

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑ: ΛΑΙΟΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

ΑΡ.ΜΗΤΡΩΟΥ:2001010005

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Προγραμματισμός αφίξεων και ελαχιστοποίηση καθυστερήσεων σε διεθνή αεροδρόμια σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης



Χανιά 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|----------------------|----------|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 3 |
|----------------------|----------|

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

| | |
|---|----|
| Χωρητικότητα αεροδρομίων καθυστερήσεις και air traffic management..... | 8 |
| 1.1 Θεωρητικό μοντέλο μέτρησης χωρητικότητας ενός αεροδιαδρόμου..... | 9 |
| 1.2 Χωρητικότητες αεροδρομίων συναρτήσει διάφορων παραμέτρων..... | 14 |
| 1.3 Ετήσια έκθεση καθυστερήσεων από την ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας F.A.A..... | 16 |
| 1.4 Μελέτη για την βελτίωση της χωρητικότητας διεθνών αεροδρομίων..... | 17 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

| | |
|--|----|
| Παρουσίαση του προβλήματος προγραμματισμού αφίξεων αεροσκαφών A.S.P..... | 23 |
| 2.1 Εισαγωγή και παρουσίαση προβλήματος..... | 23 |
| 2.2 Πολυπλοκότητα προβλήματος..... | 28 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

| | |
|--|----|
| Παρουσίαση ευρετικών αλγορίθμων..... | 29 |
| 3.1 Εισαγωγή στον ευρετικό αλγόριθμο CIH (cheapest insertion heuristic)..... | 29 |
| 3.2 Αναλυτική παρουσίαση αλγορίθμου CIH στην γλώσσα C..... | 30 |
| 3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αλγορίθμου C.I.H και σύγκριση με την πολιτική αφίξεων FCFS για κοινά δεδομένα | 44 |
| 3.4 Περιορισμένη μετακίνηση θέσεων και αλγόριθμος CIH_CPS..... | 54 |
| 3.5 Συνοπτική παρουσίαση του αλγορίθμου Receding Horizon Control..... | 65 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

| | |
|--------------------------|----|
| Γενικά συμπεράσματα..... | 69 |
|--------------------------|----|

Η εναέρια κυκλοφορία έχει αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες δίχως όμως παράλληλα το πλήθος και η χωρητικότητα των αεροδρομίων να έχουν αυξηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας .

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι απαιτήσεις της εναέριας κυκλοφορίας σε κάποιες χρονικές περιόδους μέσα στην μέρα να ξεπερνούν την χωρητικότητα των αεροδρομίων με αποτέλεσμα τις αυξημένες καθυστερήσεις σε αναχωρήσεις και αφίξεις και κατ' επέκταση κυκλοφοριακή συμφόρηση στα διεθνές αεροδρόμια ,το φαινόμενο αυτό είναι πολύ έντονο σε διεθνή αεροδρόμια στις Η.Π.Α και την Ευρώπη.

Για καταλάβουμε καλύτερα το πρόβλημα αρκεί να σκεφτούμε ότι σε περιόδους αιχμής της εναέριας κυκλοφορίας στις Ηνωμένες Πολιτείες, υπάρχουν περίπου 5.000 αεροπλάνα στον αέρα κάθε ώρα. Γεννάται λοιπόν το ερώτημα πώς αυτά τα αεροσκάφη αποφεύγουν μια σύγκρουση μεταξύ τους ; Πώς ρυθμίζεται η εναέρια κυκλοφορία από και προς έναν αερολιμένα ή γενικότερα σε ολόκληρη τη χώρα και σε όλους του αερολιμένες ; Την ευθύνη για την αναγκαία παροχή ασφάλειας και γενικότερα για όλες τις απαραίτητες διαδικασίες κατά την διάρκεια της πτήσης των εμπορικών και ιδιωτικών αεροσκαφών την έχουν οι ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας οι όποιοι βρίσκονται κατανεμημένοι σε ολόκληρο το γεωγραφικό πλάτος των Η.Π.Α .

Γενικότερα οι ελεγκτές έχουν ως καθήκον να συντονίσουν και να διαχειριστούν μετακινήσεις χιλιάδων αεροσκαφών, να τα κρατήσουν σε ασφαλείς αποστάσεις μεταξύ τους δίνοντας τις κατάλληλες πληροφορίες (π.χ ύψος πτήσης, ταχύτητα πτήσης ,καιρικές συνθήκες), να τα κατευθύνουν κατά τη διάρκεια της απογείωσης και της προσγείωσης από και προς τους αερολιμένες αντίστοιχα , και να τα κατευθύνουν πάντα έτσι ώστε να αποφεύγουν μια τοπική κακοκαιρία και να εξασφαλίζουν ομαλή και ασφαλή κυκλοφοριακή ροή σε ολόκληρο τον γεωγραφικό χώρο.

Το φαινόμενο της κυκλοφοριακής συμφόρησης έχει ασκήσει υπερβολική πίεση στο σύστημα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (**air traffic control system**) διότι πρέπει να διαχειριστεί παράδειγμα στις Η.Π.Α σχεδόν 50.000 πτήσεις ανά ημέρα, ένας αριθμός που θα αυξηθεί στο άμεσο μέλλον δραματικά.

Για να διαχειριστούν οι υπεύθυνοι αυτές τις πτήσεις και να αποφύγουν τις καθυστερήσεις και τις συγκρούσεις, η ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας- **F.A.A** (Federal Aviation Administration) και η **N.A.S.A** έχουν αναπτύξει ένα σύγχρονο λογισμικό, που αποτελείται από αναβαθμισμένα συστήματα κεντρικών υπολογιστών, συστήματα επικοινωνιών φωνής όπου συνεργάζονται πλέον με τα καθιερωμένα και μεγάλης κλίμακας συστήματα **G.P.S (global positioning system)** έτσι ώστε να ενισχυθούν τα συστήματα εναέριας κυκλοφορίας βοηθώντας τους ελεγκτές να εντοπίζουν ανά πάσα στιγμή και να μπορούν να επικοινωνήσουν με τα αεροσκάφη που είναι απαραίτητο.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό αποτελεσματικά ο εναέριος χώρος στις **ΗΠΑ** διαιρείται σε 21 ζώνες ή **κέντρα**, και το κάθε κέντρο διαιρείται σε **τομείς** .Εδώ είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι σε κάθε κέντρο επιτρέπεται ένας μέγιστος αριθμός αεροσκαφών ανά μονάδα χρόνου για λόγους ασφαλείας.

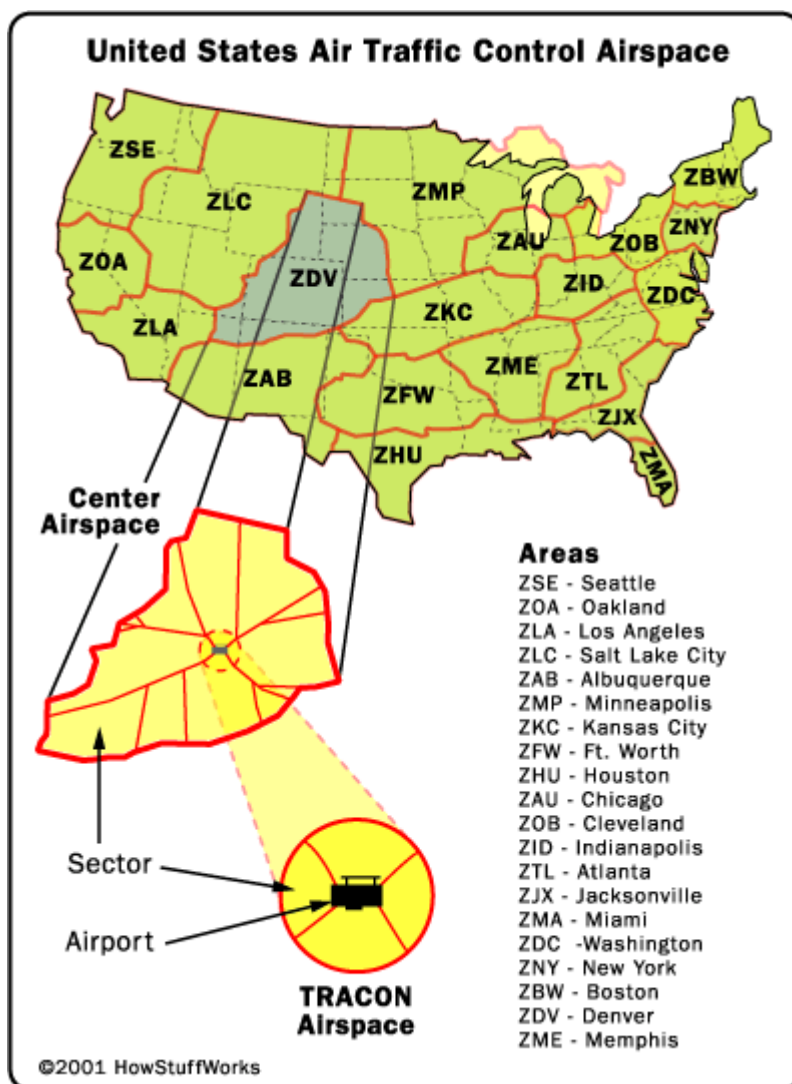
Εκτός από τους τομείς μέσα σε κάθε κέντρο υπάρχουν τμήματα εναέριου χώρου με διάμετρο περίπου 50 μίλια (80,5 χ.λ.μ) και ονομάζονται **TRACON** (Terminal Radar Approach **CON**trol) . Μέσα σε κάθε εναέριο χώρο TRACON δύναται να υπάρχουν αρκετοί αερολιμένες, κάθε ένας από τους οποίους έχει τον εναέριο χώρο του σε μια ακτίνα περίπου 8χλμ.

Παράδειγμα, η Τερματική Περιοχή (**Terminal Radar approach control**) της Αθήνας περιλαμβάνει τα αεροδρόμια Ελευθέριος Βενιζέλος ,Ελληνικού, Μεγάρων, Ελευσίνας και Μαραθώνα, εκτείνεται δε μέχρι τα 46000 πόδια σε ύψος .

Ενώ η Τερματική Περιοχή της Κω για παράδειγμα περιέχει μόνο το αεροδρόμιο Ιπποκράτης και εκτείνεται σε ύψος έως τα 14.500 πόδια. .

Τα συστήματα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, οργανώνονται από την ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας (**Federal Aviation Administration**) , και έχουν σχεδιαστεί με βάση την δομή του εναέριου χώρου.

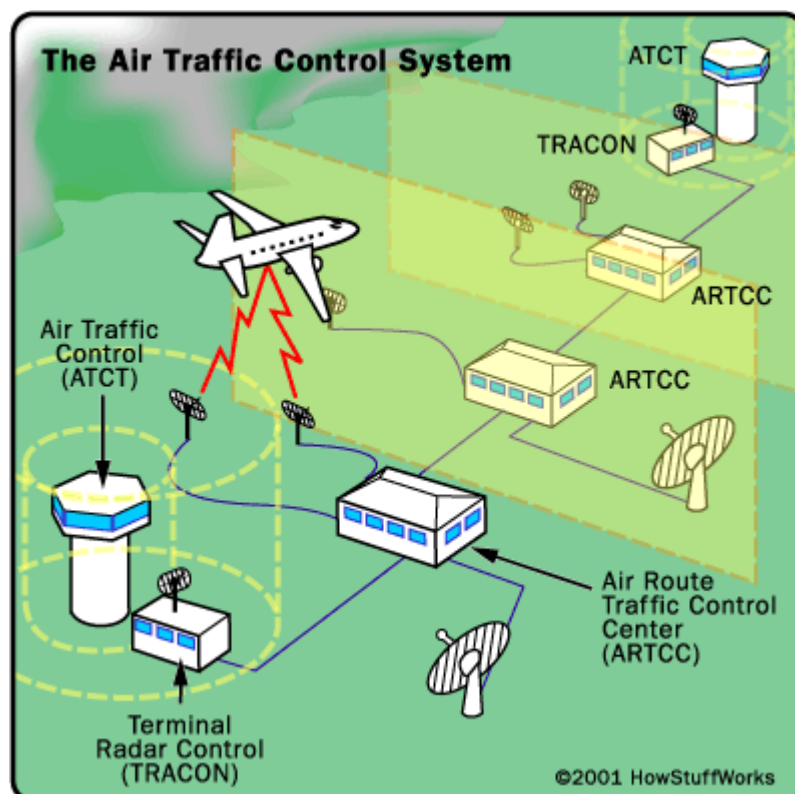
Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα τμήματα ή τα στάδια ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την ασφαλή μετακίνηση των αεροσκάφων μέσα στον εναέριο χώρο των Η.Π.Α . Ξεκινώντας από τον διαχωρισμό του εναέριου χώρου των ΗΠΑ σε 21 κέντρα:



Σχήμα 1 .Διαίρεση του εναέριου χώρου σε κέντρα και τομείς για τον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας στον εναέριο χώρο των Η.Π.Α .

Τα τμήματα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας είναι τα εξής:

- **Air Traffic Control System Command Center (ATCSCC)** - ελέγχει ολόκληρη την εναέρια κυκλοφορία σε όλο το γεωγραφικό πλάτος των Η.Π.Α. Διαχειρίζεται επίσης τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας μέσα στα κέντρα-ζώνες όπου υπάρχουν σοβαρά προβλήματα (κακοκαιρία, κυκλοφοριακή συμφόρηση, ανενεργοί διάδρομοι και αεροδρόμια, δυστυχήματα κ.τ.λ).
- **Air route traffic control centers (ARTCC)**- Κέντρα ελέγχου κυκλοφορίας (ARTCC) - υπάρχει ένα ARTCC για κάθε ζώνη-κέντρο. Κάθε ARTCC διαχειρίζεται την κυκλοφορία στους τομείς που ανήκουν στην ζώνη-κέντρο του εκτός από τον εναέριο χώρο TRACON και τον εναέριο χώρο που ανήκει στην δικαιοδοσία των πύργων ελέγχου των αεροδρομίων.
- **Terminal radar approach control – TRACON**- χειρίζεται τις αναχωρήσεις αλλά και τις αφίξεις αεροσκαφών για κάποιο συγκεκριμένο χωρικό διάστημα από τον αερολιμένα η απόσταση αυτή είναι περίπου 30-50 μίλια σε αποστάσεις κατώτερες των 30 μιλίων αναλαμβάνει τον έλεγχο αποκλειστικά ο πύργος ελέγχου του αεροδρομίου.
- **Air traffic control tower (ATCT)**- Πύργος ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (ATCT) – ένα σύστημα ATCT βρίσκεται σε κάθε αερολιμένα που έχει τακτικές και προγραμματισμένες πτήσεις. Ο πύργος ελέγχου χειρίζεται όλες τις διαδικασίες όπως την απογείωση, την προσγείωση, και την κυκλοφορία και στάθμευση των αεροσκαφών στο έδαφος του αερολιμένα .
- **Flight Service Station (FSS)**- Είναι το τμήμα που παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον καιρό, το σχέδιο πτήσης , για τους ιδιωτικούς πιλότους που πετούν προς και από μικρούς αερολιμένες σε αγροτικές περιοχές. Βοηθά τους πιλότους στις έκτακτες ανάγκες π.χ κακές καιρικές συνθήκες και συντονίζει τις διαδικασίες αναζήτησης-και-διάσωσης.



Σχήμα 2. Το σύστημα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας



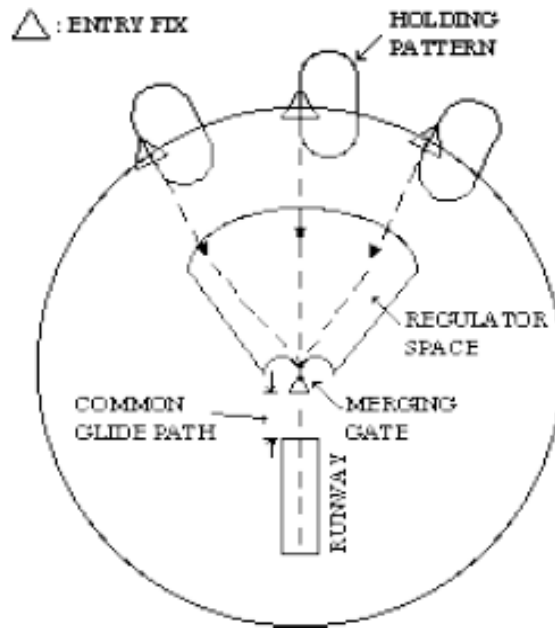
Σχήμα 3.Τυπικό κέντρο ελέγχου ARTCC

Καθώς ένα αεροσκάφος ταξιδεύει εντός ενός δεδομένου τμήματος εναέριου χώρου (κέντρο-ζώνη), ελέγχεται από τους έναν ή περισσότερους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας αρμόδιους για εκείνο το τμήμα **air route traffic control center (ARTCC)**. Οι ελεγκτές παρακολουθούν αυτό το αεροπλάνο δίνοντας τις απαραίτητες οδηγίες στον πιλότο.

