987	1062	3443,25	1,6
	VB	22	6	4046	1062	3308	6
7	AMPL	23	7	3271	843	3100	1,3
	VB	22	6	3268	843	2949,25	4
8	AMPL	23	7	2712	744	2886	7,2
	VB	22	6	2731	744	2740,75	5
9	AMPL	23	7	3987	1062	3443,25	1,6
	VB	22	6	4046	1062	3308	6
10	AMPL	23	7	3858	1061	3410,25	2,3
	VB	22	7	3839	1061	3368	5
11	AMPL	23	7	2407	664	2749,75	6,6
	VB	22	6	2407	664	2599,75	5
12	AMPL	22	7	3831	998	3318,75	9,1
	VB	22	7	3828	998	3318	5
13	AMPL	22	7	2892	853	2975,25	4,8
	VB	22	6	2889	853	2862	5
14	AMPL	23	7	2407	664	2749,75	6,7
	VB	22	6	2407	664	2599,75	4
15	AMPL	22	7	2947	596	2796,25	6102
	VB	22	7	2656	596	2723,5	5

Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 2

### 6.5 Αριθμητικό Παράδειγμα 3

Στα προβλήματα της συγκεκριμένης ομάδας η απαίτηση του προγραμματισμένου πτητικού έργου αυξήθηκε ( $130 \leq S_{mi} \leq 170$ ). Επιγραμματικά, οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι οι ακόλουθες:

- $400 \leq B_i \leq 500$ ,
- $C = 2$ ,



- $X_{max} = 30$ .

Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 6-3.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2844	711	2856,75	16,1
	VB	22	6	2546	768	2712,5	6
2	AMPL	22	7	3401	893	3132,5	1,5
	VB	22	6	3502	973	3105,25	6
3	AMPL	0	0	0	0	0	66
	VB	0	0	0	0	0	6
4	AMPL	22	7	2318	678	2700,5	2,1
	VB	22	6	2468	678	2625,5	6
5	AMPL	INTEGER INFEASIBLE					1466
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΙΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					5
6	AMPL	22	7	2265	652	2667,75	329
	VB	22	6	2420	661	2600,75	5
7	AMPL	22	7	2519	688	2758,25	48,3
	VB	22	6	2652	779	2747,25	5
8	AMPL	22	7	2134	617	2608,75	2479
	VB	22	6	2271	622	2534,25	5
9	AMPL	22	7	2223	604	2621,25	723
	VB	22	6	2118	657	2522,25	5
10	AMPL	22	7	3108	940	3094,5	0,63
	VB	22	7	3108	940	3094,5	5
11	AMPL	22	7	2572	607	2710,75	104
	VB	22	6	2825	607	2661,5	4
12	AMPL	22	7	2208	589	2606,25	11,6
	VB	22	6	2217	468	2405,25	4
13	AMPL	23	7	2196	669	2700,75	1124
	VB	22	6	2382	674	2601	6
14	AMPL	23	7	2404	684	2764	97,3
	VB	22	6	2537	729	2681	6
15	AMPL	22	7	2572	607	2710,75	104
	VB	22	6	2394	607	2553,75	5

Πίνακας 6-3: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 3

## 6.6 Αριθμητικό Παράδειγμα 4

Αυτή η ομάδα προβλημάτων διαφοροποιείται από την αντίστοιχη του Υποκεφαλαίου 6.5 ως προς την τιμή του μέγιστου αριθμού ΩΠ ενός Α/Φ σε μία χρονική περίοδο ( $X_{max} = 50$ ). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των

συγκεκριμένων προβλημάτων παρατίθενται στον Πίνακα 6-4. Στην τελευταία στήλη του, όπου αναγράφεται «BR» εννοείται ότι δεν ολοκληρώθηκε η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος από την AMPL, λόγω διακοπής της (BREAK) από τον χρήστη.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2844	711	2856,75	47,5
	VB	22	6	2544	711	2669,25	5
2	AMPL	22	7	3401	990	3205,25	49,2
	VB	22	6	3598	1019	3163,75	5
3	AMPL	23	7	1989	520	2537,25	382 BR
	VB	22	6	2114	666	2528	5
4	AMPL	22	7	2338	688	2713	514
	VB	22	6	2477	678	2627,75	5
5	AMPL	22	7	2355	587	2641,5	122 BR
	VB	22	6	2508	587	2567,25	5
6	AMPL	22	7	2265	652	2667,75	332 BR
	VB	22	6	2407	661	2597,5	5
7	AMPL	22	7	2519	688	2758,25	259 BR
	VB	22	6	2603	788	2741,75	5
8	AMPL	22	7	2134	617	2608,75	129 BR
	VB	22	6	2261	617	2528	5
9	AMPL	22	7	2223	604	2621,25	165 BR
	VB	22	6	2087	657	2514,5	5
10	AMPL	22	7	3108	940	3094,5	26,3
	VB	22	6	3219	1002	3056,25	4
11	AMPL	22	7	2572	695	2776,75	149 BR
	VB	22	6	2391	773	2677,5	6
12	AMPL	22	7	2208	589	2606,25	668
	VB	22	6	2187	468	2397,75	5
13	AMPL	23	7	2196	669	2700,75	757 BR
	VB	22	6	2381	674	2600,75	5
14	AMPL	23	7	2404	684	2764	422 BR
	VB	22	6	2538	729	2681,25	5
15	AMPL	22	7	2572	695	2776,75	307 BR
	VB	22	6	2391	773	2677,5	5

Πίνακας 6-4: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 4

## 6.7 Αριθμητικό Παράδειγμα 5

Στη συγκεκριμένη ομάδα προβλημάτων παρέμεινε σταθερή η απαίτηση πτητικού έργου ( $130 \leq S_{mt} \leq 170$ ), ενώ αυξήθηκε η δυνατότητα παροχής E/Ω από

τον σταθμό συντήρησης ( $500 \leq B_t \leq 600$ ). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων

είναι:  $C = 2$  και  $X_{max} = 30$ .