Κατά την διάρκεια αυτών των ελέγχων το αεροσκάφος μπορεί να χρειαστεί να “βγει” από την προσχεδιασμένη πορεία του (σχέδιο πτήσης) για να αποφύγει για παράδειγμα κάποια καταιγίδα ή κάποιο άλλο σημειακό καιρικό φαινόμενο ή ακόμη για να κρατήσει την ασφαλή οριζόντια ή κάθετη απόσταση (βάση διεθνών κανονισμών) από ένα άλλο διερχόμενο αεροσκάφος ή να αποφύγει ένα τομέα ή κέντρο που βρίσκεται σε κατάσταση κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Οι ασφαλείς αποστάσεις είναι ορισμένες από την ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας και έχουν ως εξής : η κάθετη απόσταση μεταξύ αεροσκαφών είναι **305-m(1000ft)** και αν πετούν στο ίδιο ύψος η οριζόντια απόσταση είναι **8 km (5mile)**,επίσης το ύψος πτήσης πρέπει να είναι μεταξύ **610m-8845m**.

Όταν το αεροσκάφος βρίσκεται σε απόσταση **30-50** μίλια από το αεροδρόμιο αναλαμβάνει τον έλεγχο η τερματική περιοχή (**TRACON**) , σε αυτό το σημείο, ο κεντρικός ελεγκτής TRACON κατευθύνει όλα τα αεροπλάνα που πετούν προς στο αεροδρόμιο για να κινηθούν από υψηλότερα σε χαμηλότερα ύψη ,δηλαδή ο ελεγκτής δίνει όλες τις απαραίτητες οδηγίες στο πιλότο , όπως την ταχύτητα και το ιδανικό ύψος που πρέπει να έχει έτσι ώστε να τοποθετήσει το αεροπλάνο σε σωστή θέση προς προσγείωση δηλαδή το ευθυγραμμίζει με τον αεροδιάδρομο .Σε τελική φάση αναλαμβάνει ο πύργος ελέγχου του αεροδρομίου.



Σχήμα 4. Τερματική περιοχή ενός αεροδρομίου, φαίνονται τα σημεία εισόδου και οι τροχιές κράτησης των αεροσκαφών

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε απλουστευμένα την τερματική περιοχή ενός αεροδρομίου, τα αεροσκάφη φτάνουν σε αυτή την περιοχή από τα σημεία εισόδου (**entry fix point**) τα οποία είναι παραπάνω από ένα διότι ανάλογα με την γεωγραφική προέλευση της πτήσης υπάρχει και το ανάλογο σημείο εισόδου. Ανάλογα με την κυκλοφοριακή κατάσταση ή την ροή αφίξεων, ο ελεγκτής του πύργου ελέγχου ή ο ελεγκτής του **TRACON** πρέπει να αποφασίσει εάν το αεροσκάφος μπορεί να προσεγγίσει τον αεροδιάδρομο για προσγείωση διαμέσου μιας περιοχής που ονομάζεται ρυθμιστική περιοχή (**regulator space**) ή λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης πρέπει να τοποθετήσει το αεροπλάνο σε μια “**ουρά αναμονής**” (**holding patterns**) το οποίο αποτελεί μια σταθερή διαδρομή συνήθως κυκλική σε κάποια απόσταση από τον αερολιμένα, όπου το αεροσκάφος αναμένει έως ότου πάρει εντολή από τον πύργο ελέγχου ότι όλα είναι έτοιμα για να ξεκινήσει η διαδικασία προσγείωσης με ασφάλεια.

Αυτό το φαινόμενο έχει οδηγήσει τις αεροπορικές εταιρίες αλλά και τα αεροδρόμια να υιοθετούν και να εφαρμόζουν μια πληθώρα από μεθοδολογίες της επιχειρησιακής έρευνας προκειμένου οι σημαντικές και καθημερινές διαδικασίες όπως για παράδειγμα η τιμολογιακή πολιτική, ο χρονικός προγραμματισμός πτήσεων (με στόχο την εξάλειψη καθυστερήσεων), ο χρονικός προγραμματισμός εργασίας του πληρώματος, η οργανωμένη και η συντονισμένη παροχή υπηρεσιών εδάφους (**ground handling-logistics**) να είναι αποτελεσματικές δίνοντας βέβαια πάντα προτεραιότητα στην ασφάλεια των επιβατών και στην καλή εξυπηρέτησή τους.

1. ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ AIR TRAFFIC MANAGEMENT

Βλέπουμε ότι οι διαδικασίες που λαμβάνουν μέρος σε ένα αεροδρόμιο αλλά και γενικότερα σε ολόκληρο το γεωγραφικό πλάτος ελέγχου της εναέριας κυκλοφορίας είναι μεγάλες σε αριθμό και πολύπλοκες στην διαχείριση τους , υπάρχει λοιπόν η ανάγκη από μια οργανωμένη διαχείριση όλων αυτών των διαδικασιών που αναλαμβάνει το **air traffic management (ATM)** και το **traffic flow management (TFM)**.

Ορισμός : Το **T.F.M** αποτελεί κομμάτι του **A.T.M** το οποίο διαχειρίζεται την ροή αεροσκαφών σε ολόκληρο το σύστημα (και γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής) με σκοπό την αποτελεσματική χρήση του , ενώ διατηρεί την απαραίτητη οριζόντια και κάθετη απόσταση ασφαλείας μεταξύ των αεροσκαφών που επιβάλλεται από τους διεθνείς κανόνες του **air traffic control**.

Το γεωγραφικό πλάτος των Η.Π.Α είναι χωρισμένο σε 21 ζώνες , εκεί το TFM και το ATM αναλαμβάνεται από μια εξουσιοδοτημένη αρχή που ονομάζεται "Σύστημα και κέντρο ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας " ή "Κεντρική ροή" (**Air traffic control system command center ή Central flow**) όπως είδαμε παραπάνω , το οποίο εποπτεύει ολόκληρο το γεωγραφικό πλάτος των Η.Π.Α με την βοήθεια άλλων 21 air route traffic control centers, τα οποία είναι μοιρασμένα στις 21 ζώνες-κέντρα .

Οι κύριοι στόχοι του **air traffic management** περιέχουν εκτός των άλλων και την *ελαχιστοποίηση* των παρακάτω παραμέτρων :

- Κατανάλωση καυσίμων (ελαχιστοποίηση καθυστερήσεων)
- Καθυστερήσεις αφίξεων και αναχωρήσεων
- Προκαλούμενος θόρυβος λόγω κράτησης των αεροσκαφών σε κυκλικές τροχιές γύρω από το αεροδρόμιο έως την προσγείωση

Από τους παραπάνω στόχους μπορούμε να κατανοήσουμε πόσο σημαντικός είναι ένας αποτελεσματικός χρονικός προγραμματισμός πτήσεων .

Εντούτοις δεν αρκεί μόνο ένας καλός προγραμματισμός πτήσεων εκ των προτέρων διότι το περιβάλλον του traffic flow management διακατέχεται από τυχαία γεγονότα και αβεβαιότητες και έτσι ύστερα από αυτά όπως ακύρωση μιας πτήσης ,κακές καιρικές συνθήκες ,αναγκαστική προσγείωση ενός αεροσκάφους σε άλλο αερολιμένα από τον προκαθορισμένο λόγω βλάβης κ.τ.λ δημιουργούν διαταραχές (**perturbations**) στο σύστημα και το πρόγραμμα που έχει φτιαχτεί εκ των προτέρων δεν είναι πλέον αποτελεσματικό .Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται η ανάγκη να επαναπρογραμματίσουν οι πτήσεις και οι υπόλοιπες διαδικασίες π.χ **ground handling** σε πραγματικό χρόνο.

Ετσι αυτό που είναι αναγκαίο είναι ο προγραμματισμός πτήσεων και σε πραγματικό χρόνο(real time) ,αυτό θα είναι κάποιο πρόγραμμα σε κάποιον Υ/Η το οποίο σε συνεργασία με τα ραντάρ των κέντρων θα αναγνωρίζει και θα προγραμματίζει τα αεροσκάφη που προσεγγίζουν το αεροδρόμιο.

Για να αντιμετωπιστεί ακόμη πιο αποτελεσματικά το συνολικό πρόβλημα της αυξημένης κυκλοφορίας πρέπει να γίνει άύξηση της **χωρητικότητας** των αερολιμένων (π.χ **κατασκευή νέων αεροδιαδρόμων**) αλλά αυτό θα επιφέρει ελάχιστη βελτίωση, ουσιαστικά η λύση του προβλήματος εξαρτάται αποκλειστικά από την οικοδόμηση νέων αερολιμένων, όπου τελικά είναι ο καλύτερος τρόπος για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα .

Με τον όρο **χωρητικότητα (capacity)** ενός αερολιμένα εννοούμε γενικά τον μέγιστο αριθμό πτήσεων/ώρα (αναχωρήσεις ,αφίξεις) που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα αεροδρόμιο , η χωρητικότητα ενός αερολιμένα δεν είναι σταθερή ποσότητα και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το σχεδιασμό του αεροδρομίου (π.χ την χωροθέτηση, οργάνωση και τον αριθμό των αεροδιαδρόμων), από το αποτελεσματικό

και οργανωμένο **ground handling** αλλά και την δυναμικότητα αυτού δηλαδή των αριθμό θέσεων στάθμευσης των αεροσκαφών, τον αριθμό οχημάτων που εμπλέκονται σε επίγειες υπηρεσίες όπως μεταφορά επιβατών στις πύλες (**gates**) ,οχήματα τεχνικού ελέγχου των αεροσκαφών, οχήματα μεταφοράς αποσκευών, αριθμό πυλών κ.τ.λ .

Επίσης η χωρητικότητα του αεροδρομίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρεία περιοχή του αεροδρομίου διότι τα αεροσκάφη πετούν με διαφορετικούς κανόνες (ταχύτητα ,ύψος ,ελάχιστες αποστάσεις από άλλα αεροσκάφη κ.τ.λ) ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Επίσης η μέγιστη χωρητικότητα ενός αεροδρομίου για αφίξεις είναι πάντα μικρότερη από την μέγιστη χωρητικότητα για αναχωρήσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι το χρονικό διάστημα που ο αεροδιάδρομος παραμένει καταλυμένος για μια απογείωση είναι μικρότερος από το χρονικό διάστημα που απαιτείται για μια προσγείωση .

Επίσης η χωρητικότητα του αεροδρομίου είναι ποσότητα που εξαρτάται και από τον ρυθμό αφίξεων σε συνδυασμό με τον ρυθμό αναχωρήσεων και κυρίως τους τύπους των αεροσκαφών που προσεγγίζουν το αεροδρόμιο, δηλαδή εάν τα διαδοχικά ζευγάρια των αεροσκαφών που αφικνούνται είναι τέτοιοι τύποι αεροσκαφών που απαιτούν μεγάλους χρόνους ασφαλείας μεταξύ των διαδοχικών προσγειώσεων (που επιβάλλουν οι διεθνείς κανόνες ασφαλείας ανάλογα με τους τύπους των αεροσκαφών) τότε τα κενά διαστήματα είναι μεγάλα και οι αφίξεις / ώρα μειώνονται.

1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΟΣ ΑΕΡΟΔΙΑΔΡΟΜΟΥ

Σε αυτό το σημείο θα δείξουμε ένα μοντέλο μέτρησης της **θεωρητικής χωρητικότητας αφίξεων ενός απλού αεροδιαδρόμου** που όμως έχει την δυνατότητα να εξυπηρετήσει όλους τους τύπους των αεροσκαφών. Αρχικά πρέπει να τονίσουμε τους περιορισμούς και παραμέτρους του προβλήματος οι οποίοι είναι:

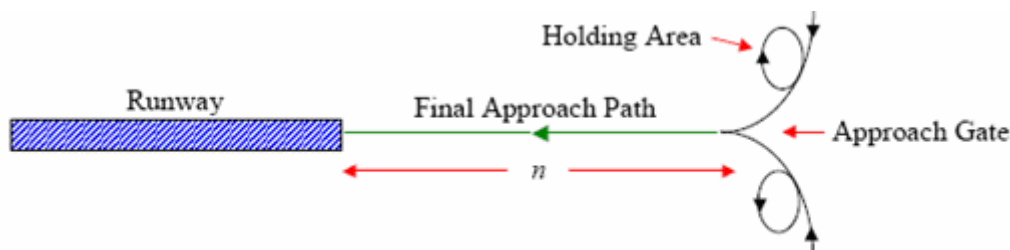
Κανόνες κυκλοφοριακής ροής

- Ελάχιστο χρονικό διάστημα ασφαλείας μεταξύ διαδοχικών αφίξεων (εξαρτάται από τους δύο τύπους των αεροσκαφών)
- Προσγείωση ενός και μόνο αεροσκάφους την φορά

Πληθυσμός αεροσκάφων

- Τύποι αεροσκαφών :βαρύ(**heavy**),μέτριο(**large/medium**),μικρό(**small**)
- Μίξη αυτών δηλαδή τα ποσοστά από κάθε τύπο αεροσκαφών

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την διαδρομή που ακολουθούν τα αεροσκάφη από τις τροχιές κράτησης(**holding area**) έως την προσγείωση τους στον αεροδιάδρομο αφίξεων το οποίο αποτελεί ένα εξιδανικευμένο μοντέλο:



Σχήμα 5.Απεικόνιση της διαδρομής που ακολουθεί ένα κοινό αεροσκάφος από την τροχιά κράτησης έως τον αεροδιάδρομο

Έτσι έχουμε τις παρακάτω μεταβλητές και σταθερές :

n: Μήκος διαδρομής τελικής προσέγγισης αεροδιαδρόμου (final approach path)

i (j): Όπου i ο τύπος του αεροσκάφους που προσγειώνεται και j ο τύπος του αεροσκάφους που ακολουθεί

v_i: Ταχύτητα αεροσκάφους i

O_i: Χρονικό διάστημα κατάληψης του αεροδιαδρόμου κατά την προσγείωση από το αεροσκάφος i

S_{ij}: Ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αεροσκαφών (εξαρτώμενο από τους τύπους)

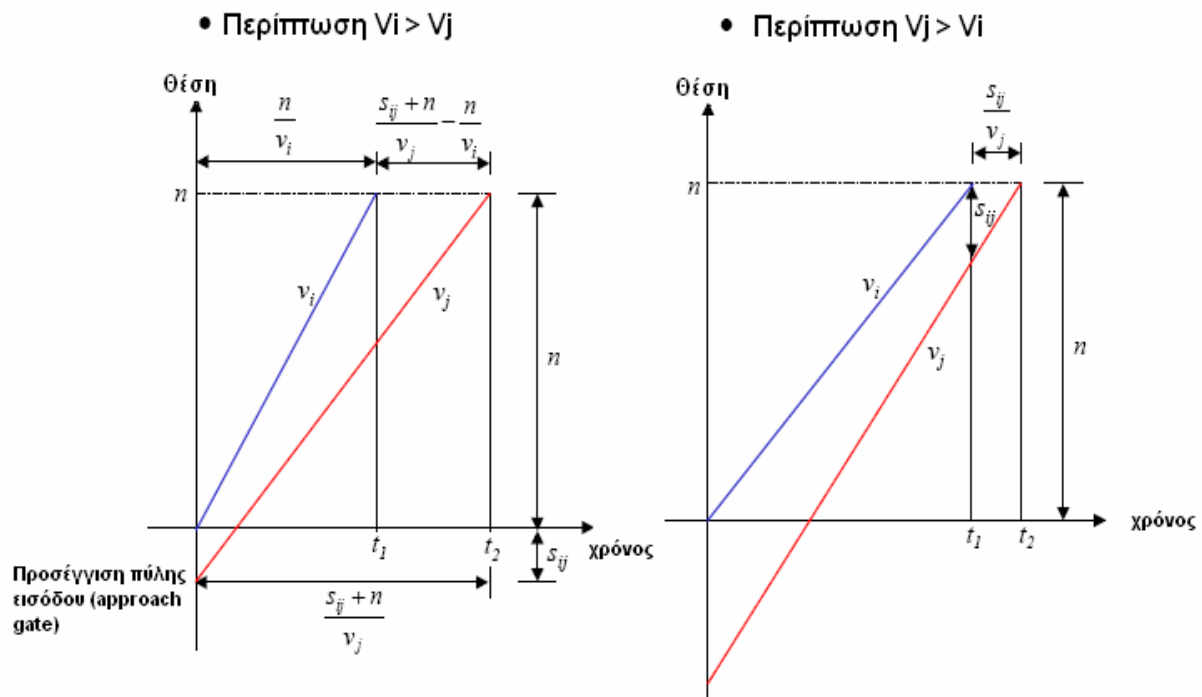
T_{ij}: Ελάχιστο αποδεκτό χρονικό διάστημα μεταξύ αφίξεων στον αεροδιάδρομο των τύπων των αεροσκαφών i,j (T_{ij}>O_j) (Μπορεί να συμβεί να είναι πολύ μεγαλύτερο αυτό το χρονικό διάστημα αλλά σίγουρα διατηρείται το ελάχιστο αποδεκτό για λόγους ασφαλείας)

Τα ελάχιστα χρονικά διαστήματα που πρέπει να τηρούνται είναι συνέπεια του ότι δεν πρέπει να παραβιάζονται οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ δύο αεροσκαφών και επίσης ότι ο αεροδιάδρομος πρέπει να μείνει κενός για κάποιο χρόνο έως ότου οι έντονες δίνες και οι στροβιλισμοί από την προηγούμενη προσγείωση εξαλειφθούν αφήνοντας το επόμενο αεροσκάφος να προσγειωθεί με ασφάλεια..Τα ελάχιστα χρονικά διαστήματα προσδιορίζονται ως εξής :

$$T_{ij} = \begin{cases} \max \left[\frac{S_{ij}}{V_j}, O_i \right] & \text{για } v_j > v_i \\ \max \left[\frac{n + S_{ij}}{v_j} - \frac{n}{v_i}, O_i \right] & \text{για } v_i > v_j \end{cases}$$

Όταν το αεροσκάφος που ακολουθεί έχει χαμηλότερη ταχύτητα ($V_i > V_j$) τότε έχουμε να συγκρίνουμε το χρονικό διάστημα που θα χρειαστεί για να φτάσει στην αρχή του αεροδιαδρόμου (runway) με τον χρόνο κατάληψης του αεροδιαδρόμου από το πρώτο αεροσκάφος. Υπολογίζοντας αυτούς τους χρόνους με σημείο αναφοράς την στιγμή που ξεκίνα την προσγείωση το πρώτο αεροσκάφος (αρχή αεροδιαδρόμου). Με αυτό τον τρόπο διαλέγουμε τους μέγιστους από τους δύο χρόνους και έτσι αποφεύγουμε να είναι ταυτόχρονα στον αεροδιάδρομο δύο αεροσκάφη αλλά και να διατηρούμε τους κανόνες ασφαλείας. Ομοίως και για την αντίστροφη περίπτωση.

Παρακάτω στις γραφικές παραστάσεις θέσης-χρόνου μπορούμε να δούμε τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 6. Γραφική παράσταση θέσης – χρόνου για κάθε περίπτωση

Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε το μέσο χρόνο μεταξύ διαδοχικών προσγειώσεων (όχι αφίξεων στον περιβάλλοντα χώρο του αεροδρόμιο) συμπεριλαμβάνοντας όλους τους περιορισμούς έτσι ώστε να μετρήσουμε θεωρητικά την ικανότητα εξυπηρέτησης /ώρα δηλαδή την χωρητικότητα του αεροδρομίου για αφίξεις. Οι περιορισμοί που διαμορφώνουν αυτό τον μέσο χρόνο είναι οι τύποι των αεροσκαφών και οι μεταξύ τους περιορισμοί (αποστάσεις ασφαλείας), οι ταχύτητες προσγείωσης, ο χρόνος κατάληψης του αεροδιαδρόμου που απαιτεί κάθε τύπο, το ποσοστό αεροσκαφών από κάθε τύπο. Έτσι έχουμε τις εξής μεταβλητές:

K: Εκφράζει το πλήθος των διαφορετικών τύπων των αεροσκαφών (4 τύποι στην περίπτωση μας)

K^2 : Είναι το πλήθος των συνδυασμών των τύπων σε ζευγάρια (εξαρτάται από το K)

P_{ij} : Εκφράζει την πιθανότητα μετά από αεροσκάφος τύπου i να ακολουθεί αεροσκάφος τύπου j.

Έτσι ο μέσος χρόνος μεταξύ προσγειώσεων θα υπολογίζεται ως εξής:

$$E[T_{ij}] = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K P_{ij} \times T_{ij} \quad (1)$$

Παρακάτω δίνουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεροσκαφών ανάλογα με τον τύπο τους, την πιθανότητα εμφάνισής τους, την ταχύτητα προσγείωσης, τον χρόνο κατάληψης του αεροδιαδρόμου κτλ. Έτσι μπορούμε να ξεκινήσουμε τον υπολογισμό της (1).

- Δεδομένα για κάθε τύπο

| i (a/c type) | p_i (prob.) | v_i (knots) | o_i (secs) |
|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 1(H) | 0.2 | 150 | 70 |
| 2(L) | 0.35 | 130 | 60 |
| 3(M) | 0.35 | 110 | 55 |
| 4(S) | 0.1 | 90 | 50 |

- $[S_{ij}]$ Ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ αεροσκαφών

| Αεροσκάφος που προσγειώνεται | αεροσκάφος που ακολουθεί | | | |
|------------------------------|--------------------------|------|------|------|
| | 1(H) | 2(L) | 3(M) | 4(S) |
| 1(H) | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 2(L) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 4 |
| 3(M) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 4 |
| 4(S) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |

- $[t_{ij}]$ Ελάχιστοι χρόνοι μεταξύ διαδοχικών αφίξεων ij

| Αεροσκάφος που προσγειώνεται | αεροσκάφος που ακολουθεί | | | |
|------------------------------|--------------------------|------|------|------|
| | 1(H) | 2(L) | 3(M) | 4(S) |
| 1(H) | 96 | 157 | 207 | 320 |
| 2(L) | 60 | 69 | 107 | 222 |
| 3(M) | 60 | 69 | 82 | 196 |
| 4(S) | 60 | 69 | 82 | 100 |

- $[P_{ij}]$ Πίνακας πιθανοτήτων: $P_{ij} = P_i P_j$

| Αεροσκάφος που προσγειώνεται | αεροσκάφος που ακολουθεί | | | |
|------------------------------|--------------------------|--------|--------|-------|
| | 1(H) | 2(L) | 3(M) | 4(S) |
| 1(H) | 0.04 | 0.07 | 0.07 | 0.02 |
| 2(L) | 0.07 | 0.1225 | 0.1225 | 0.035 |
| 3(M) | 0.07 | 0.1225 | 0.1225 | 0.035 |
| 4(S) | 0.02 | 0.035 | 0.035 | 0.01 |

$$E[T_{ij}] = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K P_{ij} \times T_{ij} = 106.3 \text{ sec}$$

Πολλαπλασιάζοντας τους δύο πίνακες t_{ij} , P_{ij} παίρνουμε τον μέσο όρο των χρόνων μεταξύ προσγειώσεων, επομένως η συχνότητα των προσγειώσεων ανά ώρα θα είναι $\frac{1}{E[T_{ij}]} \times 3600 = 33,9 \approx 34$ προσγειώσεις/ώρα κατά μέσο όρο. Αυτό ονομάζεται **μέγιστη θεωρητική χωρητικότητα αφίξεων**.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε τον ρόλο που παίζει ο τύπος των αεροσκαφών που εισέρχονται στο αεροδρόμιο. Για παράδειγμα εάν για κάποιο χρονικό διάστημα τα αεροσκάφη που εισέρχονται στο αεροδρόμιο είναι τύπου **(L-Large)** τότε ο χρόνος μεταξύ αφίξεων από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι θα ήταν 69 sec. Επομένως η θεωρητική χωρητικότητα θα ήταν 52 αφίξεις/ώρα.

Αντισταθμίζοντας ότι η χωρητικότητα του αεροδρομίου είναι μια μεταβλητή ποσότητα που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ένα από αυτούς είναι και οι τύποι των αεροσκαφών που αφικνούνται.

Το μοντέλο αυτό όμως παραβλέπει κάποιες δυνατότητες δηλαδή την δυνατότητα προσγειώσης μιας ομάδας-ακολουθίας αεροσκαφών κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι ελάχιστοι χρόνοι μεταξύ αφίξεων να είναι οι μικρότεροι δυνατοί αλλάζοντας την αρχική τους θέση στην ακολουθία. Παράδειγμα ομαδοποιώντας τα αεροσκάφη σε κατηγορίες κάνοντας τις απαραίτητες αλλαγές στις θέσεις στην ακολουθία προσγειώσεων τότε οι χαμένοι χρόνοι εξαιτίας των ελάχιστων χρόνων μεταξύ διαδοχικών προσγειώσεων ελαχιστοποιούνται αυξάνοντας την χωρητικότητα του αεροδρομίου. Έτσι το μοντέλο στην ουσία υπολογίζει την χωρητικότητα του αεροδιαδρόμου κατά μέσο όρο, υποθέτοντας ότι δεν γίνεται να αλλάξουμε την σειρά αφίξεων και ότι το αεροδρόμιο εφαρμόζει την πολιτική αφίξεων FCFS.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να ελαχιστοποιήσουμε σε κάθε περίπτωση τους χρόνους μεταξύ αφίξεων εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και ελάχιστες καθυστερήσεις με την βοήθεια κατάλληλων αλγορίθμων.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΥΞΗΣΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΟΣ ΑΕΡΟΔΙΑΔΡΟΜΟΥ

- Ελαχιστοποίηση των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών προσγειώσεων (ομαδοποίηση των αεροσκαφών ανάλογα με το τύπο τους)
- Αύξηση της ταχύτητας προσέγγισης στον αεροδιάδρομο
- Αποκλείοντας τα μικρά αεροσκάφη από το αεροδρόμιο ,διότι αυτά απαιτούν το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μεταξύ αφίξεων ειδικά όταν πριν από αυτά προσγειωθεί κάποιο μεγαλύτερο(βλέπε πίνακα ελάχιστων χρόνων μεταξύ αφίξεων)
- Δημιουργία ακολουθίας προσγείωσης διαφορετική από την FCFS αλλάζοντας τα αεροσκάφη από τις αρχικές θέσεις τους στην ακολουθία

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

- Οι παράμετροι V_i και O_i είναι τυχαίοι και όχι σταθεροί στην πράξη ενώ στο μοντέλο θεωρούμε ότι είναι σταθεροί
- Οι αποστάσεις μεταξύ των αεροσκαφών διατηρούνται αλλά μπορεί να είναι μεγαλύτερες από το απαιτούμενο , ενώ είναι δηλαδή τυχαίες στο μοντέλο θεωρούμε ότι είναι σταθερές και ίσες με το ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας.
- Στο μοντέλο έχουμε υποθέσει ότι σε χρονικό διάστημα μιας ώρας θα έχουν προσεγγίσει το αεροδρόμιο όλοι οι τύποι των αεροσκαφών. Αυτό στην πράξη δεν συμβαίνει ειδικά σε περιόδους αιχμής και σε μεγάλα διεθνές αεροδρόμια, οι πιο συνηθισμένοι τύποι που εξυπηρετούνται είναι οι Large,Medium,Heavy
- Το μοντέλο θεωρεί ότι ο αεροδιάδρομος χρησιμοποιείται μόνο για αφίξεις ενώ στην πράξη συμβαίνει ένας συνδυασμός από αυτά τα γεγονότα με εξαίρεση τα μεγάλα αεροδρόμια όπου ένας αεροδιάδρομος χρησιμοποιείται μόνο για αφίξεις ιδιαίτερα σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Σύμφωνα με σχετική έκθεση της ομοσπονδιακής διοίκησης αεροπορίας (F.A.A) μπορούμε να δείξουμε με τον παρακάτω πίνακα τι ισχύει για την χωρητικότητα ενός απλού αεροδιαδρόμου στην πράξη. Η έκθεση βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία και σε εμπειρία που προέρχεται από πολλά αεροδρόμια.

| Λειτουργία/καιρικές συνθήκες | Visual.Flight.Rules | Instrument.Flight.Rules |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Αφίξεις | 40-42 | 30-32 |
| Αναχωρήσεις | 60 | 58-59 |
| Συνδυασμός και των δύο | 34 αφίξεις & 34 αναχωρήσεις | 30 αφίξεις και 30 αναχωρήσεις |

Όπως περιγράψαμε και παραπάνω υπάρχουν πολλοί παράγοντες και τυχαία γεγονότα που επηρεάζουν την χωρητικότητα ενός αεροδρομίου. Παρακάτω αναλύουμε πως επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες την χωρητικότητα των αεροδρομίων καθώς και ο συνδυασμός αφίξεων-αναχωρήσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα χρονικό διάστημα.

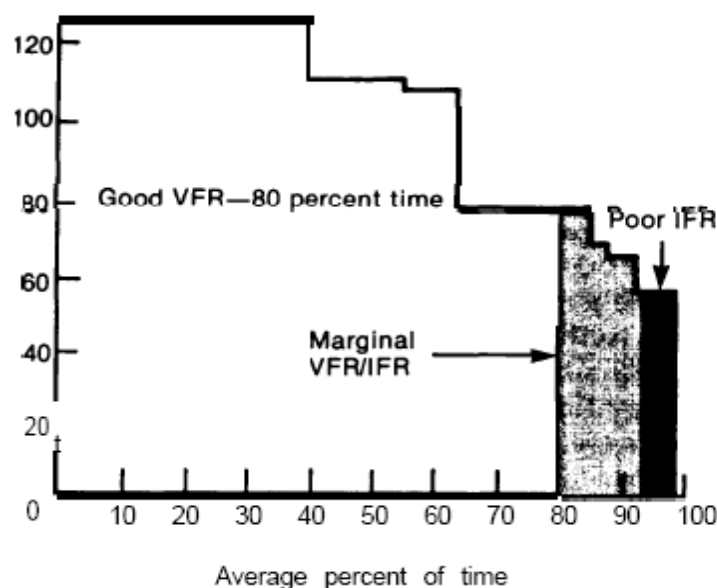
Για παράδειγμα το **CHICAGO O'HARE international airport** μπορεί να εξυπηρετήσει έναν μέγιστο αριθμό αφίξεων 112 αφίξεις/ώρα και ομοίως ένα μέγιστο αριθμό αναχωρήσεων 120 αναχωρήσεις/ώρα ,για συνδυασμό από γεγονότα δηλαδή αφίξεις και αναχωρήσεις μέσα σε ένα χρονικό διάστημα το αεροδρόμιο μπορεί να εξυπηρετήσει κατά μέσο όρο 96(πτήσεις)/ώρα.

Οι καλές καιρικές συνθήκες επιτρέπουν στα αεροσκάφη να πετούν βάση κανόνων πτήσεως **VFR (visual flight rules)** όπου η ορατότητα είναι καλή ,οι αποστάσεις μεταξύ των αεροσκαφών που βρίσκονται σε τροχιές αναμονής δεν είναι μεγάλες έτσι η προσέγγιση(άφιξη) στον αερολιμένα είναι εύκολη έτσι η χωρητικότητα του αερολιμένα παραμένει η μέγιστη δυνατή .

Οι κακές καιρικές συνθήκες όμως αναγκάζουν τα αεροσκάφη να πετούν βάση κανόνων πτήσεως **IFR (instruments flight rules)** όπου οι αποστάσεις μεταξύ των αεροσκαφών είναι μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση **VFR** περίπου 5-9 μίλια για λόγους ασφαλείας και η προσέγγιση (άφιξη) ενός αεροσκάφους στον αερολιμένα είναι πιο δύσκολη και απαιτεί περισσότερο χρόνο με αποτέλεσμα την μείωση της χωρητικότητας του αεροδρομίου έως και 30% αυξάνοντας έτσι τις καθυστερήσεις. Παρακάτω παραθέτω ένα γράφημα της χωρητικότητας του αεροδρομίου **boston logan international airport** συναρτήσει των καιρικών συνθηκών :

(There is a 3 to 1 or 2 to 1 ratio between good weather/bad weather capacities)

Capacity Coverage Curve—Boston Logan Airport

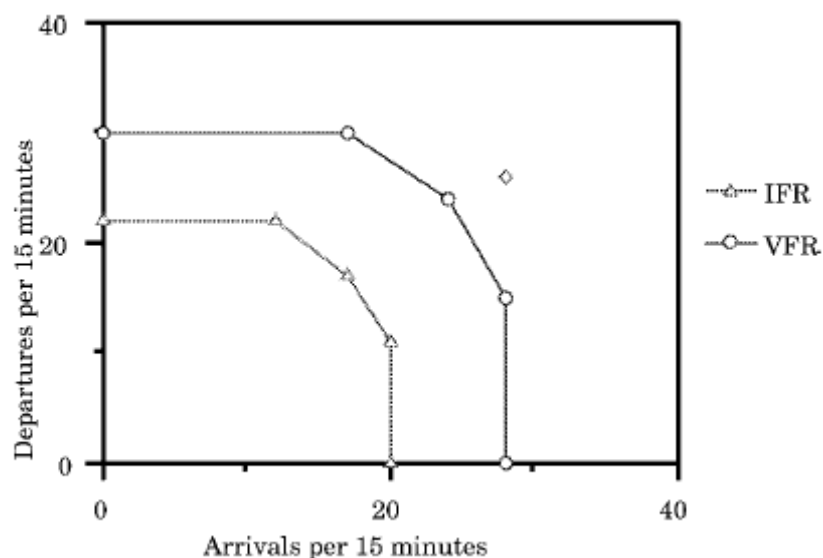


Σχήμα 7.Γράφημα χωρητικότητας αεροδρομίου συναρτήσει καιρικών συνθηκών και του ποσοστού χρόνου που καταλαμβάνουν μέσα ένα έτος

Σε πολύ κακές καιρικές συνθήκες ίσως κάποιοι διάδρομοι τροχοδρόμησης να αποκλειστούν για κάποιο χρονικό διάστημα (π.χ πάγος, καταιγίδα, δυνατός αέρας, χιονόπτωση κ.τ.λ) και έτσι το αεροδρόμιο να μην είναι διαθέσιμο να εξυπηρετήσει τα αεροσκάφη. Σε κάποιες περιπτώσεις η προγραμματισμένη πτήση θα ακυρωθεί ή σε κάποιες άλλες περιπτώσεις η έναρξη της πτήσης (αναχώρηση) θα καθυστερήσει τόσο μέχρι το αεροδρόμιο προορισμού να είναι διαθέσιμο παρέχοντας την απαραίτητη ασφάλεια .