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6-5.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2565	677	2761,5	490 BR
	VB	22	6	2707	763	2749	6
2	AMPL	22	7	3427	1018	3232,75	3,5
	VB	22	7	3406	983	3201,25	6
3	AMPL	22	7	2691	626	2754,75	105
	VB	22	6	2691	627	2643	5
4	AMPL	22	7	2479	521	2623	278
	VB	22	6	2613	617	2616	7
5	AMPL	22	7	3494	1012	3245	2
	VB	22	7	3494	993	3230,75	5
6	AMPL	22	7	2950	772	2929	8,9
	VB	22	6	3146	854	2927	6
7	AMPL	22	7	2479	521	2623	192 BR
	VB	22	6	2589	623	2614,5	7
8	AMPL	22	7	2734	775	2877,25	5
	VB	21	6	2873	775	2762	6
9	AMPL	22	7	2704	754	2854	119 BR
	VB	22	6	2838	729	2756,25	5
10	AMPL	22	7	2819	796	2914,25	90
	VB	22	6	2945	791	2829,5	5
11	AMPL	22	7	2963	831	2976,5	313 BR
	VB	22	6	3074	817	2881,25	5
12	AMPL	22	7	3172	857	3048,25	13
	VB	22	6	3282	857	2963,25	6
13	AMPL	22	7	3052	820	2990,5	2,3
	VB	22	6	3185	820	2911,25	5
14	AMPL	22	7	3327	1039	3223,5	1,5
	VB	22	6	3451	916	3049,75	5
15	AMPL	22	7	3538	1054	3287,5	5,3
	VB	22	6	3649	1054	3202,75	6

Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 5

## 6.8 Αριθμητικό Παράδειγμα 6

Τα προβλήματα του Υποκεφαλαίου 6.7 τροποποιήθηκαν ως προς την τιμή του μέγιστου αριθμού ΩΠ ενός Α/Φ σε μία χρονική περίοδο ( $X_{max} = 50$ ).

Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6-6.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2565	677	2761,5	1628 BR
	VB	22	6	2678	725	2713,25	6
2	AMPL	22	7	3427	1018	3232,75	195
	VB	22	7	3406	983	3201,25	6
3	AMPL	22	7	2691	626	2754,75	308 BR
	VB	22	6	2691	627	2643	5
4	AMPL	22	7	2479	670	2734,75	495 BR
	VB	22	6	2642	670	2663	6
5	AMPL	22	7	3494	1012	3245	317 BR
	VB	22	7	3494	993	3230,75	5
6	AMPL	22	7	3250	903	3102,25	33
	VB	22	7	3250	903	3102,25	5
7	AMPL	22	7	2479	670	2734,75	425 BR
	VB	22	6	2642	670	2663	6
8	AMPL	22	7	2734	793	2890,75	436 BR
	VB	21	6	2883	738	2736,75	6
9	AMPL	22	7	2704	754	2854	276 BR
	VB	22	6	2838	729	2756,25	5
10	AMPL	22	7	2819	796	2914,25	284 BR
	VB	22	6	2945	791	2829,5	5
11	AMPL	22	7	2963	831	2976,5	291 BR
	VB	22	6	3074	817	2881,25	5
12	AMPL	22	7	3172	881	3066,25	315 BR
	VB	22	6	3287	970	3049,25	5
13	AMPL	22	7	3052	841	3006,25	449 BR
	VB	22	6	3197	927	2994,5	5
14	AMPL	22	7	3463	1039	3257,5	51
	VB	22	7	3460	1039	3256,75	5
15	AMPL	22	7	3538	1054	3287,5	1348
	VB	22	6	3649	1054	3202,75	6

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 6

## 6.9 Αριθμητικό Παράδειγμα 7

Στα προβλήματα που εξετάζονται σε αυτήν την παράγραφο είναι αυξημένη η χωρητικότητα του σταθμού συντήρησης ( $C=3$ ). Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι:

- $130 \leq S_{mt} \leq 170$
- $400 \leq B_t \leq 500,$

- $X_{max} = 30$ .

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 6-7.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	21	7	2844	853	2925,75	22,2
	VB	21	6	2545	712	2632,75	7
2	AMPL	22	7	3401	893	3132,5	1,7
	VB	21	6	3511	979	3074,5	8
3	AMPL	INTEGER INFEASIBLE					13483
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					6
4	AMPL	22	7	2318	678	2700,5	2,3
	VB	21	6	2317	678	2550,25	6
5	AMPL	INTEGER INFEASIBLE					2410
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					7
6	AMPL	22	7	2265	652	2667,75	806
	VB	21	6	2408	794	2660	7
7	AMPL	22	7	2519	688	2758,25	243
	VB	21	6	2645	789	2715,5	6
8	AMPL	22	7	2134	617	2608,75	1852
	VB	21	7	2256	617	2601,75	7
9	AMPL	22	7	2223	604	2621,25	1145
	VB	22	6	2141	532	2434,25	6
10	AMPL	22	7	3108	940	3094,5	0,5
	VB	21	6	3194	994	3006,5	7
11	AMPL	22	7	2572	607	2710,75	83
	VB	21	6	2387	607	2514,5	6
12	AMPL	22	7	2208	589	2606,25	41
	VB	21	6	2172	595	2451,75	5
13	AMPL	23	7	2196	669	2700,75	2060
	VB	22	6	2371	674	2598,25	6
14	AMPL	23	7	2404	684	2764	139
	VB	22	6	2653	750	2725,75	6
15	AMPL	22	7	2572	607	2710,75	85
	VB	21	6	2384	607	2513,75	6

Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 7

## 6.10 Αριθμητικό Παράδειγμα 8

Σε αυτήν την ομάδα προβλημάτων η απαίτηση σε πτητικό έργο παίρνει τη μέγιστη τιμή της ( $180 \leq S_{mt} \leq 220$ ). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $400 \leq B_t \leq 500$ ,

- $C = 2$ ,
- $X_{max} = 30$ .

Σε σύνολο 15 προβλημάτων, κανένα δεν ήταν εφικτό να επιλυθεί λόγω παραβίασης περιορισμών. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, δεδομένων των περιορισμένων δυνατοτήτων της συντήρησης και της μικρής τιμής του  $X_{max}$ , τα Α/Φ αδυνατούν να καλύψουν το βαρύ πτητικό πρόγραμμα.

Στα επόμενα υποκεφάλαια εξετάζονται προβλήματα στα οποία ενισχύεται η δυνατότητα παροχής συντήρησης και αυξάνεται η τιμή του  $X_{max}$ .

### 6.11 Αριθμητικό Παράδειγμα 9

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη ομάδα προβλημάτων είναι:

- $180 \leq S_{mt} \leq 220$ ,
- $400 \leq B_t \leq 500$ ,
- $C = 2$ ,
- $X_{max} = 50$ .

Η αύξηση του  $X_{max}$ , που ουσιαστικά ισοδυναμεί με χαλάρωση του περιορισμού που καθιστούσε αδύνατη την επίλυση των προβλημάτων του Υποκεφαλαίου 6.10, λειτούργησε θετικά για τη συντριπτική πλειοψηφία τους, όπως φαίνεται αναλυτικά στον Πίνακα 6-8.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	1601	393	2307,5	829 BR
	VB	22	6	1583	436	2222,75	6
2	AMPL	22	7	1437	305	2200,5	111 BR
	VB	22	6	1431	455	2199	5
3	AMPL	22	7	1948	511	2482,75	218 BR
	VB	22	6	1944	511	2369,25	6
4	AMPL	22	7	1183	301	2134	134 BR
	VB	22	6	1373	364	2116,25	5
5	AMPL	22	7	1931	566	2519,75	138 BR
	VB	22	6	2198	624	2517,5	6
6	AMPL	CONSTRAINT CANNOT HOLD					0
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					5
7	AMPL	22	6	2217	671	2557,5	12
	VB	22	6	1916	650	2466,5	5
8	AMPL	22	7	1308	236	2116,5	142
	VB	22	6	1506	316	2113,5	4
9	AMPL	22	7	1995	571	2539,5	427 BR
	VB	22	6	2251	620	2527,75	6
10	AMPL	22	7	2470	678	2738,5	15
	VB	22	6	2743	648	2671,75	6
11	AMPL	22	7	2085	605	2587,5	27,2
	VB	22	6	2282	687	2585,75	6
12	AMPL	22	7	1995	571	2539,5	402 BR
	VB	22	6	2291	620	2537,75	5
13	AMPL	22	7	1454	322	2217,5	277 BR
	VB	22	6	1408	399	2151,25	5
14	AMPL	22	7	2085	605	2587,5	27,5
	VB	22	6	2184	702	2572,5	6
15	AMPL	22	7	2037	573	2551,5	1827 BR
	VB	22	6	2352	578	2521,5	5

Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 9

## 6.12 Αριθμητικό Παράδειγμα 10

Στα προβλήματα που εξετάζονται σε αυτό το υποκεφάλαιο, είναι αυξημένες οι τιμές της δυνατότητας παροχής  $E/\Omega$  από τον ΣΣ ( $500 \leq B_l \leq 600$ ), ενώ το  $X_{max} = 50$  όπως και στο Υποκεφάλαιο 6.11. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $180 \leq S_{mi} \leq 220$ ,
- $C = 2$ .

Τα αποτελέσματα των τυχαίων προβλημάτων που επιλύθηκαν φαίνονται στον

Πίνακα 6-9.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2715	820	2906,25	384 BR
	VB	22	6	2993	830	2870,75	5
2	AMPL	22	7	1534	411	2304,25	284 BR
	VB	22	6	1811	367	2228	5
3	AMPL	22	7	2800	818	2926	31
	VB	22	6	2974	892	2912,5	6
4	AMPL	NO INTEGER SOLUTION					314 BR
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					6
5	AMPL	22	7	2800	818	2926	32
	VB	22	6	2965	892	2910,25	5
6	AMPL	22	7	1596	475	2367,75	347 BR
	VB	22	6	1824	541	2361,75	6
7	AMPL	NO INTEGER SOLUTION					356 BR
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					5
8	AMPL	22	7	2250	634	2650,5	233 BR
	VB	22	6	2386	724	2639,5	6
9	AMPL	22	7	1960	515	2488,75	123 BR
	VB	22	6	2170	589	2484,25	6
10	AMPL	NO INTEGER SOLUTION					376 BR
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					6
11	AMPL	22	7	2801	840	2942,75	122
	VB	22	6	3071	840	2897,75	5
12	AMPL	22	7	1665	377	2311,5	427 BR
	VB	22	6	1778	477	2302,25	6
13	AMPL	22	7	2385	685	2722,5	195 BR
	VB	22	6	2588	763	2719,25	5
14	AMPL	22	7	1972	577	2538,25	293 BR
	VB	22	6	2241	577	2493	6
15	AMPL	22	7	1852	478	2434	295 BR
	VB	22	6	2165	494	2411,75	5

Πίνακας 6-9: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 10

### 6.13 Αριθμητικό Παράδειγμα 11

Στα προβλήματα του Υποκεφαλαίου 6.12 αυξήθηκε η τιμή του μέγιστου αριθμού ΩΠ ενός Α/Φ στη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου ( $X_{max} = 70$ ). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρέμειναν σταθερές.



Τα εξαγόμενα αποτελέσματα απεικονίζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6-10.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2715	820	2906,25	680 BR
	VB	22	6	2993	830	2870,75	5
2	AMPL	22	7	1534	411	2304,25	268 BR
	VB	22	6	1811	367	2228	7
3	AMPL	22	7	2800	818	2926	543 BR
	VB	22	6	2974	892	2912,5	6
4	AMPL	22	7	1479	427	2302,5	368 BR
	VB	22	6	1767	455	2283	6
5	AMPL	22	7	2800	818	2926	392 BR
	VB	22	6	2965	892	2910,25	5
6	AMPL	22	7	1596	475	2367,75	293 BR
	VB	22	6	1824	541	2361,75	6
7	AMPL	22	7	1556	434	2327	147 BR
	VB	22	6	1556	434	2214,5	6
8	AMPL	22	7	2250	634	2650,5	740 BR
	VB	22	6	2386	724	2639,5	6
9	AMPL	22	7	1960	515	2488,75	421 BR
	VB	22	6	2170	589	2484,25	6
10	AMPL	22	7	1755	432	2375,25	288 BR
	VB	22	6	2058	461	2360,25	6
11	AMPL	22	7	2801	840	2942,75	419 BR
	VB	22	6	3071	840	2897,75	5
12	AMPL	22	7	1665	377	2311,5	246 BR
	VB	22	6	1778	477	2302,25	6
13	AMPL	22	7	2685	795	2880	366 BR
	VB	22	6	2967	822	2858,25	5
14	AMPL	22	7	1972	577	2538,25	430 BR
	VB	22	6	2241	577	2493	6
15	AMPL	22	7	1852	478	2434	821 BR
	VB	22	6	2165	494	2411,75	5

Πίνακας 6-10: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 11

## 6.14 Αριθμητικό Παράδειγμα 12

Σε νέα τυχαία προβλήματα που παράχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων είναι:

- $180 \leq S_{mt} \leq 220$ ,
- $600 \leq B_t \leq 700$ ,
- $C = 2$ ,

- $X_{max} = 50$ .

Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6-11.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2895	871	2989,5	283
	VB	22	6	3191	920	2987,75	7
2	AMPL	22	7	2637	793	2866,5	489 BR
	VB	22	6	2952	797	2835,75	6
3	AMPL	22	7	2777	798	2905,25	418 BR
	VB	22	6	2978	865	2893,25	5
4	AMPL	22	7	2260	696	2699,5	348 BR
	VB	22	6	2550	604	2590,5	6
5	AMPL	22	7	3070	850	3017,5	11
	VB	22	6	3341	850	2972,75	6
6	AMPL	22	7	1879	503	2459,5	276 BR
	VB	22	6	2191	517	2435,5	7
7	AMPL	22	7	2096	581	2572,25	311 BR
	VB	22	6	2340	585	2523,75	6
8	AMPL	22	7	2487	734	2784,75	529 BR
	VB	22	6	2701	795	2771,5	5
9	AMPL	22	7	2777	798	2905,25	296 BR
	VB	22	6	2979	867	2895	5
10	AMPL	CONSTRAINT CANNOT HOLD					0
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					5
11	AMPL	22	7	2363	717	2741	467 BR
	VB	22	6	2619	617	2617,5	6
12	AMPL	22	7	2794	812	2920	240 BR
	VB	22	6	2915	892	2897,75	5
13	AMPL	22	7	3015	925	3060	293
	VB	22	6	3225	993	3051	5
14	AMPL	22	7	2125	661	2639,5	258 BR
	VB	22	6	2381	556	2512,25	5
15	AMPL	22	7	1735	490	2413,75	760 BR
	VB	22	6	2007	532	2400,75	6

Πίνακας 6-11: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 12

### 6.15 Αριθμητικό Παράδειγμα 13

Στα προβλήματα που εξετάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 6.14 αυξήθηκε η τιμή του μέγιστου αριθμού ΩΠ ενός Α/Φ σε μία χρονική περίοδο ( $X_{max} = 70$ ). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρέμειναν σταθερές.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των εν λόγω προβλημάτων φαίνονται στον Πίνακα 6-12.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	22	7	2895	871	2989,5	344 BR
	VB	22	6	3191	920	2987,75	6
2	AMPL	22	7	2637	793	2866,5	710 BR
	VB	22	6	2952	797	2835,75	6
3	AMPL	22	7	2777	798	2905,25	512 BR
	VB	22	6	2978	865	2893,25	5
4	AMPL	22	7	2260	696	2699,5	408 BR
	VB	22	6	2550	604	2590,5	5
5	AMPL	22	7	3070	850	3017,5	949 BR
	VB	22	6	3341	850	2972,75	6
6	AMPL	22	7	1879	503	2459,5	464 BR
	VB	22	6	2191	517	2435,5	6
7	AMPL	22	7	2096	588	2577,5	293 BR
	VB	22	6	2354	599	2537,75	6
8	AMPL	22	7	2487	734	2784,75	249 BR
	VB	22	6	2701	795	2771,5	6
9	AMPL	22	7	2777	798	2905,25	147 BR
	VB	22	6	2979	867	2895	6
10	AMPL	INTEGER INFEASIBLE					0,03
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΤΗΤ. ΕΡΓΟΥ					6
11	AMPL	22	7	2363	717	2741	518 BR
	VB	22	6	2628	679	2666,25	5
12	AMPL	22	7	2794	812	2920	301 BR
	VB	22	6	2915	893	2898,5	5
13	AMPL	22	7	3015	925	3060	979 BR
	VB	22	6	3225	993	3051	5
14	AMPL	22	7	2125	661	2639,5	198 BR
	VB	22	6	2381	556	2512,25	6
15	AMPL	22	7	1735	490	2413,75	1109 BR
	VB	22	6	2007	533	2401,5	5

Πίνακας 6-12: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 13

## 6.16 Αριθμητικό Παράδειγμα 14

Στην τελευταία ομάδα πειραμάτων που εκτελέστηκαν, υψηλές απαιτήσεις σε πτητικό έργο ( $180 \leq S_{mt} \leq 220$ ) συνδυάζονται με υψηλή δυνατότητα παροχής συντήρησης ( $600 \leq B_i \leq 700$  &  $C=3$ ) καθώς και το μέγιστο επιτρεπτό αριθμό ΩΠ που μπορούν να αναλωθούν από κάθε Α/Φ σε μία χρονική περίοδο ( $X_{max} = 70$ ).

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 6-13.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	S/W	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	obj. (z)	ΧΡΟΝΟΣ
1	AMPL	21	7	3247	973	3116,5	648 BR
	VB	21	6	3211	881	2926	7
2	AMPL	21	7	2469	679	2701,5	1117 BR
	VB	21	6	2468	679	2588,75	6
3	AMPL	21	7	2497	705	2728	747 BR
	VB	21	6	2510	690	2607,5	6
4	AMPL	22	7	3106	903	3066,25	709 BR
	VB	21	6	3333	947	3006	6
5	AMPL	21	7	2916	813	2913,75	638 BR
	VB	21	6	2911	892	2859,25	6
6	AMPL	21	7	2667	673	2746,5	573 BR
	VB	21	6	2680	672	2636,5	6
7	AMPL	21	7	2913	864	2951,25	419 BR
	VB	21	6	2930	870	2847,5	6
8	AMPL	21	7	2774	760	2838,5	328 BR
	VB	21	6	2748	729	2696,25	6
9	AMPL	21	7	2291	667	2648	444 BR
	VB	21	6	2290	667	2535,25	6
10	AMPL	22	7	2680	771	2860,75	323 BR
	VB	21	6	2977	823	2824	6
11	AMPL	21	7	2931	816	2919,75	446 BR
	VB	21	6	2949	813	2809,5	6
12	AMPL	21	7	1884	473	2400,75	1167 BR
	VB	21	6	1874	455	2272,25	7
13	AMPL	21	7	2594	748	2784,5	891 BR
	VB	21	6	2558	712	2636	6
14	AMPL	22	7	3106	903	3066,25	1914 BR
	VB	21	6	3333	947	3006	6
15	AMPL	«NO INTEGER SOLUTION»					4358 BR
	VB	ΜΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΠΙΤΗ. ΕΡΓΟΥ					6

Πίνακας 6-13: Αποτελέσματα Αριθμητικού Παραδείγματος 14

### 6.17 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων (Όροι $z$ & $z_1 - z_4$ )

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν φαίνονται αναλυτικά οι τιμές των κριτηρίων σύγκρισης που ορίστηκαν στο Υποκεφάλαιο 6.1 για κάθε τυχαίο πρόβλημα που επιλύθηκε τόσο μέσω του μοντέλου AMPL όσο και του κώδικα Visual Basic. Συγκεντρωτικά, η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν μέσω των εν λόγω υπολογιστικών εργαλείων αποτυπώνεται στον Πίνακα 6-14.