Δεν είναι μόνο όμως οι κακές καιρικές συνθήκες που μπορεί να καθυστερήσουν μια πτήση για αναχώρηση προς τον προορισμό της , το ίδιο μπορεί να συμβεί εάν το αεροδρόμιο του προορισμού βρίσκεται σε κατάσταση κυκλοφοριακής συμφόρησης έτσι συμφέρει οικονομικά την εταιρία το αεροσκάφος να μην αναχωρήσει προς το αεροδρόμιο του προορισμού την προγραμματισμένη ώρα αλλά να αναμένει έως ότου το αεροδρόμιο προορισμού επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα κυκλοφοριακής ροής ,τόρα εάν αυτή η καθυστέρηση γνωρίζουμε ότι θα είναι μεγάλη εκ των προτέρων τότε προτιμότερο είναι η πτήση να ακυρωθεί .Η παραπάνω μέθοδος καθυστέρησης της αναχώρησης του αεροσκάφους είναι γνωστή και ως **ground delay program** .

Παρακάτω φαίνεται το γράφημα της χωρητικότητας συναρτήσει καιρικών συνθηκών, ρυθμού αφίξεων ,ρυθμού αναχωρήσεων του αεροδρομίου **Chicago o hare international airport**:



Σχήμα 8.Διάγραμμα χωρητικότητας του αεροδρομίου **Chicago O' hare international airport**

| Weather conditions | max departure capacity per hour | max arrival capacity per hour |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| VFR | 120 | 112 |
| IFR | 88 | 80 |

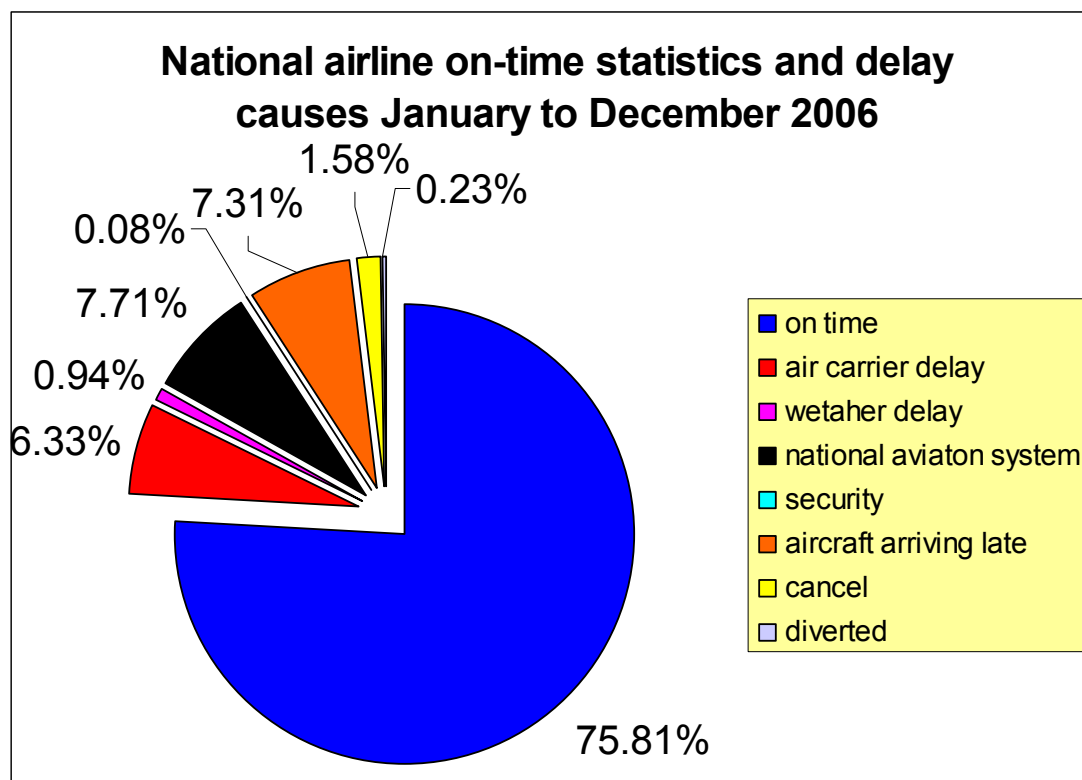
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι αν συμβαίνουν 28 αφίξεις/15λέπτα δηλαδή έχουμε 112αφίξεις/ώρα (μέγιστη χωρητικότητα αφίξεων) τότε η μέγιστη δυνατή χωρητικότητα αναχωρήσεων μειώνεται από 120 αναχωρήσεις /ώρα στις 60 αναχωρήσεις /ώρα . Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η χωρητικότητα του “Ελευθέριος Βενιζέλος” ανέρχεται στις 65πτήσεις /ώρα ,ενώ το αεροδρόμιο της **Atlanta** έχει χωρητικότητα 180 πτήσεις/ώρα .

Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι ένα αεροδρόμιο θα βρεθεί σε κατάσταση κυκλοφοριακής συμφόρησης όταν η ροή των πτήσεων ξεπερνά την χωρητικότητα του. Για παράδειγμα για το αεροδρόμιο του **CHICAGO** αν έχουμε 33 αφίξεις ανά 15 λεπτά (μέγιστη 28αφίξεις/15 λεπτά) τότε το αεροδρόμιο θα αναγκαστεί να ‘κρατά’ τα αεροσκάφη σε τροχιές αναμονής (**holding patterns**) έως ότου είναι δυνατή η προσέγγιση στον αεροδιάδρομο.

Η αναμονή κάποιου αεροσκάφους σε κυκλικές τροχιές έως ότου προσγειωθεί μπορεί να διαρκέσει από 4- 30 λεπτά και αυτό είναι που δημιουργεί την καθυστέρηση λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης . Επίσης εξαιτίας αυτής της κράτησης σε κυκλικές τροχιές και των ελιγμών τα αεροσκάφη αναγκάζονται να καταναλώνουν πολλά καύσιμα κάτι που δημιουργεί τεράστια κόστη στις αεροπορικές εταιρίες και στα αεροδρόμια τα οποία είναι υπεύθυνα για αυτές τις καταστάσεις.

1.3ΕΤΗΣΙΑ ΕΚΘΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΜΟΣΠΟΝΔΙΑΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑΣ F.A.A

Η παρακάτω δημοσιευμένη ετήσια έκθεση καθυστερήσεων περιέχει τα στατιστικά στοιχεία από τα μεγαλύτερα διεθνές αεροδρόμια του κόσμου και παρουσιάζει το ποσοστό πτήσεων που προσγειώθηκαν δίχως σημαντικές καθυστερήσεις και ταυτόχρονα τις αιτίες για πτήσεις καθυστέρησαν.

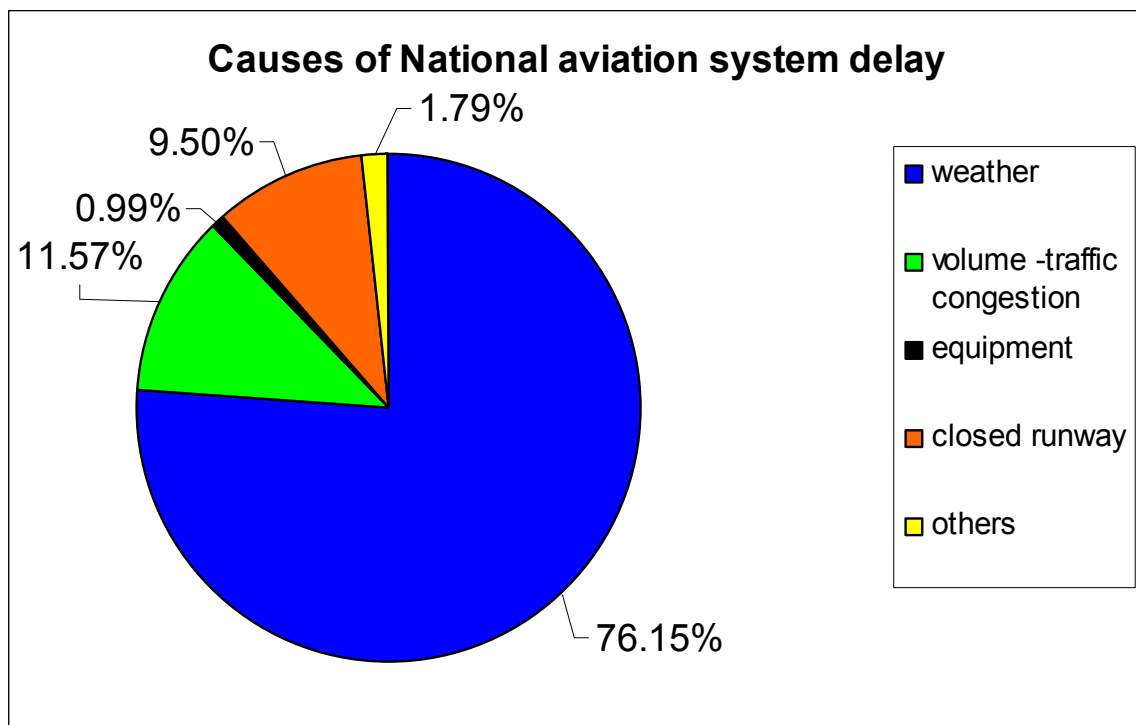


Σχήμα 9. Στατιστικά στοιχεία πτήσεων από την F.A.A και ποσοστά καθυστερήσεων ανάλογα με την αιτία.

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό πτήσεων 75.81% φτάνει στο προορισμό του δίχως σημαντικές καθυστερήσεις δηλαδή κάτω των 15 λεπτών, ένα ποσοστό καθυστερήσεων της τάξης του 6.33% οφείλεται στην κακή διαχείριση και προγραμματισμό πτήσεων από τις αεροπορικές εταιρίες (**air carrier delay**) ,ένα μικρό ποσοστό καθυστερήσεων οφείλεται καθαρά στην κακοκαιρία (**weather delay**) 0.94% π.χ κλειστοί αεροδιάδρομοι ,ακυρώσεις πτήσεων λόγω απαγορευτικών καιρικών συνθηκών κτλ .

Ένα σημαντικό ποσοστό 7.71% καθυστερήσεων οφείλεται στο διεθνές σύστημα αεροπορίας και στους κανόνες που επιβάλλουν εξαιτίας της κυκλοφοριακής συμφόρησης, στον τρόπο που λειτουργούν και διαχειρίζονται τις πτήσεις ,στον εξοπλισμό τους, ακόμα και σε κακό προγραμματισμό κτλ.

Ένας άλλος λόγος που δημιουργούνται καθυστερήσεις είναι οι καθυστερημένες αφίξεις είτε επειδή οι πτήσεις είχαν αργοπορημένη αναχώρηση είτε βγήκαν από το σχέδιο πτήσης για αποφυγή κάποιου καιρικού φαινομένου κτλ το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 7.31%, ακολουθούν με 1.58% οι ακυρώσεις πτήσεων, με 0.23% καθυστερήσεις λόγω προσγείωσης σε διαφορετικό προορισμό π.χ λόγω βλάβης και με 0.08% καθυστερήσεις για λόγους ασφαλείας π.χ περαιτέρω έλεγχος υπόπτων ή ξαφνικός έλεγχος του αεροσκάφους για εκρηκτικό μηχανισμό.



Σχήμα 10. Αιτίες καθυστερήσεων που οφείλονται στο διεθνές σύστημα αεροπορίας

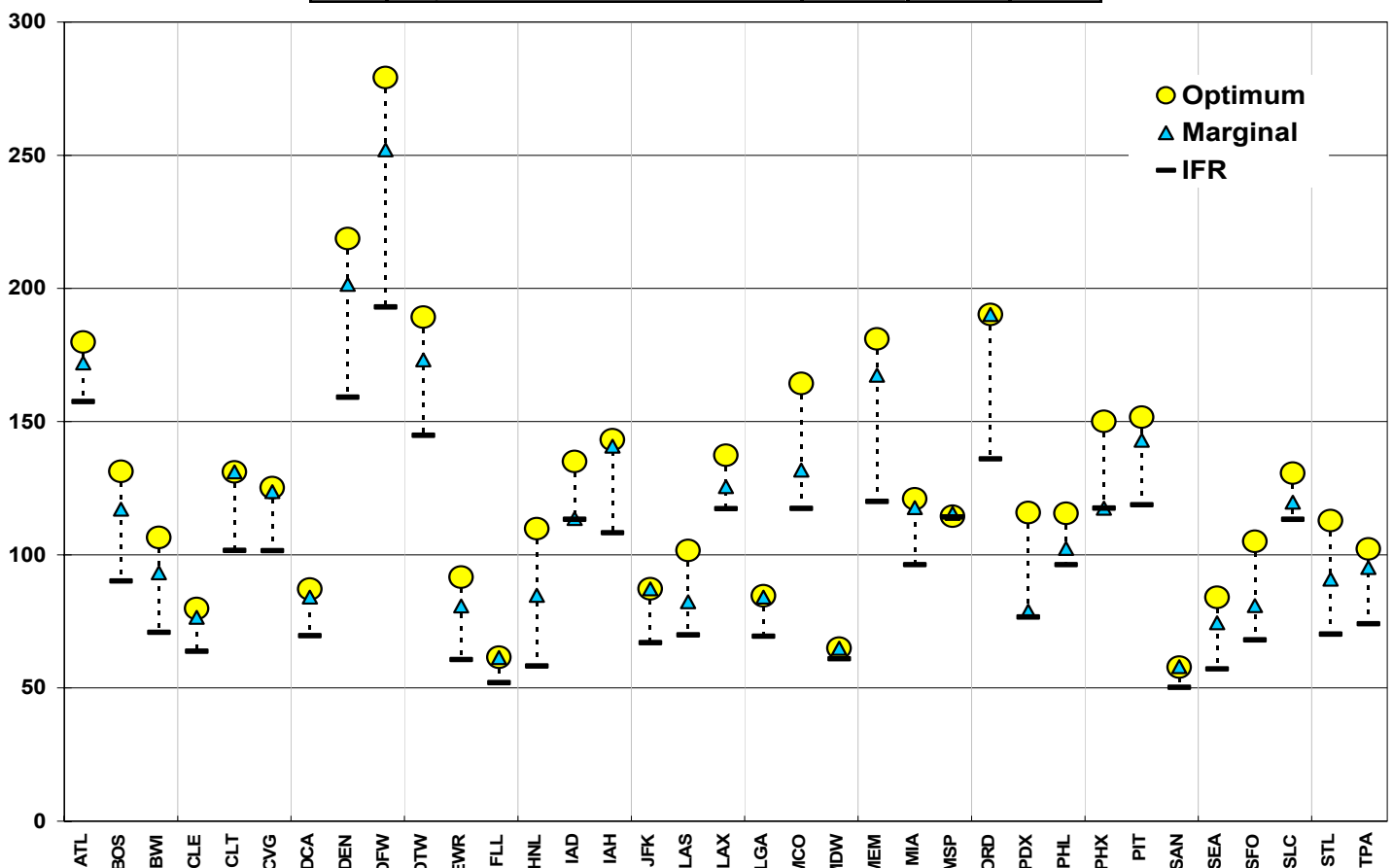
Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι αιτίες για το ποσοστό καθυστερήσεων (7.71%) που οφείλεται αποκλειστικά στο διεθνές σύστημα αεροπορίας. Παρατηρούμε ότι η σοβαρότερη αιτία για τις καθυστερήσεις 76.15% που οφείλονται στο διεθνές σύστημα αεροπορίας είναι οι καιρικές συνθήκες, αυτές οι καιρικές συνθήκες (π.χ χαμηλή ορατότητα) επιβάλλουν κανόνες πτήσης **I.F.R** όπως περιγράψαμε παραπάνω με αποτέλεσμα τις αυξημένες ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των αεροσκαφών, την μείωση της χωρητικότητας του αεροδρομίου, και εν γένει την άυξηση της έντασης της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η δεύτερη σημαντική αιτία είναι η αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση (11.57%) όπου από μόνη της προκαλεί καθυστερήσεις για τους λόγους που έχουμε περιγράψει και γίνεται ότι είναι δυνατό για την καλύτερη αντιμετώπιση της από τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας A.T.C (Air Traffic Control). Στην συνέχεια ακολουθεί το ποσοστό καθυστερήσεων 9.50% το οποίο οφείλεται σε αεροδιαδρόμους οι οποίοι είναι κλειστοί για λόγους ασφαλείας ή υπάρχει η απαίτηση από την κυκλοφορία ο αεροδιάδρομος να χρησιμοποιηθεί για αναχωρήσεις για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα. Το υπόλοιπο 2,5% των καθυστερήσεων οφείλεται στον εξοπλισμό του διεθνές συστήματος αεροπορίας (π.χ ραντάρ, μη έμπειροι ελεγκτές, χρήση λογισμικών) και σε διάφορους άλλους λόγους.

1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΕΘΝΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

Στην προσπάθεια βελτίωσης της χωρητικότητας των αερολιμένων με στόχο την μείωση των καθυστερήσεων η ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας εκπόνησε μια μελέτη όσον αφορά το κέρδος που θα έχει ένα αεροδρόμιο από την οικοδόμηση νέων αεροδιαδρόμων, χώρους στάθμευσης αεροσκαφών κτλ.