Ο Πίνακας 6-14 είναι δομημένος ως εξής:

- Στις 5 πρώτες στήλες αναγράφονται ο αριθμός του αριθμητικού παραδείγματος, κάθε ένα από τα οποία αναλύθηκε στα Υποκεφάλαια 6.3 έως 6.16, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν σε κάθε ομάδα προβλημάτων.
- Στις 5 τελευταίες στήλες αναγράφεται η (%) μέση απόκλιση του κώδικα Visual Basic από το μοντέλο AMPL τόσο για κάθε κριτήριο σύγκρισης όσο και για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

ΠΑΡΑΔ.	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ				VB vs. AMPL (%)				
	S	B	C	X <sub>max</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	z <sub>4</sub>	obj. (z)
1	80 - 120	400 - 500	2	30	-2,73	-11,70	-1,33	0,51	-3,77
2	80 - 120	400 - 500	2	50	-2,73	-11,70	-0,71	-0,29	-3,77
3	130 - 170	400 - 500	2	30	-0,70	-15,19	2,02	2,44	-3,12
4	130 - 170	400 - 500	2	50	-0,91	-16,67	1,53	4,39	-3,25
5	130 - 170	500 - 600	2	30	-0,33	-13,95	3,25	0,52	-2,44
6	130 - 170	500 - 600	2	50	-0,30	-11,70	2,83	0,56	-2,04
7	130 - 170	400 - 500	3	30	-3,99	-15,19	0,67	2,65	-4,41
8	180 - 220	400 - 500	2	30	0	0	0	0	0
9	180 - 220	400 - 500	2	50	0	-15,48	6,25	9,22	-1,51
10	180 - 220	500 - 600	2	50	0	-16,67	9,10	6,74	-0,92
11	180 - 220	500 - 600	2	70	0	-16,67	9,52	5,79	-1,19
12	180 - 220	600 - 700	2	50	0	-16,67	9,02	1,55	-1,54
13	180 - 220	600 - 700	2	70	0	-16,67	9,07	2,22	-1,38
14	180 - 220	600 - 700	3	70	-1,02	-16,67	1,80	0,27	-3,90
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ:</b>					<b>-0,91</b>	<b>-13,92</b>	<b>3,79</b>	<b>2,61</b>	<b>-2,37</b>

Πίνακας 6-14: Μέση απόκλιση αποτελεσμάτων VB από AMPL

Από την εξέταση του Πίνακα 6-14 εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα, που αφορούν τη συμπεριφορά του κώδικα Visual Basic συγκριτικά με το μοντέλο AMPL:

- Ο ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων Α/Φ της Πτέρυγας σε όλες τις περιόδους ( $z_1$ ) που προκύπτει μέσω του κώδικα Visual Basic κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Σε 6, μάλιστα, από τις 14 περιπτώσεις τα αποτελέσματα συμπίπτουν με του μοντέλου AMPL. Στη χειρότερη περίπτωση, ο κώδικας VB υπολείπεται 3,99% του μοντέλου AMPL, ενώ η συνολική μέση απόκλιση είναι -0,91%.
- Ο ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων Α/Φ της κάθε Μοίρας σε όλες τις περιόδους ( $z_2$ ) εμφανίζεται μειωμένος κατά 13,92% κατά μέσο όρο. Σε μία μόνο περίπτωση παρατηρείται ταύτιση των αποτελεσμάτων, ενώ η μεγαλύτερη απόκλιση από τα αντίστοιχα αποτελέσματα που εξασφαλίστηκαν μέσω του μοντέλου AMPL είναι -16,67%.
- Όσον αφορά το ελάχιστο συνολικό υπόλοιπο ΩΠ των Α/Φ της Πτέρυγας σε όλες τις περιόδους ( $z_3$ ), αυτό εμφανίζεται ενισχυμένο κατά 3,79% κατά μέσο όρο. Στη χειρότερη περίπτωση, μέσω του μοντέλου AMPL εξασφαλίζεται λύση καλύτερη κατά 1,33%, ενώ στην ευνοϊκότερη, ο κώδικας VB δίνει λύση καλύτερη κατά 9,52%.
- Το ελάχιστο συνολικό υπόλοιπο ΩΠ των Α/Φ της κάθε Μοίρας σε όλες τις περιόδους ( $z_4$ ) εμφανίζεται, επίσης, ενισχυμένο σε σχέση με το αντίστοιχο που προκύπτει μέσω του μοντέλου AMPL κατά 2,61% στο σύνολο των περιπτώσεων. Σε μία περίπτωση, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μέσω του μοντέλου AMPL είναι καλύτερα κατά 0,29%, ενώ στην καλύτερη ο κώδικας VB υπερτερεί κατά 9,22%.
- Τέλος, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ( $z$ ) που εξασφαλίζεται μέσω του μοντέλου AMPL είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη, όπως

άλλωστε ήταν αναμενόμενο, και συγκεκριμένα υπερτερεί 2,37% κατά μέσο όρο του κώδικα VB. Τα αποτελέσματα των δύο υπολογιστικών εργαλείων συμπίπτουν μόνο στην περίπτωση στην οποία δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή εφικτών λύσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση στην απόδοση τους είναι 4,41% με το μοντέλο AMPL να υπερτερεί.

Σε μία προσπάθεια γενίκευσης των ανωτέρω συμπερασμάτων, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το μοντέλο AMPL λειτουργεί πιο αποτελεσματικά σε θέματα μεγιστοποίησης της διαθεσιμότητας A/Φ σε επίπεδο Πτέρυγας, αλλά και Μοιρών. Αντίθετα, ο κώδικας Visual Basic παρέχει καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με τα συνολικά υπόλοιπα ΩΠ των A/Φ.

Ένα εύλογο ερώτημα, που προκύπτει ως απόρροια των γενικευμένων συμπερασμάτων, είναι γιατί ενώ το μοντέλο AMPL παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με τη διαθεσιμότητα των A/Φ, αυτά δεν συνοδεύονται από αντίστοιχα καλύτερα αποτελέσματα των συνολικών ΩΠ των A/Φ, συγκριτικά με τον κώδικα Visual Basic. Η απάντηση δίνεται στις επόμενες παραγράφους.

Στην αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου AMPL υπάρχουν όροι που αφορούν τόσο τη διαθεσιμότητα των A/Φ, όσο και τα σύνολα των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης τους. Συνεπώς, κατά τη διαδικασία επίλυσης, επιδιώκεται ταυτόχρονη μεγιστοποίηση κάποιων όρων, οι οποίοι αφ' ενός σχετίζονται μερικώς μεταξύ τους, αφ' ετέρου αποτελούν μεγέθη διαφορετικής φύσης. Άρα, η διαδικασία ταυτόχρονης μεγιστοποίησής τους λογικό είναι να μην επιφέρει τόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα, όσο θα εξασφάλιζε η αντίστοιχη διαδικασία που θα προσανατολιζόταν στη μεγιστοποίηση των τιμών μεμονωμένων όρων. Δηλαδή, αν στην αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου AMPL υπήρχαν μόνο οι όροι  $z_3$  και  $z_4$ , είναι βέβαιο ότι αυτό θα απέδιδε καλύτερα από τον ευρετικό αλγόριθμο αναφορικά