Στην μελέτη συμπεριλαμβάνονται 35 διεθνή αεροδρόμια τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ζήτηση από την εναέρια κυκλοφορία. Στο παρακάτω πίνακα μπορούμε να διακρίνουμε τις χωρητικότητες των 35 πιο κυκλοφοριακά συμφορημένων διεθνών αεροδρομίων συναρτήσει των καιρικών συνθηκών, επίσης παρουσιάζουμε τα στοιχεία του πίνακα και στο σχήμα 11.

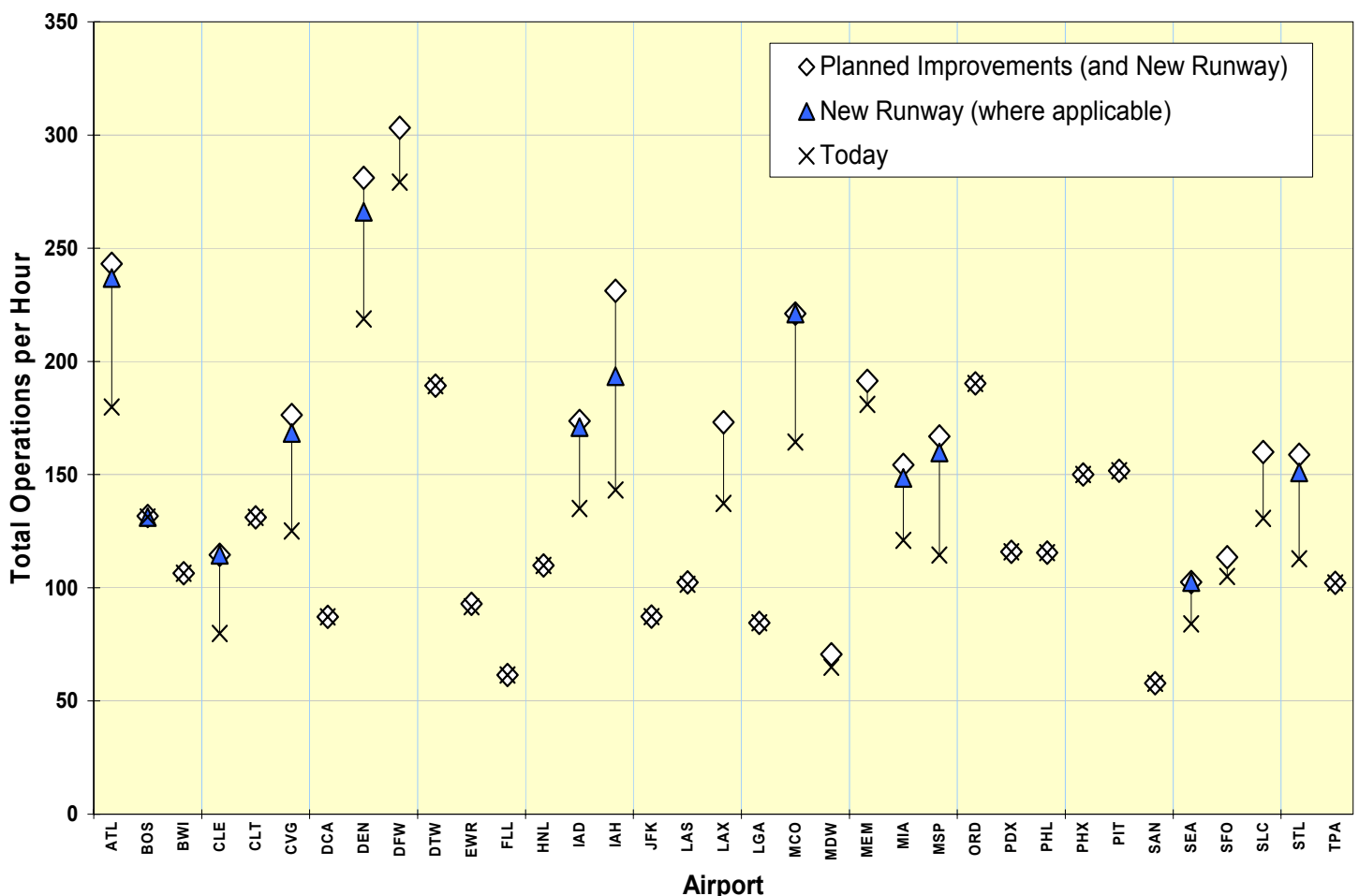
| Airport | | Optimum | Marginal | IFR |
|---------|--|---------|----------|---------|
| ATL | Atlanta Hartsfield-Jackson International | 180-188 | 172-174 | 158-162 |
| BOS | Boston Logan International | 123-131 | 112-117 | 90-93 |
| BWI | Baltimore-Washington International | 106-120 | 80-93 | 60-71 |
| CLE | Cleveland Hopkins | 80-80 | 72-77 | 64-64 |
| CLT | Charlotte/Douglas International | 130-131 | 125-131 | 102-110 |
| CVG | Cincinnati/Northern Kentucky International | 120-125 | 120-124 | 102-120 |
| DCA | Ronald Reagan Washington National | 72-87 | 60-84 | 48-70 |
| DEN | Denver International | 210-219 | 186-202 | 159-162 |
| DFW | Dallas/Fort Worth International | 270-279 | 231-252 | 186-193 |
| DTW | Detroit Metro Wayne County | 184-189 | 168-173 | 136-145 |
| EWB | Newark Liberty International | 84-92 | 80-81 | 61-66 |
| FLL | Fort Lauderdale-Hollywood International | 60-62 | 60-61 | 52-56 |
| HNL | Honolulu International | 110-120 | 60-85 | 58-60 |
| IAD | Washington Dulles International | 135-135 | 114-120 | 105-113 |
| IAH | Houston George Bush Intercontinental | 120-143 | 120-141 | 108-112 |
| JFK | New York John F. Kennedy International | 75-87 | 75-87 | 64-67 |
| LAS | Las Vegas McCarran International | 102-113 | 77-82 | 70-70 |
| LAX | Los Angeles International | 137-148 | 126-132 | 117-124 |
| LGA | New York LaGuardia | 78-85 | 74-84 | 69-74 |
| MCO | Orlando International | 144-164 | 132-144 | 104-117 |
| MDW | Chicago Midway | 64-65 | 64-65 | 61-64 |
| MEM | Memphis International | 148-181 | 140-167 | 120-132 |
| MIA | Miami International | 116-121 | 104-118 | 92-96 |
| MSP | Minneapolis-St Paul International | 114-120 | 112-115 | 112-114 |
| ORD | Chicago O'Hare International | 190-200 | 190-200 | 136-144 |
| PDX | Portland International | 116-120 | 79-80 | 77-80 |
| PHL | Philadelphia International | 104-116 | 96-102 | 96-96 |
| PHX | Phoenix Sky Harbor International | 128-150 | 108-118 | 108-118 |
| PIT | Greater Pittsburgh International | 152-160 | 143-150 | 119-150 |
| SAN | San Diego International - Lindbergh Field | 56-58 | 56-58 | 48-50 |
| SEA | Seattle-Tacoma International | 80-84 | 74-76 | 57-60 |
| SFO | San Francisco International | 105-110 | 81-93 | 68-72 |
| SLC | Salt Lake City International | 130-131 | 110-120 | 110-113 |
| STL | Lambert-St. Louis International | 104-113 | 91-96 | 64-70 |
| TPA | Tampa International | 102-105 | 90-95 | 74-75 |



Σχήμα 11.Σημερινές χωρητικότητες αεροδρομίων συναρτήσει καιρικών συνθηκών

Παρατηρούμε στο σχήμα 11 την δυναμικότητα κάθε αεροδρομίου συναρτήσει των καιρικών συνθηκών ,όσο καλύτερος είναι ο καιρός τόσο πιο υψηλή είναι η χωρητικότητα που παρουσιάζει το εκάστοτε αεροδρόμιο λόγω της καλής ορατότητας. Ο καιρός διαχωρίζεται σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις οι οποίες είναι: ιδανικός (κίτρινος κύκλος στο σχήμα),μέτριες καιρικές συνθήκες (μπλε τρίγωνο), και η χειρίστη περίπτωση I.F.R όπου όλες διαδικασίες απογείωσης ,προσγείωσης γίνεται μόνο μέσω οργάνων του αεροσκάφους σε συνεργασία με τους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας, στην περίπτωση αυτή το κάθε ένα αεροδρόμιο παρουσιάζει και την χαμηλότερη χωρητικότητα .Αξιοσημείωτο είναι το ότι κάποια αεροδρόμια π.χ το MSP, το MDW, το SAN δεν παρουσιάζουν διαφορές στην χωρητικότητα συναρτήσει με τις καιρικές συνθήκες αυτό οφείλεται στην διαμόρφωση και στην σχεδίαση των αεροδιαδρόμων και πως αυτοί χρησιμοποιούνται από κάθε αεροδρόμιο ,και στις λειτουργικές διαδικασίες που χρησιμοποιεί κάθε αεροδρόμιο για την αντιμετώπιση των καιρικών συνθηκών.

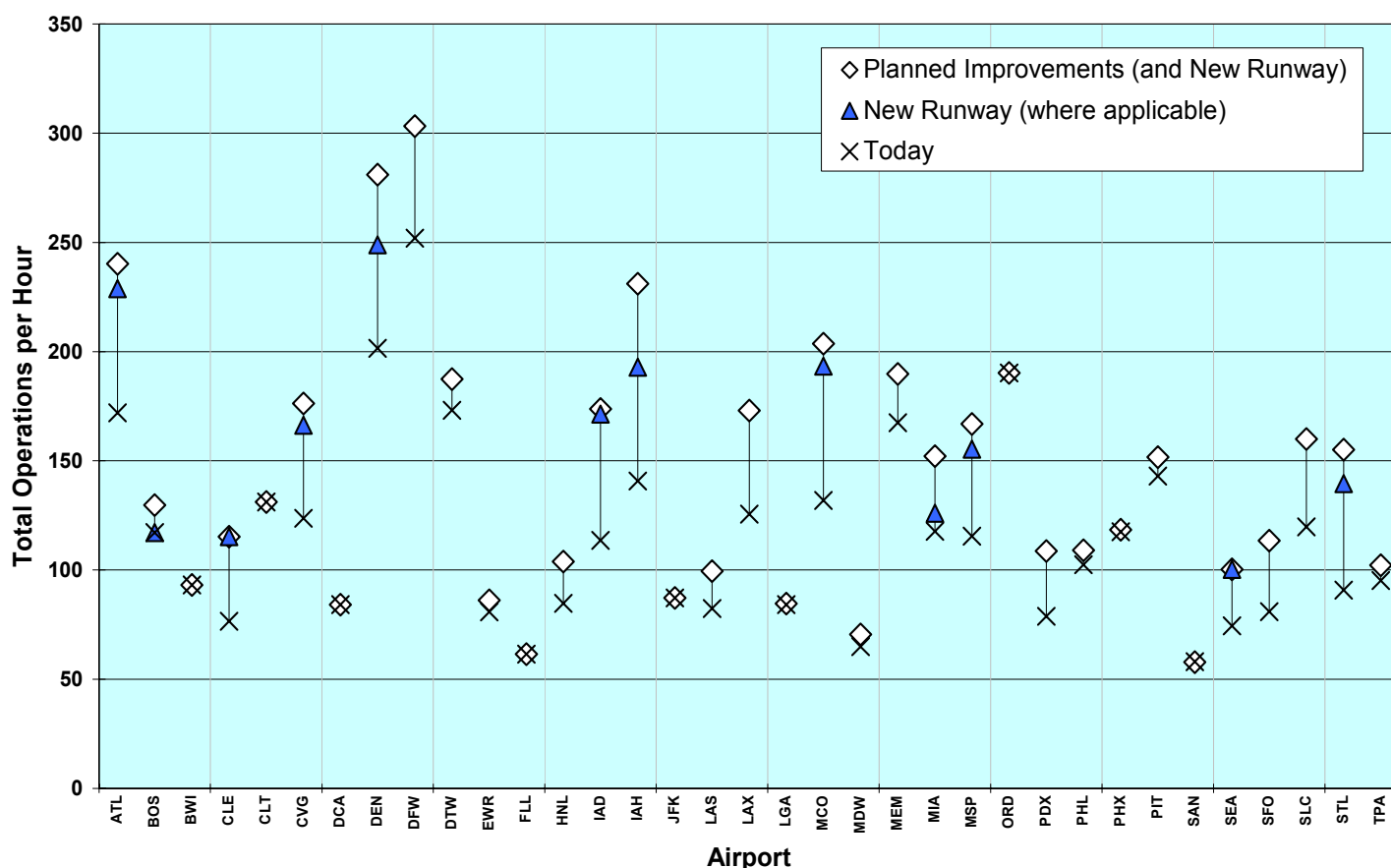
Στο παρακάτω σχήμα 12 μπορούμε να δούμε το κέρδος στην αύξηση της χωρητικότητας που έχει κάθε αεροδρόμιο από την οικοδόμηση ενός νέου αεροδιαδρόμου με παράλληλη βελτίωση των τεχνολογικών συστημάτων και των στρατηγικών που χρησιμοποιεί.



Σχήμα 12. Αύξηση της χωρητικότητας των αεροδρομίων από χρήση νέων αεροδιαδρόμων (όπου είναι δυνατό) σε καταστάσεις καλής ορατότητας και καλών καιρικών συνθηκών

Στο παραπάνω γράφημα βλέπουμε τα αεροδρόμια που επίσημα έχουν μελετήσει το ενδεχόμενο οικοδόμησης νέων αεροδιαδρόμων τα οποία είναι τα **Atlanta, Boston, Cincinnati, Cleveland, Denver, Houston, Miami, Minneapolis-St. Paul, Orlando, St. Louis, Seattle-Tacoma, and Washington Dulles**. Η αύξηση στην χωρητικότητα τους κυμαίνεται από 25-50% στα περισσότερα από αυτά για ιδανικές καιρικές συνθήκες. Παράδειγμα η χρήση του νέου αεροδιαδρόμου στο αεροδρόμιο Minneapolis –St.Paul θα χρησιμοποιείται λόγω προσανατολισμού για πτήσεις από και προς νότο και η αύξηση του είναι αρκετά σημαντική της τάξης των 40 πτήσεων/ώρα. Ενώ αντίθετα στο αεροδρόμιο **Boston international** ο νέος αεροδιάδρομος δεν επιφέρει κανένα κέρδος στην χωρητικότητα του αεροδρόμιου ,διότι θα τίθεται σε λειτουργία μόνο όταν πνέουν ισχυρότατοι βορειοδυτικοί άνεμοι ,γεγονός που δεν είναι σύνηθες. Γενικά λοιπόν το κέρδος όμως από την οικοδόμηση των νέων αεροδιαδρόμων στην χωρητικότητα των αεροδρομίων είναι σημαντικό και σίγουρα θα μειώσει ως ένα σημαντικό βαθμό τις καθυστερήσεις.

Το πραγματικό κέρδος όμως στην χωρητικότητα των αεροδρομίων από την χρήση νέων αεροδιαδρόμων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 10.Το παρακάτω σχήμα αναφέρεται στις σημερινές χωρητικότητες των αεροδρομίων σε μέτριες καιρικές συνθήκες (marginal) όπου συνήθως η χωρητικότητα των αεροδρομίων μειώνεται αυξάνοντας έτσι τις καθυστερήσεις σε σημαντικό βαθμό. Επίσης φαίνεται η βελτίωση της χωρητικότητας από την χρήση νέων αεροδιαδρόμων (μπλε τρίγωνο) αλλά και η περαιτέρω βελτίωση από την χρήση εξελιγμένων συστημάτων και διαδικασιών (planned improvements) οι οποίες απεικονίζονται με ρόμβο .

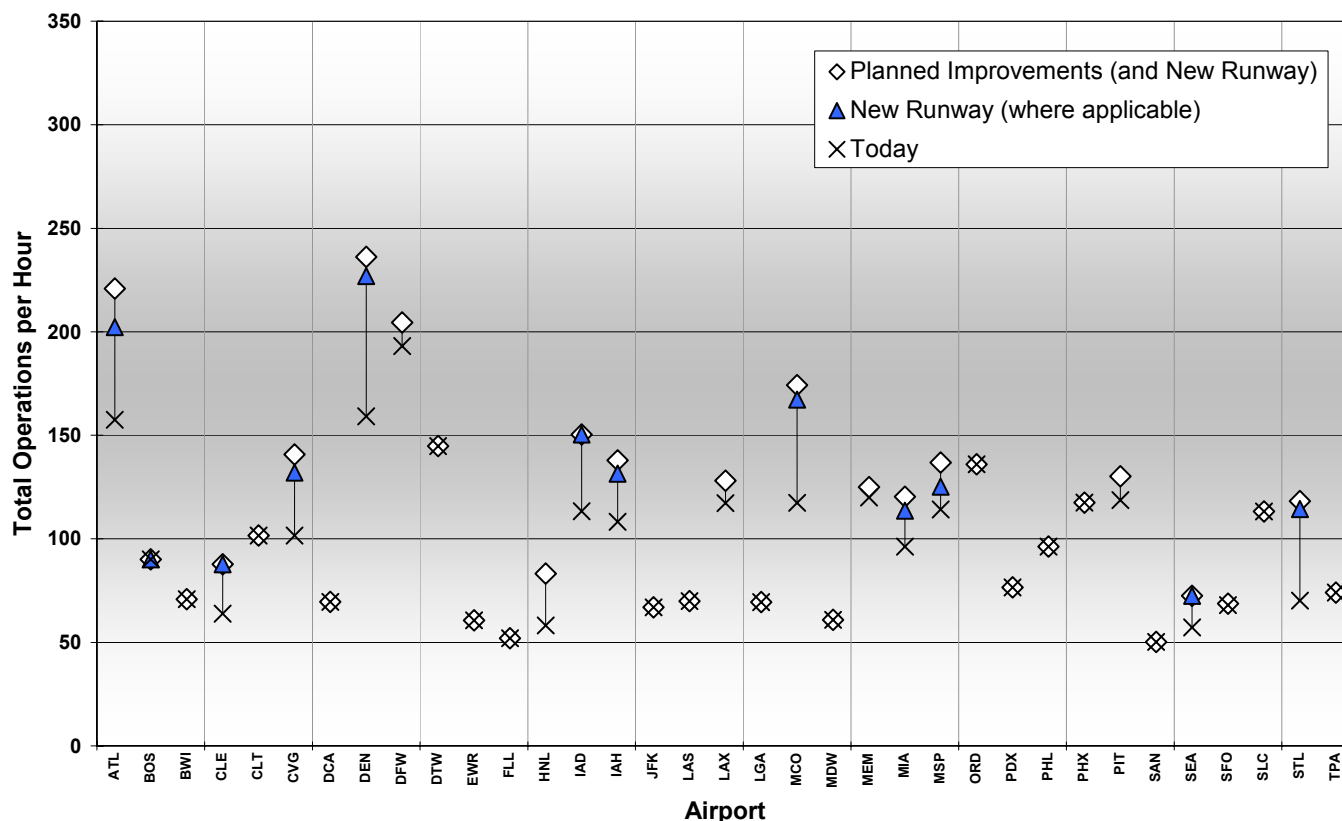


Σχήμα 13.Αύξηση της χωρητικότητας των αεροδρομίων από την χρήση νέων αεροδιαδρόμων (όπου είναι δυνατό) σε καταστάσεις μέτριας ορατότητας και μέτριων καιρικών συνθηκών

Στο σχήμα 10 παρατηρούμε ότι κατά μέσο όρο η αύξηση της χωρητικότητας των αεροδρομίων σε μέτριες καιρικές συνθήκες είναι 37% από την χρήση απλά ενός νέου αεροδιαδρόμου και ακόμα παραπάνω από την χρήση εξελιγμένων συστημάτων (planned improvements) τα οποία θα εξηγήσουμε παρακάτω τι είναι.

Τέλος στο παρακάτω σχήμα 11 παρατηρούμε τις αντίστοιχες βελτιώσεις για τις χειρότερες καιρικές συνθήκες (IFR) κάτω από τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει ένα αεροδρόμιο .Στις συνθήκες αυτές όπως ήδη έχουμε αναφέρει η προσέγγιση και η αναχώρηση στο και από το αεροδρόμιο αντίστοιχα για ένα αεροσκάφος είναι αρκετά δύσκολη λόγω της χαμηλής ορατότητας και των ανέμων που επικρατούν .

Επίσης οι αποστάσεις μεταξύ των αεροσκαφών μεγαλώνουν αρκετά για λόγους ασφαλείας με αποτέλεσμα οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων και οι χρόνοι μεταξύ αναχωρήσεων να αυξάνονται πολύ σε σχέση με τις καλές καιρικές συνθήκες μειώνοντας έτσι σημαντικά την δυναμικότητα του αεροδρομίου.



Σχήμα 14.Αύξηση της χωρητικότητας των αεροδρομίων από την χρήση νέων αεροδιαδρόμων (όπου είναι δυνατό) σε καταστάσεις χαμηλής ορατότητας και κακών καιρικών συνθηκών

Παρατηρούμε ότι και σε αυτές τις καιρικές συνθήκες η βελτίωση της χωρητικότητας είναι σημαντική αλλά όχι σε όλα τα αεροδρόμια .Η υψηλότερη βελτίωση εμφανίζεται στα αεροδρόμια της Atlanta, Denver,Orlando (MCO), Seattle.Ενώ τα υπόλοιπα εμφανίζουν μικρότερη βελτίωση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε συνοπτικά τις αυξήσεις με ποσοστά στην χωρητικότητα για κάθε περίπτωση καιρικών συνθηκών ανά αεροδρόμιο.

| Airport | Ποσοστά αύξησης χωρητικότητας μελλοντικά | | | | | |
|---------|--|----------|-----|--|----------|-----|
| | Νέος αεροδιάδρομος (σε ορισμένα αεροδρόμια) | | | Βελτιώσεις διαχείρισης + νέος αεροδιάδρομος | | |
| | Optimum | Marginal | IFR | Optimum | Marginal | IFR |
| ATL | 32 | 33 | 28 | 35 | 40 | 40 |
| BOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 |
| BWI | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| CLE | 44 | 51 | 37 | 44 | 51 | 37 |
| CLT | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| CVG | 35 | 34 | 30 | 41 | 43 | 39 |
| DCA | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| DEN | 22 | 24 | 43 | 29 | 39 | 48 |
| DFW | — | — | — | 9 | 20 | 6 |
| DTW | — | — | — | 0 | 8 | 0 |
| EWB | — | — | — | 1 | 7 | 0 |
| FLL | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| HNL | — | — | — | 0 | 22 | 43 |
| IAD | 27 | 51 | 33 | 29 | 53 | 33 |
| IAH | 35 | 37 | 22 | 61 | 64 | 27 |
| JFK | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| LAS | — | — | — | 1 | 21 | 0 |
| LAX | — | — | — | 26 | 38 | 9 |
| LGA | — | — | — | 0 | 1 | 0 |
| MCO | 35 | 47 | 42 | 35 | 54 | 48 |
| MDW | — | — | — | 9 | 9 | 0 |
| MEM | — | — | — | 6 | 13 | 4 |
| MIA | 23 | 7 | 18 | 28 | 29 | 25 |
| MSP | 40 | 35 | 10 | 46 | 44 | 20 |
| ORD | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| PDX | — | — | — | 0 | 38 | 0 |
| PHL | — | — | — | 0 | 7 | 0 |
| PHX | — | — | — | 0 | 1 | 0 |
| PIT | — | — | — | 0 | 6 | 10 |
| SAN | — | — | — | 0 | 0 | 0 |
| SEA | 22 | 35 | 27 | 22 | 35 | 27 |
| SFO | — | — | — | 8 | 40 | 1 |
| SLC | — | — | — | 22 | 34 | 0 |
| STL | 34 | 54 | 63 | 41 | 71 | 68 |
| TPA | — | — | — | 0 | 7 | 0 |

Οι προγραμματισμένες βελτιώσεις διαχείρισης των πτήσεων (planned improvements) που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα είναι κυρίως πληροφοριακά συστήματα, ραντάρ και εξοπλισμός που θα υπολογίζουν με τέτοιο τρόπο και ακρίβεια τις διαδρομές των αεροσκαφών για την άφιξη τους στον αεροδιάδρομο ή την αναχώρησή τους ώστε οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων και αναχωρήσεων να ελαχιστοποιηθούν ακόμα περισσότερο βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο την χωρητικότητα των αεροδρομίων.

Ακόμη τα συστήματα αυτά θα επιτρέπουν την ταυτόχρονη άφιξη δύο αεροσκαφών σε διαφορετικούς αεροδιαδρόμους οι οποίοι βέβαια απέχουν κάποια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους με κατώτατο όριο τα 2500 πόδια.

Επίσης με τα συστήματα αυτά δίνεται η δυνατότητα στα αεροσκάφη ακόμη και σε μέτριες καιρικές συνθήκες να κρατούν τις ελάχιστες δυνατές αποστάσεις μεταξύ τους παρέχοντας την αναγκαία ασφάλεια, ενώ σήμερα οι αποστάσεις αυτές αυξάνονται αρκετά βάση διεθνών κανόνων ασφαλείας όσο οι καιρικές συνθήκες χειροτερεύουν. Η μείωση των μεταξύ τους αποστάσεων θα μειώσει τους χρόνους μεταξύ αφίξεων αυξάνοντας την χωρητικότητα των αεροδρομίων σε τέτοιες καιρικές συνθήκες.

Τα παραπάνω βρίσκονται υπό έρευνα αυτή την περίοδο από την FAA και αναμένονται να εφαρμοστούν στην διεθνή εναέρια κυκλοφορία έως το 2013. Μερικά από αυτά τα συστήματα ενδεικτικά αναφέρουμε ότι είναι τα : S.O.I.A , P.R.M , S.T.A.R.S , R.N.A.V, C.E.F.R

2.ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΦΙΞΕΩΝ

The aircraft scheduling & sequencing landing problem

2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ & ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με ένα συνηθισμένο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα μεγάλα αεροδρόμια ,το πρόβλημα αφορά τον προγραμματισμό - διαδοχή αφίξεων με στόχο την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων οι οποίες προκαλούνται από αφίξεις ανά χρονικό διάστημα που ξεπερνούν την χωρητικότητα ενός αεροδρομίου.

Στην εισαγωγή αναφέραμε ότι ο ελεγκτής σε κατάσταση εναέριας κυκλοφοριακής συμφόρησης αναγκάζεται να τοποθετεί τα αεροσκάφη σε κυκλικές τροχιές γύρω από το αεροδρόμιο έως ότου το αεροδρόμιο είναι ικανό να ανταποκριθεί στις απαραίτητες διαδικασίες για την προσγείωση ,γεννάται λοιπόν το ερώτημα με ποια σειρά ή διαδοχή θα πρέπει αυτά τα αεροσκάφη να προσγειωθούν έτσι ώστε να έχουμε την μικρότερες δυνατές καθυστερήσεις αλλά και να τηρούνται οι διεθνείς κανόνες ασφαλείας .

Αρχικά είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι διεθνείς κανονισμοί εναέριας κυκλοφορίας επιβάλλουν την διατήρηση ενός ορισμένου ελάχιστου χρονικού διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών αεροσκαφών που θα προσγειωθούν και εξαρτάται από τους τύπους των αεροσκαφών , η δεύτερη παράμετρος αφορά το βάρος και την ταχύτητα προσγείωσης που είναι τεχνικά χαρακτηριστικά των αεροσκαφών και διαφέρουν από τύπο σε τύπο.

Δηλαδή το πρώτο αεροσκάφος που θα προσγειωθεί και ανάλογα με το τύπο του καθορίζει το ελάχιστο χρονικό διάστημα που πρέπει να περάσει έτσι ώστε να προσγειωθεί το επόμενο αεροσκάφος κ ούτο καθεξής .Αυτό συμβαίνει διότι δημιουργούνται δίνες, στροβιλισμοί και ρεύματα αέρα στον περιβάλλοντα χώρο του αεροδιαδρόμου κατά την διάρκεια της προσγείωσης ενός αεροσκάφους και έτσι είναι απαραίτητο να περάσει ένα χρονικό διάστημα έτσι ώστε το επόμενο να μπορεί να προσγειωθεί με ασφάλεια ιδιαίτερα αν το επόμενο είναι και μικρότερο σε βάρος.

Μέχρι πρότεινος τα περισσότερα αεροδρόμια ακολουθούσαν ως πολιτική αφίξεων την πολιτική **First-Come-First-Served** που τελικά ήταν υπεύθυνη σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης για τις μεγάλες καθυστερήσεις που προκαλούνταν.

Με βάση τους κανονισμούς της **F.A.A** η καθυστέρηση που καταγράφεται είναι αυτή που διαρκεί άνω των 15-16 λεπτών και υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του πραγματικού χρόνου προσγείωσης (**Actual Landing Time,ALT[i]**) και του προτιμώμενου χρόνου προσγείωσης (**Preferred Landing Time,PLT[i]**) όπου i ο κωδικός αριθμός του αεροσκάφους. Πιο συγκεκριμένα ο χρόνος καθυστέρησης ξεκινά να μετριέται από την στιγμή που το αεροσκάφος ζητήσει άδεια προσγείωσης και σταμάτα όταν του δοθεί η άδεια να προσγειωθεί .Εάν το αεροσκάφος για παράδειγμα φτάνοντας στον αερολιμένα ζητήσει άδεια προσγείωσης και υπάρχει συμφόρηση στο αεροδρόμιο τότε τοποθετείται σε τροχιές κράτησης και τότε αρχίζει να μετριέται η καθυστέρηση του και σταματά η μέτρηση όταν εξέλθει από τις τροχιές κράτησης.

Το **PLT[i]** δίνεται σε κάθε αεροσκάφος i όταν αυτό ανιχνευθεί από το ραντάρ που είναι υπεύθυνο για εκείνο τον χώρο **Tracon** και συνήθως γίνεται γνωστό 40 λεπτά νωρίτερα προτού προσεγγίσει το αεροδρόμιο, αυτός ο χρόνος αναφέρεται στο πραγματικό χρόνο προσγείωσης (προσεγγιστικά) εάν το αεροσκάφος ήταν το μόνο που προσέγγιζε το αεροδρόμιο .

Ο χρόνος **PLT[i]** που δίνεται σε κάθε αεροσκάφος υπολογίζεται βάση της ταχύτητας που πετά ,το ύψος πτήσης και την απόσταση που πρέπει να διανύσει. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι υπάρχει και ένα δημοσιευμένο πλάνο πτήσεων 1 ή 2 μέρες πριν την πραγματική άφιξη τους ,τις περισσότερες φορές όμως την ημέρα της

άφιξης παρατηρούνται πολλές διαφορές από το πλάνο πτήσεων εξαιτίας τυχαίων γεγονότων π.χ ακυρώσεις πτήσεων, νέες αφίξεις, κυκλοφοριακή συμφόρηση, καθυστερημένη αναχώρηση, διαφορετική ταχύτητα πτήσης κτλ.

Για τον λόγο αυτό προτιμάται η συνεργασία με τα ραντάρ και έναν on-line αλγόριθμο που σε πραγματικό χρόνο προγραμματίζει την σειρά αφίξεων με στόχο την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων και την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της χωρητικότητας του αεροδρομίου, αυτό σημαίνει να ολοκληρωθεί η διαδικασία προσγείωσης όλων των αεροσκαφών στον μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα (minimization total completion time).

Μια πιο αποτελεσματική πολιτική από την FCFS που χρησιμοποιεί ο παραπάνω αλγόριθμος έγκειται στην **αλλαγή θέσης (position shifting)** των αεροσκαφών στην ακολουθία από αυτή που βρίσκονταν αρχικά σε μια άλλη η οποία θα διευκολύνει την κατάσταση όπως θα δούμε παρακάτω.

Παρακάτω παραθέτω τον πίνακα των ελάχιστων χρόνων που πρέπει να διατηρηθούν μεταξύ δύο διαδοχικών προσγειώσεων ανάλογα με τους τύπους των αεροσκαφών ,χρησιμοποιώντας τέσσερις συνηθισμένους τύπους πολιτικών αεροσκαφών :

| Sij (sec) | Κατηγορία αεροσκάφους που ακολουθεί j | | | | |
|---|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Κατηγορία του αεροσκάφους που προσγειώνεται i | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | 1 | 96 | 200 | 181 | 228 |
| | 2 | 72 | 80 | 70 | 110 |
| | 3 | 72 | 100 | 70 | 130 |
| | 4 | 72 | 80 | 70 | 90 |
| Αντιστοιχία | | 1=B747 | 2=B727 | 3=B707 | 4=DC9 |

Παρατηρούμε ότι ο πίνακας δεν είναι συμμετρικός ,για παράδειγμα εάν το πρώτο αεροσκάφος που θα προσγειωθεί είναι τύπου 1=B747 και το αεροσκάφος που ακολουθεί είναι τύπου 2=DC9 τότε θα χρειαστούν 228 δευτερόλεπτα από τότε που θα προσγειωθεί το πρώτο για να προσγειωθεί το δεύτερο , ενώ αν αλλάξουμε την σειρά δηλαδή το πρώτο να είναι τύπου 4 και το δεύτερο τύπου 1 τότε θα χρειαστούν 72 δευτερόλεπτα ως χρόνος ασφαλείας ανάμεσα στις 2 διαδοχικές προσγειώσεις .

Πρέπει να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι το αεροσκάφος τύπου 1 είναι το βαρύτερο από τους 4 τύπους και το αεροσκάφος τύπου 4 το ελαφρύτερο.

Για παράδειγμα έστω ότι έχουμε 4 αεροπλάνα προς προσγείωση τύπου 1,2,3,4 τα οποία αφικνούνται με ακριβώς αυτή την σειρά και δίχως περιορισμούς προτεραιότητας, τότε έχουμε $4!=24$ διαφορετικούς τρόπους να προσγειώσουμε όλα τα αεροπλάνα εάν διαλέξουμε την ακολουθία {4, 1, 2, 3} τότε ο συνολικός χρόνος για να προσγειωθούν όλα τα αεροσκάφη είναι 342 sec εάν αλλάξουμε όμως την θέση του αεροσκάφους τύπου 1 και την βάλουμε στο τέλος τότε θα έχουμε την ακολουθία {4 ,2, 3, 1} όπου εδώ θα χρειαστούμε 222sec για να προσγειώσουμε και τα 4 αεροσκάφη.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν το κέρδος στην καθυστέρηση κάθε αεροσκάφους με την αλλαγή στην σειρά προσγείωσης ιδιαίτερα αν φανταστούμε μια «ουρά» από αρκετά αεροσκάφη.