με τη μεγιστοποίηση των συνολικών υπολειπόμενων χρόνων πτήσης των Α/Φ σε επίπεδο Πτέρυγας και Μοιρών, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τον κώδικα Visual Basic, η λειτουργία του δεν προσανατολίζεται άμεσα στη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των Α/Φ. Σκοπός του αλγορίθμου είναι η σύγκλιση του πραγματικού διαγράμματος ροής Α/Φ με το ιδανικό. Η συγκεκριμένη εμπειρική τεχνική χρησιμοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα διότι θεωρείται ότι έμμεσα οδηγεί σε μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας. Από την εξέταση του διαγράμματος ροής Α/Φ, μπορεί να διαπιστωθεί η μεγαλύτερη εξάρτηση των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης των Α/Φ με αυτό, σε σύγκριση με τη διαθεσιμότητά των τελευταίων. Με απλά λόγια, η χρήση του διαγράμματος ροής Α/Φ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απόδοση μεγαλύτερης έμφασης στα υπόλοιπα ΩΠ των Α/Φ και κατ' επέκταση στο σύνολό τους, παρά στη διαθεσιμότητα των Α/Φ. Εξαιτίας αυτού, ο κώδικας Visual Basic εξασφαλίζει υψηλότερους συνολικούς υπολειπόμενους χρόνους πτήσης Α/Φ συγκρινόμενος με το μοντέλο AMPL που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

Επισημαίνεται ότι ο κώδικας Visual Basic βασίζεται σε έναν ευρετικό αλγόριθμο, γεγονός που δεν εξασφαλίζει την εξαγωγή των βέλτιστων λύσεων, αλλά κάποιων εφικτών λύσεων οι οποίες λαμβάνονται σε μικρότερο χρόνο. Οι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν από την επίλυση των προβλημάτων μέσω του μοντέλου AMPL, όπως φαίνεται και από τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης στον Πίνακα 6-14, οι οποίες γενικά είναι μεγαλύτερες από αυτές που λαμβάνονται μέσω του κώδικα Visual Basic. Στην καλύτερη περίπτωση για έναν ευρετικό αλγόριθμο, η λύση του απλά θα συμπίπτει με την αντίστοιχη λύση ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης. Άρα, το γεγονός εξαγωγής καλύτερων λύσεων αναφορικά με τους συνολικούς χρόνους πτήσης των Α/Φ δεν θέτει θέμα καλύτερης συνολικής απόδοσης του κώδικα Visual Basic έναντι του μοντέλου AMPL.



## 6.18 Υπολογιστικός Χρόνος

Ο χρόνος που καταναλώνει ένα υπολογιστικό εργαλείο κατά τη διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του γνώρισμα.

Στον Πίνακα 6-15 απεικονίζονται ο μέγιστος, ο ελάχιστος και ο μέσος χρόνος επίλυσης των προβλημάτων που περιγράφονται στα Υποκεφάλαια 6.13 έως 6.16.

ΠΑΡΑΔ.	ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ				S/W	ΧΡΟΝΟΣ (sec)		
	S	B	C	X <sub>max</sub>		M.O.	MAX	MIN
1	80 - 120	400 - 500	2	30	AMPL VB	129,74 4,87	1918 6	0,14 4
2	80 - 120	400 - 500	2	50	AMPL VB	411,12 5,07	6102 7	1,3 4
3	130 - 170	400 - 500	2	30	AMPL VB	438,17 5,27	2479 6	0,63 4
4	130 - 170	400 - 500	2	50	AMPL VB	288,60 5,00	757 BR 6	26,3 4
5	130 - 170	500 - 600	2	30	AMPL VB	108,57 5,67	490 BR 7	1,5 5
6	130 - 170	500 - 600	2	50	AMPL VB	456,73 5,40	1628 BR 6	33 5
7	130 - 170	400 - 500	3	30	AMPL VB	1491,58 6,40	13483 8	0,5 5
8	180 - 220	400 - 500	2	30	AMPL VB	0 6,33	0 7	0 6
9	180 - 220	400 - 500	2	50	AMPL VB	305,78 5,40	1827 6	0 4
10	180 - 220	500 - 600	2	50	AMPL VB	254,13 5,53	427 BR 6	31 5
11	180 - 220	500 - 600	2	70	AMPL VB	428,13 5,73	821 BR 7	147 BR 5
12	180 - 220	600 - 700	2	50	AMPL VB	331,93 5,67	760 BR 7	0 5
13	180 - 220	600 - 700	2	70	AMPL VB	478,74 5,60	1109 BR 6	0,03 5
14	180 - 220	600 - 700	3	70	AMPL VB	981,47 6,13	4358 BR 7	323 BR 6

Πίνακας 6-15: Χρόνοι επίλυσης αριθμητικών παραδειγμάτων

Για την επίλυση των προβλημάτων χρησιμοποιήθηκε ένας H/Y Pentium IV με επεξεργαστή 2.5 GHz και λογισμικό AMPL/CPLEX [12] (version 9.1). Σε όλες τις ομάδες τυχαίων προβλημάτων που επιλύθηκαν είναι σαφής η ταχύτητα του κώδικα Visual Basic έναντι του μοντέλου AMPL. Υπενθυμίζεται, μάλιστα, η χρήση της δυνατότητας διακοπής της διαδικασίας επίλυσης των προβλημάτων μέσω της AMPL, γεγονός που αν δε λάμβανε χώρα θα αύξανε σημαντικά το χρόνο επίλυσης.

Από τη συνολική εξέταση των προβλημάτων που επιλύθηκαν προκύπτει ότι ο μέσος χρόνος που καταναλώθηκε από το μοντέλο AMPL ανέρχεται σε 436,05 sec. Αντίστοιχα, ο μέσος χρόνος που απαιτήθηκε από τον κώδικα Visual Basic είναι 5,58 sec. Απομονώνοντας τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του χρόνου επίλυσης προκύπτει ότι η πιο χρονοβόρα επίλυση προβλήματος απαιτήσε 13483 sec για το μοντέλο AMPL και 8 sec για τον κώδικα Visual Basic. Η πιο γρήγορη επίλυση προβλήματος διήρκεσε 0,03 sec μέσω της AMPL και 4 sec μέσω της Visual Basic.

Όπως αναφέρθηκε στο Υποκεφάλαιο 6.2, ήταν αναμενόμενη η υπεροχή του κώδικα που αναπτύχθηκε έναντι του μοντέλου AMPL, αναφορικά με το χρόνο επίλυσης των προβλημάτων. Η μεγάλη διαφορά στους χρόνους επίλυσης οφείλεται στη μέθοδο που χρησιμοποιεί το κάθε υπολογιστικό εργαλείο. Ενώ η AMPL επιλύει τα προβλήματα μέσω της μεθόδου Simplex, ο κώδικας Visual Basic χρησιμοποιεί αποκλειστικά αναλυτικές μεθόδους, οι οποίες εκ των πραγμάτων είναι πιο γρήγορες.