Η δομή του παραπάνω προβλήματος απαιτεί διαδοχή εργασιών (sequence-dependent) και εκτέλεση κάθε εργασίας ακριβώς μια φορά μας παραπέμπει λοιπόν στο πρόβλημα του περιπλανώμενου πωλητή ,τον ρόλο του πωλητή τον έχει το αεροδρόμιο και το ρόλο των πόλεων προς επίσκεψη των έχουν τα αεροπλάνα που αναμένουν για εξυπηρέτηση από το αεροδρόμιο.

Επίσης το πρόβλημα αυτό ισοδυναμεί και με ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι γραμμές παραγωγής όπου στο πρόβλημα αυτό έχουμε μια μηχανή M1 και έναν αριθμό N εργασιών προς εκτέλεση ,η κάθε εργασία τώρα έχει τον δικό της χρόνο κατεργασίας (**processing time**) , και επίσης υπάρχει ένας χρόνος προετοιμασίας της μηχανής (π.χ αλλαγή κοπτικού σε τόννο) για να εκτελέσουμε την εργασία j μετά την εργασία i ο οποίος εξαρτάται από τους τύπους των δύο αυτών διαδοχικών εργασιών

(π.χ τόννευση, δημιουργία σπειρώματος, κτλ).Εδώ το ζητούμενο προς ελαχιστοποίηση είναι να εκτελεστούν όλες η εργασίες στο μικρότερο δυνατό χρόνο έτσι ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα της μηχανής δηλαδή προϊόντα/μονάδα χρόνου.

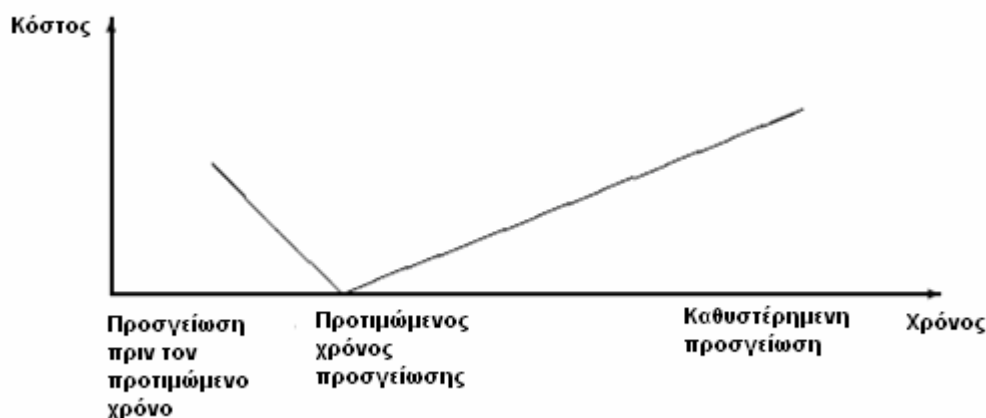
Καθημερινά σε περιόδους αιχμής τα αεροδρόμια καλούνται να εξυπηρετήσουν ροή αφίξεων (αφίξεις/χρονικό διάστημα) η οποία ξεπερνά την χωρητικότητα του αεροδρομίου με αποτέλεσμα τις καθυστερήσεις και την εναέρια κυκλοφοριακή συμφόρηση .

Έτσι έχουν γραφτεί διάφοροι αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν ως στόχο την εύρεση της καλύτερης δυνατής ακολουθίας ή σειράς με την οποία τα αεροσκάφη πρέπει να προσγειωθούν προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις αλλά όσο γίνεται και ο συνολικός χρόνος που θα χρειαστεί για να προσγειωθούν όλα τα αεροσκάφη (total completion time) .

Η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου προσγείωσης όλων των αεροσκαφών εστιάζει στην χωρητικότητα του αεροδρομίου δηλαδή να την ξεπεράσει όσο λιγότερο γίνεται . Η ελαχιστοποίηση των συνολικών καθυστερήσεων εστιάζει στο κόστος των αεροπορικών εταιριών ,το κόστος αυτό προέρχεται από διάφορες ρήτρες ,από αυξημένη κατανάλωση καυσίμων λόγω κράτησης των αεροσκαφών σε κυκλικές τροχιές κτλ.

Σε αρκετές περιπτώσεις με την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων ελαχιστοποιείται και ο συνολικός χρόνος προσγείωσης όλων των αεροσκαφών αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα εξαρτάται από τους τύπους των αεροσκαφών και την αρχική τους θέση στην ακολουθία FCFS.

Στο παρακάτω γράφημα 1 παραθέτουμε ενδεικτικά το κόστος των αεροπορικών εταιριών συναρτήσει με το πόσο απέχει ένα αεροσκάφος από την προγραμματισμένη ώρα προσγείωσης του .



Γράφημα 1

Παρατηρούμε στο γράφημα 1 ότι όσο περισσότερο απέχει ο πραγματικός χρόνος προσγείωσης από τον προτιμώμενο τόσο το κόστος (γραμμικά) αυξάνεται.

Επίσης παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αύξησης του κόστους για πραγματικό χρόνο προσγείωσης πριν από τον προτιμώμενο είναι μεγαλύτερος (κλίση της ευθείας) σε σύγκριση με τον ρυθμό αύξησης κόστους για καθυστερημένη προσγείωση. Για τον λόγο αυτό γενικότερα αποφεύγεται να προσγειώνεται το αεροσκάφος πριν από τον προτιμώμενο χρόνο προσγείωσης .

Οι δύο παράμετροι που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε την συμφόρηση σε ένα αεροδρόμιο είναι ο αριθμός των αεροσκαφών Number και το χρονικό διάστημα Trange (sec) μέσα στο οποίο εμφανίζονται όλα τα αεροσκάφη .Δηλαδή εάν ένα αεροδρόμιο έχει χωρητικότητα 40αφίξεις/ώρα και η ροή αφίξεων σε περίοδο αιχμής είναι 30αφίξεις/25λεπτά τότε έχουμε Number=30 αεροσκάφη τα οποία προσεγγίζουν το αεροδρόμιο μέσα σε 25 λεπτά περίπου, δηλαδή το τελευταίο αεροσκάφος έχει $PLT[30] \approx 1500 \text{sec}$.

Παρακάτω παραθέτουμε ένα παράδειγμα ακολουθίας προσγείωσης εφαρμόζοντας την πολιτική FCFS δηλαδή τα προσγειώνουμε έτσι όπως ακριβώς έρχονται , παραθέτουμε επίσης τους προτιμώμενους χρόνους άφιξης **PLT**, τους πραγματικούς χρόνους άφιξης **ALT** τηρώντας τους χρόνους ασφαλείας μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων **MLT** αλλά και τις καθυστερήσεις όπου ισχύει **DELAY[i]=ALT[i]-PLT[i]**. Υποθέτουμε έναν αεροδιάδρομο που χρησιμοποιείται μόνο για αφίξεις με χωρητικότητα 35-40 αφίξεις την ώρα όπως δείξαμε παραπάνω και 30 αεροσκάφη που προσεγγίζουν τον αερολιμένα μέσα σε χρόνο 25 λεπτών. Το σενάριο αυτό είναι ένα από τα πιο έντονα αν σκεφτούμε την χωρητικότητα του αερολιμένα.

| FCFS strategy | | | | | | |
|--------------------------|----------------|------------|-----------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| Number.ac | Type.ac | Mlt | PLT(sec) | ALT(sec) | Delay(sec) | Delay(min) |
| 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 80 | 50 | 80 | 30 | 1 |
| 3 | 1 | 72 | 117 | 152 | 35 | 1 |
| 4 | 3 | 181 | 129 | 333 | 204 | 3 |
| 5 | 4 | 130 | 143 | 463 | 320 | 5 |
| 6 | 1 | 72 | 174 | 535 | 361 | 6 |
| 7 | 3 | 181 | 217 | 716 | 499 | 8 |
| 8 | 1 | 72 | 260 | 788 | 528 | 9 |
| 9 | 3 | 181 | 288 | 969 | 681 | 11 |
| 10 | 4 | 130 | 340 | 1099 | 759 | 13 |
| 11 | 4 | 90 | 350 | 1189 | 839 | 14 |
| 12 | 2 | 80 | 505 | 1269 | 764 | 13 |
| 13 | 2 | 80 | 526 | 1349 | 823 | 14 |
| 14 | 4 | 110 | 541 | 1459 | 918 | 15 |
| 15 | 4 | 90 | 554 | 1549 | 995 | 17 |
| 16 | 3 | 70 | 590 | 1619 | 1029 | 17 |
| 17 | 4 | 130 | 648 | 1749 | 1101 | 18 |
| 18 | 1 | 72 | 651 | 1821 | 1170 | 20 |
| 19 | 2 | 200 | 669 | 2021 | 1352 | 23 |
| 20 | 3 | 70 | 691 | 2091 | 1400 | 23 |
| 21 | 1 | 72 | 707 | 2163 | 1456 | 24 |
| 22 | 3 | 181 | 762 | 2344 | 1582 | 26 |
| 23 | 4 | 130 | 769 | 2474 | 1705 | 28 |
| 24 | 2 | 80 | 792 | 2554 | 1762 | 29 |
| 25 | 4 | 110 | 859 | 2664 | 1805 | 30 |
| 26 | 1 | 72 | 993 | 2736 | 1743 | 29 |
| 27 | 2 | 200 | 1064 | 2936 | 1872 | 31 |
| 28 | 4 | 110 | 1077 | 3046 | 1969 | 33 |
| 29 | 4 | 90 | 1207 | 3136 | 1929 | 32 |
| 30 | 1 | 72 | 1401 | 3208 | 1807 | 30 |
| | | | | Average delay: | 1047,93sec | 17,46 min |

Για το ίδιο σετ αεροσκαφών και το ίδιο χρονικό διάστημα προσέγγισης (Trange) 1400 sec χρησιμοποιούμε έναν ευρετικό αλγόριθμο για να δημιουργήσουμε μια ακολουθία προσγείωσης η οποία έχει μειωμένες καθυστερήσεις σε σχέση με την πολιτική FCFS .

| STRATEGY :HEURISTIC ALGORITHM , CIH | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|------|-----|------|-----------------------|----------------------------|
| Position | number ac | Type | MLT | PLT | ALT | DELAY(sec) |
| 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 2 | 80 | 50 | 80 | 30 |
| 3 | 4 | 3 | 70 | 129 | 150 | 21 |
| 4 | 7 | 3 | 70 | 217 | 220 | 3 |
| 5 | 9 | 3 | 70 | 288 | 290 | 2 |
| 6 | 5 | 4 | 130 | 143 | 420 | 277 |
| 7 | 10 | 4 | 90 | 340 | 510 | 170 |
| 8 | 11 | 4 | 90 | 350 | 600 | 250 |
| 9 | 14 | 4 | 90 | 541 | 690 | 149 |
| 10 | 15 | 4 | 90 | 554 | 780 | 226 |
| 11 | 17 | 4 | 90 | 648 | 870 | 222 |
| 12 | 23 | 4 | 90 | 769 | 960 | 191 |
| 13 | 25 | 4 | 90 | 859 | 1050 | 191 |
| 14 | 28 | 4 | 90 | 1077 | 1140 | 63 |
| 15 | 29 | 4 | 90 | 1207 | 1230 | 23 |
| 16 | 12 | 2 | 80 | 505 | 1310 | 805 |
| 17 | 13 | 2 | 80 | 526 | 1390 | 864 |
| 18 | 19 | 2 | 80 | 669 | 1470 | 801 |
| 19 | 24 | 2 | 80 | 792 | 1550 | 758 |
| 20 | 27 | 2 | 80 | 1064 | 1630 | 566 |
| 21 | 16 | 3 | 70 | 590 | 1700 | 1110 |
| 22 | 20 | 3 | 70 | 691 | 1770 | 1079 |
| 23 | 22 | 3 | 70 | 762 | 1840 | 1078 |
| 24 | 3 | 1 | 72 | 117 | 1912 | 1795 |
| 25 | 6 | 1 | 96 | 174 | 2008 | 1834 |
| 26 | 8 | 1 | 96 | 260 | 2104 | 1844 |
| 27 | 18 | 1 | 96 | 651 | 2200 | 1549 |
| 28 | 21 | 1 | 96 | 707 | 2296 | 1589 |
| 29 | 26 | 1 | 96 | 993 | 2392 | 1399 |
| 30 | 30 | 1 | 96 | 1401 | 2488 | 1087 |
| | | | | | Average delay: | 665 sec ή 11,08 min |

Συγκρίνοντας τους δύο παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι για ακριβώς το ίδιο σενάριο ο αλγόριθμος δημιουργεί μια ακολουθία όπου έχει μέσο όρο καθυστερήσεων 11 λεπτά ενώ η πολιτική FCFS 17 λεπτά το κέρδος είναι αρκετά μεγάλο στις καθυστερήσεις. Από άποψη βέλτιστης εκμετάλλευσης της χωρητικότητας του αεροδρομίου η πολιτική FCFS απαιτεί 53,5 λεπτά για την προσγείωση όλων των αεροσκαφών, ενώ η ακολουθία που δημιουργεί ο αλγόριθμος απαιτεί 42 λεπτά βελτιώνοντας την χωρητικότητα του αεροδρομίου.

Το throughput (ρυθμός εξυπηρέτησης= χωρητικότητα) με την πολιτική FCFS είναι : $TH = \frac{\text{πλήθος αεροσκαφών}}{\text{συνολικός χρόνος περάτωσης}} = 0,56 \text{ αεροσκάφη/λεπτό}$ δηλαδή $TH = 34$ αεροσκάφη /ώρα.

Το throughput (ρυθμός εξυπηρέτησης =χωρητικότητα) με την πολιτική position shifting του ευρετικού αλγορίθμου είναι

$$TH = \frac{\text{πλήθος αεροσκαφών}}{\text{συνολικός χρόνος περάτωσης}} = 0,71 \text{ αεροσκάφη /λεπτό} \quad \text{δηλαδή} \quad TH=42 \text{ αεροσκάφη /ώρα} .$$

Παρατηρούμε ότι το κέρδος είναι διπλό και για τον μέσο όρο των καθυστερήσεων αλλά και για την χωρητικότητα του αεροδρόμιου με την έννοια ότι ο αλγόριθμος έναντι της πολιτικής FCFS τοποθετεί σε τέτοια ακολουθία τα αεροσκάφη έτσι ώστε ο ρυθμός που εξυπηρετεί το αεροδρόμιο τα εισερχόμενα αεροσκάφη να είναι μεγαλύτερος. Με αυτόν το τρόπο εκμεταλλεύεται καλύτερα την χωρητικότητα του αεροδρόμιου διότι ελαχιστοποιεί τα κενά διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών προσγειώσεων .

Το μόνο αρνητικό στη λύση του αλγόριθμου είναι ότι αρκετά αεροσκάφη ‘αδικούνται’ δηλαδή ενώ στην ακολουθία FCFS βρίσκονται στις πρώτες θέσεις ύστερα από την εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας βρίσκονται αρκετές θέσεις πιο πίσω προς όφελος των υπολοίπων. Για παράδειγμα το αεροσκάφος 3 ενώ βρίσκεται στην 3^η θέση της ακολουθίας (FCFS) ύστερα από την εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας τοποθετείται στην 24^η θέση . Υπάρχει τρόπος να περιορίσουμε αυτό το φαινόμενο εφαρμόζοντας την μέθοδο ‘περιορισμένης αλλαγής θέσεων’ (**constrained position shifting**) με κάποιο κόστος στις συνολικές καθυστερήσεις όπως θα δούμε παρακάτω σε άλλο κεφάλαιο αλλά με κέρδος στην κατανομή των καθυστερήσεων.

2.2 ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με την Βασική Αρχή Απαρίθμησης ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να εκτελέσουμε ένα έργο το οποίο αποτελείται από k μέρη και ότι το 1ο μέρος του μπορεί να εκτελεστεί με n1 διαφορετικούς τρόπους, το 2ο μέρος του μπορεί να εκτελεστεί με n2 διαφορετικούς τρόπους κ.ο.κ. το k μέρος μπορεί να εκτελεστεί με nk διαφορετικούς τρόπους.

Ο συνολικός αριθμός των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους μπορεί να εκτελεστεί το έργο είναι ίσος με:

| |
|--|
| $\Sigma = n_1 * n_2 * n_3 * \dots * n_k$ |
|--|

Με την παραπάνω μέθοδο και γνωρίζοντας τον αριθμό των αεροσκαφών π.χ 30 αεροσκάφη μπορούμε να υπολογίσουμε όλους τους δυνατούς τρόπους (ακολουθίες) σειράς προσγείωσης των αεροσκαφών αυτών.