Επιπρόσθετα, επισημαίνεται η μεγάλη ευαισθησία του μοντέλου AMPL στις ακριβείς τιμές των παραμέτρων του προβλήματος. Έτσι, ακόμη και στην ίδια ομάδα προβλημάτων, στα οποία οι τιμές των παραμέτρων είναι ίδιες ή κυμαίνονται εντός συγκεκριμένου εύρους πεδίο, εντοπίζονται μεγάλες αποκλίσεις στους χρόνους επίλυσης. Αντίθετα, σε κάθε περίπτωση προβλήματος, το εύρος των τιμών του χρόνου επίλυσης μέσω Visual Basic περιορίζεται στο διάστημα [4,8].

## 6.19 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφηκε η πειραματική δοκιμασία του κώδικα Visual Basic σε σύγκριση με το μοντέλο AMPL μέσω τυχαίων προβλημάτων, στα οποία μεταβλήθηκαν εσκεμμένα οι τιμές ορισμένων παραμέτρων. Καταγράφηκαν οι τιμές συγκεκριμένων κριτηρίων που ορίστηκαν και οι χρόνοι επίλυσης των προβλημάτων και ακολούθησε σύγκρισή τους. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι επιδόσεις του μοντέλου AMPL είναι καλύτερες σχετικά με τα αποτελέσματα που αφορούν τη διαθεσιμότητα των Α/Φ σε επίπεδο Πτέρυγας, αλλά και κάθε Μοίρας ξεχωριστά. Αντίθετα, ο κώδικας Visual Basic αποδίδει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με τους συνολικούς υπολειπόμενους χρόνους πτήσης των Α/Φ και στα δύο προαναφερόμενα επίπεδα. Συνολικά, το μοντέλο AMPL εξασφαλίζει καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, δεδομένου ότι ο κώδικας Visual Basic βασίζεται σε έναν ευρετικό αλγόριθμο. Τέλος, από τη σύγκριση των χρόνων επίλυσης των προβλημάτων μέσω των δύο υπολογιστικών εργαλείων προέκυψε η υψηλότερη ταχύτητα, αλλά και σταθερότητα, του κώδικα Visual Basic.

## Κεφάλαιο 7 Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα του συνδυασμένου προγραμματισμού πτήσεων και συντήρησης (FMP). Το πρόβλημα FMP περιλαμβάνει την ικανοποίηση των απαιτήσεων συγκεκριμένου πτητικού έργου και συντήρησης των Α/Φ κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας του στόλου.

Στο πλαίσιο της μελέτης του εν λόγω προβλήματος, αναπτύχθηκε ένας κώδικας – ευρετικός αλγόριθμος που περιέχει τη λογική του διαγράμματος ροής Α/Φ, ενός γραφικού εργαλείου η χρήση του οποίου έχει απώτερο στόχο τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των Α/Φ μίας Στρατιωτικής Μονάδας. Ο κώδικας συγκρίθηκε με ένα αξιόπιστο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης ως προς τα εξαγόμενα αποτελέσματα, αλλά και τον χρόνο που καταναλώθηκε για την επίλυση του κάθε προβλήματος.

Αν και η μελέτη που πραγματοποιήθηκε καλύπτει τις βασικότερες πτυχές του προβλήματος FMP, αναπόφευκτα έγιναν ορισμένες παραδοχές και απλουστεύσεις, η διόρθωση των οποίων θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Για παράδειγμα, οι απαιτήσεις σε πτητικό έργο θα μπορούσαν να αποκτήσουν δυναμικό χαρακτήρα, ώστε να καλύπτουν περιπτώσεις ματαιώσεων ή και έκτακτων απαιτήσεων πραγματοποίησης πτήσεων. Επιπρόσθετα, στον τομέα των επιχειρήσεων, θα μπορούσαν να εισαχθούν παράμετροι σχετικές με την εκπαίδευση των χειριστών

σε ατομικό και ομαδικό επίπεδο και μέσω του κώδικα να ανατίθενται συγκεκριμένες αποστολές σε συγκεκριμένα Α/Φ και χειριστές.

Όσον αφορά την προγραμματισμένη συντήρηση των Α/Φ, θεωρήθηκε δεδομένη η σταθερή απαίτηση σε Ε/Ω για την ολοκλήρωσή της. Πολλές φορές, παράλληλα με τις ωρολογιακές, απαιτείται να εκτελεστούν και ημερολογιακές επιθεωρήσεις ή εργασίες συντήρησης που εξαρτώνται από τον αριθμό των προσγειώσεων των Α/Φ. Οι επιπρόσθετες αυτές απαιτήσεις αυξάνουν τον αριθμό των απαιτούμενων Ε/Ω και το χρόνο παραμονής των Α/Φ στο σταθμό συντήρησης. Άρα, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη λειτουργία όλης της Πτέρυγας και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο είναι δομημένος ο κώδικας, λαμβάνεται υπόψη μόνο η συντήρηση 2<sup>ου</sup> βαθμού των Α/Φ. Ουσιαστικά, η παραδοχή αυτή ισοδυναμεί με την καθήλωση των Α/Φ μόνο όταν σε αυτά εκτελούνται εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης. Στην πράξη, ένα Α/Φ μπορεί να καθλωθεί, επίσης, λόγω εμφάνισης βλάβης και κατ' επέκταση απαίτησης εκτέλεσης εργασιών συντήρησης 1<sup>ου</sup> βαθμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, η καθήλωση είναι παρατεταμένη και λαμβάνει χώρα σε χρονική στιγμή, την οποία το Α/Φ θεωρείται διαθέσιμο για πτήσεις, με άμεσο αντίκτυπο στη δυνατότητα κάλυψης της απαίτησης παραγωγής του πτητικού έργου όλης της Μοίρας.

Παράταση της διάρκειας των εργασιών συντήρησης μπορεί να συμβεί και κατά την εκτέλεση των προγραμματισμένων επιθεωρήσεων. Ευρήματα και ανωμαλίες, για την αποκατάσταση των οποίων απαιτείται η έκτακτη παραγγελία ανταλλακτικών με συχνά μη καθορισμένο ή μεγάλο χρόνο ικανοποίησής της, μπορούν να οδηγήσουν στην καθυστερημένη απόδοση κάποιου Α/Φ στη Μοίρα του για πτητική εκμετάλλευση.

Τέλος, στις μη προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης περιλαμβάνονται και οι τροποποιήσεις ορισμένων συστημάτων των Α/Φ, σύμφωνα με τις οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρείας, καθώς και οι έκτακτοι έλεγχοι που διατάσσονται από τα προϊστάμενα κλιμάκια των Πτερύγων. Οι εν λόγω εργασίες αφορούν διαθέσιμα και μη Α/Φ, και λόγω της ταυτόχρονης απαίτησης εκτέλεσής τους στο σύνολο των Α/Φ μπορούν να οδηγήσουν σε απόκλιση της λειτουργίας της Πτέρυγας από την αντίστοιχη προγραμματισμένη.

Οι απρογραμμάτιστοι παράγοντες που αναφέρθηκαν στις ανωτέρω παραγράφους σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να συγκεκριμενοποιηθούν. Παρόλα αυτά, μέσω στατιστικής μελέτης που θα εστιάζει στη συχνότητα εμφάνισής τους και την επίδραση που έχουν στο προγραμματισμένο ενιαίο πρόγραμμα επιχειρήσεων – συντήρησης, είναι δυνατή η εμπλοκή τους σε ένα πιο σύνθετο, ευέλικτο και σαφώς πληρέστερο πρόβλημα FMP.

## Βιβλιογραφία

- [1] Arguello, M.F., Bard, J.F. and Yu, G. (1997) Models and methods for managing airline irregular operations aircraft routing. Operations Research in the Airline Industry ed G. Yu, pp. 1-45. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [2] Athens News Agency (2006) Gov't dismisses charge of delays in fighting major wildfire. <http://www.hri.org/news/greek/ana/2006/06-08-23.ana.html>.
- [3] Bae Systems (2005) New combined maintenance and upgrade contract for RAF's Tornado Aircraft will save in excess of £100 Million.  
<http://www.baesystems.com/newsroom/2005/dec/161205news1.htm>.
- [4] Barnhart, C., Boland, N.L., Clarke, L.W., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L. and Sheno, R.G. (1998) Flight string models for aircraft fleet and routing. Transportation Science, 32(3), 208-220.
- [5] Barnhart, C., Kniker, T.S. and Lohatepanont, M. (2002) Itinerary-based airline fleet assignment. Transportation Science, 36(2): 199-217.
- [6] Barnhart, C., Belobaba, P. and Odoni, A.R. (2003) Applications of operations research in the air transport industry. Transportation Science, 37(4): 368-391.
- [7] Bertsimas, D. and Tsitsiklis, J.N. (1997) Introduction to Linear Optimization. Athena Scientific, Belmont, MA, USA.

- [8] Clarke, L.W., Hane, C.A., Johnson, E.L. and Nemhauser, G.L. (1996) Maintenance and crew considerations in fleet assignment. *Transportation Science*, 30(3), 249-260.
- [9] Clarke, L., Johnson, E., Nemhauser, G. and Zhongxi, Z. (1997) The aircraft rotation problem. *Annals of Operations Research*, 69, 33-46.
- [10] Headquarters, US Department of the Army (2000) Field Manual No. 3-04.500: Army Aviation Maintenance (Appendix D: Maintenance Management Tools). Washington, DC
- <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/3-04-500/index.html>.
- [11] Feo, T.A. and Bard, J.F. (1989) Flight scheduling and maintenance base planning. *Management Science*, 35, 1415-1432.
- [12] Fourer, R., Gay, D.M. and Kernighan, B.W. (2002) *AMPL: A modeling language for mathematical programming*. Duxbury Press.
- [13] Gopalan, R. and Talluri, K.T. (1998a) The aircraft maintenance routing problem, *Operations Research*, 46(2), 260-271.
- [14] Gopalan, R. and Talluri, K.T. (1998b) Mathematical models in airline schedule planning: A survey. *Annals of Operations Research*, 76, 155-185.
- [15] Horner, P. (2006) Edelman Award: Well worth the wait for Warner Robins. *ORMS Today*, 33(3), 26-28.
- [16] Johnson, E.L. (2000) Chinese postman and euler tour problems in bi-directed graphs. *Arc Routing: Theory, Solutions and Applications* ed. M. Dror, pp. 171-198, Springer, Berlin.



- [17] Keskinocak, P. and Tayur, S. (1998) Scheduling of time-shared jet aircraft. *Transportation Science*, 32(3), 277-294.
- [18] Klabjan, D., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Gelman, E. and Ramaswamy, S. (2002) Airline crew scheduling with time windows and plane-count constraints. *Transportation Science*, 36(3), 337-348.
- [19] Kurokawa, T. and Takeshita, K. (2004) Air transportation planning using neural networks as an example of the transportation squadron in the Japan Air Self-Defense Force. *Systems and Computers in Japan*, 35(12), 1223-1232.
- [20] Lan, S., Clarke J.P. and Barnhart, C. (2006) Planning for robust airline operations: Optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions. *Transportation Science*, 40(1), 15-281.
- [21] Larock T. () Boeing aerospace support is unique in the market. *All Systems Go: An Online Journal of Boeing Integrated Defense Systems*, 1(7).  
<http://www.boeing.com/ids/allsystemsgo/issues/vol1/num7/story02.html>.
- [22] Lohatepanont, M. and Barnhart, C. (2004) Airline schedule planning: Integrated models and algorithms for schedule design and fleet assignment. *Transportation Science*, 38(1): 19-32.
- [23] Pardalos, P.M. and Kuvorov, N. (1990) An algorithm for a singly constrained class of quadratic programs subject to upper and lower constraints. *Mathematical Programming*, 46, 321-328.
- [24] Rosenberger, J.M., Johnson, E.L. and Nemhauser, G.L. (2003) Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, 37(4): 408-421.

- [25] Rushmeier, R.A. and Kontogiorgis, S.A. (1997) Advances in the optimization of airline fleet assignment. *Transportation Science*, 31(2), 159-169.
- [26] Samaranayake, P., Lewis, G.S., Woxvold, E.R.A. and Toncich, D. (2002) Development of engineering structures for scheduling and control of aircraft maintenance. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(8), 843-867.
- [27] Sriram, C. and Haghani, A. (2003) An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(1): 29-48.
- [28] Stojkovic, G., Soumis, F., Desrosiers, J. and Solomon, M.M. (2002) An optimization model for a real-time flight scheduling problem. *Transportation Research Part A – Policy and Practice*, 36 (9): 779-788.
- [29] Talluri, K.T. (1998) The four-day aircraft maintenance routing problem. *Transportation Science*, 32(1), 43-53.
- [30] Yan, S. and Lin, C.G. (1997) Airline scheduling for the temporary closure of airports. *Transportation Science*, 31(1), 72-82.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085873