Παράδειγμα για 30 αεροσκάφη για τα οποία ζητάμε την βέλτιστη ακολουθία – σειρά προσγείωσης οι υπολογιζόμενες λύσεις είναι N για την πρώτη θέση της ακολουθίας, N-1 για την δεύτερη της ακολουθίας (δηλαδή 29 αεροσκάφη μπορούν να μπουν στην 2^η θέση) και ούτο καθεξής, άρα ο συνολικός αριθμός διαφορετικών ακολουθιών με τις οποίες μπορεί να εκτελεστεί η προσγείωση τους είναι :

$$\Sigma = N * N-1 * N-2 * \dots * 1 = 30 * 29 * 28 * 27 * \dots * 1 = 30! \Rightarrow \Sigma = 2,65 \times 10^{32} \text{ ακολουθίες.}$$

Ο αριθμός των διαφορετικών ακολουθιών είναι πολύ μεγάλος (NP HARD) και χρειάζεται αρκετό χρόνο ένας υπολογιστής για να δημιουργήσει και να ελέγξει ποια από τις $2,65 \times 10^{32}$ ακολουθίες είναι η απολύτως βέλτιστη ταυτόχρονα ο αλγόριθμος που θα αναλάβει να επιλύσει αυτό το πρόβλημα πρέπει να είναι **real time** για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά όποτε χρειάζεται διαφορετική τεχνική επίλυσης .

3.ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΥΡΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Heuristic algorithms

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΥΡΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ CΙΗ (cheapest insertion heuristic)

Ο αλγόριθμος αυτός βρίσκεται στο επιστημονικό paper: “**minimizing total completion time subject to release dates and sequence-dependent processing times**” με επιστημονικούς υπευθύνους τους Lucio Bianco, Paolo Dell’ Olmo ,Stefano Giordani .

Ο αλγόριθμος βρίσκει μια ‘βέλτιστη’ ακολουθία από N εργασίες ξεκινώντας από την standard εργασία 1 σε N-1 επαναλήψεις.

Σε κάθε επανάληψη η καλύτερη μερική ακολουθία δημιουργείται εισάγοντας μια μη προγραμματισμένη (δηλαδή από εργασίες που δεν έχουν ακόμα τοποθετηθεί στην ακολουθία) εργασία σε κάθε δυνατή θέση της ακολουθίας των προγραμματισμένων εργασιών .

Ας θεωρήσουμε ότι βρισκόμαστε στην επανάληψη k+1 και $S_k=(1,2,\dots,K)$ είναι η καλύτερη μερική ακολουθία των k εργασιών η οποία δημιουργήθηκε στις προηγούμενες k επαναλήψεις, και \bar{S}_k είναι το σετ των μη τοποθετημένων εργασιών στην ακολουθία .Αναζητούμε την ακολουθία S_{k+1} δηλαδή των k+1 εργασιών η οποία θα παρέχει τον ελάχιστο συνολικό χρόνο εκτέλεσης (minimum total completion time sequence) των k+1 εργασιών, διαλέγοντας την ακολουθία εκείνη από όλες τις ακολουθίες που μπορούν να δημιουργηθούν αν στην ακολουθία S_k εισάγουμε μια μη προγραμματισμένη εργασία $j \in \bar{S}_k$ σε όλες τις δυνατές θέσεις τις δηλαδή θα έχουμε να διαλέξουμε την καλύτερη ανάμεσα σε k διαφορετικές ακολουθίες στην επανάληψη .

Μια πιο αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου είναι:

Βήμα 1.

$S_1:=(1)$,

$U:=j \setminus \{1\}$, (αριστερά από την κάθετο η μη προγραμματισμένες εργασίες δεξιά αυτές που αφαιρέθηκαν)

$k:=1$

Βήμα 2.

Όσο $U \neq \emptyset$,κάνε :

2.1 Διάλεξε μια εργασία $j \in U$ όπου μπορεί να εισέλθει στην ακολουθία S_k και να προσφέρει την μικρότερη δυνατή αύξηση στη αντικειμενική συνάρτηση (κόστος ,χρόνο κτλ) .Ας είναι h η σχετική θέση εισαγωγής.

2.2 Εισήγαγε την εργασία j στην θέση h στην ακολουθία S_k και θεώρησε S_{k+1} την νέα ακολουθία .

2.3 Άφησε το U να είναι $U:=U \setminus \{j\}$, $k:=k+1$

Σε ότι αφορά την χρονική πολυπλοκότητα ,το βήμα 2.1 παρουσιάζει χρονική πολυπλοκότητα $O(n^3)$ για να διαλέξει μια μη προγραμματισμένη εργασία και να την τοποθετήσει στην κατάλληλη –ιδανικότερη θέση πρέπει να υπολογίσει το κόστος όλων

των ακολουθιών που δημιουργούνται εισάγοντας μια εργασία σε όλες τις δυνατές θέσεις. Για να υπολογίσουμε το κόστος (π.χ σύνολο καθυστερήσεων) για κάθε ακολουθία που δημιουργείται με τον τρόπο που περιγράψαμε έχουμε χρονική πολυπλοκότητα $O(n)$.Το βήμα 2.1 εκτελείται $N-1$ φορές , έτσι η χρονική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O(n^4)$.

Αναπτύσσουμε τον αλγόριθμο αυτόν στην γλώσσα προγραμματισμού C ++ για να μπορούμε να τον εκτελέσουμε και να ελέγξουμε τα αποτελέσματα του .

Αρχικά πρέπει να τονίσουμε κάποια βασικά σημεία του προβλήματος :

A) Ο αεροδιάδρομος χρησιμοποιείται μόνο από ένα αεροσκάφος την φορά όπως και η μηχανή από μια εργασία την φορά

B) Μεταξύ δύο διαδοχικών προσγειώσεων είναι απαραίτητο να διατηρείται το προβλεπόμενο ελάχιστο χρονικό διάστημα ασφαλείας που εξαρτάται από τους τύπους των αεροσκάφων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους (π.χ ταχύτητα προσγείωσης ,βάρος ,όγκος, κτλ)

Γ) Η καθυστέρηση σε μια πτήση υπολογίζεται από το πόσο απέχει ο πραγματικός χρόνος που δίνεται η άδεια προσγείωσης από τον προβλεπόμενο δηλαδή από την στιγμή που θα ανιχνευτεί από τα ραντάρ και θα του δοθεί ένας χρόνος άφιξης. Υποθέτουμε ότι από την στιγμή που θα δοθεί η άδεια προσγείωσης ακαριαία το αεροσκάφος προσγειώνεται.

Δ) Καθυστερήσεις που δεν οφείλονται στο αεροδρόμιο άφιξης π.χ βλάβη, καθυστερημένη αναχώρηση από τον αερολιμένα αναχώρησης, ξαφνικές καταιγίδες, δεν καταγράφονται στο αεροδρόμιο.

Ε) Πρέπει να ορίσουμε την αντικειμενική μας συνάρτηση όπου στο δικό μας πρόβλημα θα είναι είτε ο συνολικός χρόνος προσγείωσης όλων των αεροσκαφών που ορίζεται από το $Tlength = \max[talt(1), talt(2), \dots, talt(Nac)] - \min[talt(1), talt(2), \dots, talt(Nac)]$ είτε το συνολικό άθροισμα των καθυστερήσεων που ορίζεται ως

$$Sumdelays = \sum_{i=1}^{i=Nac} [ALT[i] - PLT[i]]$$
, όπου Nac το πλήθος των αεροσκαφών που εισάγουμε στο πρόβλημα.

Ζ) Η χωρητικότητα ενός απλού αεροδιαδρόμου αφίξεων που μπορεί να εξυπηρετήσει όλους τους τύπους εμπορικών αεροσκαφών κάνοντας βελτιστοποίηση σε κάθε ακολουθία είναι περίπου 40-42 αφίξεις/ώρα αλλά εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και τους τύπους των αεροσκαφών που προσεγγίζουν το αεροδρόμιο.

3.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ C.I.H

Τον αλγόριθμο C.I.H τον αναπτύσσουμε στην γλώσσα προγραμματισμού C ++ ,και παρακάτω θα αναλύσουμε το κάθε βήμα του ξεχωριστά καθώς και τα αποτελέσματα του για διάφορα σενάρια κυκλοφοριακής συμφόρησης .

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
```

```

void main (void)
{
clrscr();

clock_t start,end;
start=clock();

FILE *exit;
FILE *exit2;
FILE *generator;
FILE *fcfs;
FILE *exitypes;

fcfs=fopen("fcfs.xls","w+");
exitypes=fopen("types.xls","w+");
generator=fopen("plt.xls","w+");
exit=fopen("exit.xls","w+");
exit2=fopen("exit2.xls","w+");

int number,pop,start,dr,nn,insertpos,Nac,rr,d,c,a,b,T,ac,news,
n,r,jjjj,jjj,f,ff,fff,ffff,jj,next,j,i,iii,ii,z,zz,zzz,l,k,kk,ll,mm,
ALT[200],TALT,land,sert,
delay[200],test[200],
plt[200],
type[200],
FCFS[200],
sequence[200],
sequence1[200],

mlt[5][5]={ {0,0,0,0,0},
             {96,96,200,181,228},
             {72,72,80,70,110},
             {72,72,100,70,130},
             {72,72,80,70,90}};

long int sum,min,last,sumfcfs;

//Trange congestion at airport  with one runway
T=1400;
number=30;
randomize();

```

Στο πρώτο τμήμα του αλγορίθμου χρησιμοποιούμε τις εντολές π.χ **#include<stdio.h>** οι οποίες μας επιτρέπουν να χρησιμοποιούμε τις βιβλιοθήκες συναρτήσεων της **C++**, στην συνέχεια ορίζουμε την αρχή του αλγορίθμου μας και ορίζουμε τα αρχεία με τα οποία είτε παρέχουμε πληροφορίες στον αλγόριθμο είτε αποκομίζουμε πληροφορίες από αυτόν.

Εν συνεχεία ορίζουμε τις βασικές μεταβλητές που θα χρησιμοποιήσουμε για την εκτέλεση του αλγορίθμου για παράδειγμα **Nac=I**, είναι ο αριθμός του αεροσκάφους που επιλέγεται προς εύρεση βέλτιστης θέσης, και **newpos=ii** είναι η σχετική θέση δοκιμής. Έπειτα εισάγουμε τους πίνακες που αναφέρονται στο προτιμώμενο χρόνο προσγείωσης **PLT**, στο πραγματικό χρόνο προσγείωσης **ALT**, το πίνακα ελάχιστων χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών προσγειώσεων (ανάλογα με τους τύπους των αεροσκαφών) **MLT** τα οποία έχουν μονάδα το sec, την ακολουθία προσγείωσης

ενός σετ αεροσκαφών **SEQUENCE** επίσης ορίζουμε τον πίνακα με τις καθυστερήσεις που δημιουργούνται λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης **DELAY** κτλ . Εδώ είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον αλγόριθμο μόνο 4 τύποι εμπορικών αεροσκάφων οι οποίοι είναι και οι πιο συνηθισμένοι , αυτοί είναι το **Boeing 747** ,το **Boeing 727**, το **Boeing 707**, και το **Mc Donnell Douglas 9** .

Παρακάτω με τις μεταβλητές **T** και **number** όπου **T** είναι το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο κάνει την εμφάνιση του και το τελευταίο αεροσκάφος από το πλήθος αεροσκαφών **number** ορίζουμε την ένταση της κυκλοφοριακής συμφόρησης του αεροδρομίου υποθέτοντας ότι χρησιμοποιεί τουλάχιστον έναν αεροδιάδρομο για αφίξεις κάτι που είναι ρεαλιστικό για τα αεροδρόμια σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης .Η τελευταία εντολή randomize που εμφανίζεται ύστερα από όλες τις δηλώσεις των μεταβλητών ,αρχείων και πινάκων χρησιμοποιείται για την δημιουργία τυχαίων αριθμών σε κάποια σημεία του αλγορίθμου. Το επόμενο τμήμα του αλγορίθμου είναι το παρακάτω

```
for(nn=1; nn<=9; nn++)
{
    type[1]=int(rand()%4)+1;

    fprintf(exitypes,"%d\n",type[1]);

    for(iii=2; iii<=number ; iii++)
    {

        sequence[iii]=0;

        type[iii]=int(rand()%4)+1;

        fprintf(exitypes,"%d\n",type[iii]);

    }

    plt[1]=0;
    b=T-3;
    a=T+3;
    c=(T/number)*1.8;
    neo:
    for(i=2; i<=number; i++)
    {
        plt[i]=plt[i-1]+18+random(c);
    }
    if(plt[number]>=b && plt[number]<=a)
    {
        for(j=1; j<=number; j++)
        {
            fprintf(generator,"%d\n",plt[j]);
        }
    }
    if(plt[number]<b || plt[number]>a)
    {
        goto neo;
    }
}
```

Σε αυτό το σημείο ο αλγόριθμος δημιουργεί τα βασικά δεδομένα του προβλήματος ,έτσι έχοντας δώσει εμείς το αριθμό-σετ (number) των αεροσκαφών που θα προσεγγίσουν το αεροδρόμιο μέσα στο χρονικό διάστημα T ξεκινώντας από την χρονική στιγμή 0,ο αλγόριθμος δημιουργεί τυχαίους χρόνους άφιξης (προτιμώμενοι

χρόνοι άφιξης) δηλαδή δίνεται σε κάθε αεροσκάφος i ένα τυχαίο PLT $[i]$ για το οποίο ισχύει $PLT[i]=PLT[i-1] + \text{random}(c)$ που σημαίνει ότι είναι όσο το PLT του προηγούμενου αεροσκάφος που μπήκε στην τερματική περιοχή συν κάποιο τυχαίο χρόνο που πέρασε μέχρι να εισέλθει το επόμενο αεροσκάφος. Αυτό είναι ρεαλιστικό διότι το σύστημα εναερίας κυκλοφορίας δεν επιτρέπει να είναι στο ίδιο χρόνο και στον ίδιο χώρο δύο αεροσκάφη.

Παράλληλα με την δημιουργία των προτιμώμενων χρόνων άφιξης δίνεται τυχαία σε κάθε αεροσκάφος και ένας τύπος από τους 4 που χρησιμοποιούμε οι οποίοι είναι 1=B747,2=B727,3=B707,4=DC9 , αυτό γίνεται με την βοήθεια της εντολής $\text{type}[i]=\text{int}(\text{rand}()\%4)+1$ η οποία και δημιουργεί τυχαίους τύπους αεροσκαφών. Η πρώτη for μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα πλήθος από σετ συγκεκριμένου αριθμού αεροσκαφών τα οποία έρχονται σε χρόνο T αλλά τα $PLT[i]$ και οι τύποι των αεροσκαφών διαφέρουν ,παρακάτω παραθέτουμε ένα πίνακα στον οποίο φαίνονται δύο διαφορετικές ακολουθίες αλλά με κοινό T και number δηλαδή έχουμε number=40 αεροσκάφη που προσεγγίζουν το αεροδρόμιο μέσα σε χρονικό διάστημα 40 λεπτών δηλαδή $T=2400\text{sec}$ ή $T=40\text{min}$.

| sequence 1 | | | sequence 2 | | |
|---------------|------|----------|---------------|------|----------|
| Flight number | type | PLT(sec) | Flight number | type | PLT(sec) |
| 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| 2 | 1 | 58 | 2 | 1 | 53 |
| 3 | 2 | 85 | 3 | 3 | 115 |
| 4 | 2 | 106 | 4 | 2 | 167 |
| 5 | 1 | 140 | 5 | 3 | 216 |
| 6 | 4 | 199 | 6 | 3 | 280 |
| 7 | 4 | 262 | 7 | 4 | 403 |
| 8 | 1 | 314 | 8 | 4 | 465 |
| 9 | 3 | 414 | 9 | 4 | 490 |
| 10 | 2 | 488 | 10 | 4 | 553 |
| 11 | 4 | 540 | 11 | 1 | 571 |
| 12 | 3 | 604 | 12 | 3 | 696 |
| 13 | 1 | 652 | 13 | 2 | 763 |
| 14 | 3 | 672 | 14 | 1 | 818 |
| 15 | 4 | 743 | 15 | 2 | 863 |
| 16 | 1 | 801 | 16 | 1 | 887 |
| 17 | 4 | 898 | 17 | 3 | 940 |
| 18 | 4 | 928 | 18 | 3 | 1031 |
| 19 | 1 | 997 | 19 | 1 | 1052 |
| 20 | 2 | 1091 | 20 | 3 | 1157 |
| 21 | 2 | 1161 | 21 | 1 | 1181 |
| 22 | 4 | 1199 | 22 | 2 | 1265 |
| 23 | 1 | 1261 | 23 | 4 | 1315 |
| 24 | 4 | 1354 | 24 | 3 | 1348 |
| 25 | 2 | 1396 | 25 | 2 | 1434 |
| 26 | 4 | 1464 | 26 | 1 | 1490 |
| 27 | 3 | 1525 | 27 | 4 | 1551 |
| 28 | 3 | 1559 | 28 | 4 | 1606 |
| 29 | 2 | 1585 | 29 | 2 | 1637 |
| 30 | 3 | 1609 | 30 | 4 | 1699 |
| 31 | 4 | 1675 | 31 | 4 | 1736 |
| 32 | 3 | 1776 | 32 | 3 | 1798 |
| 33 | 4 | 1889 | 33 | 4 | 1871 |
| 34 | 2 | 1948 | 34 | 3 | 1976 |
| 35 | 3 | 2028 | 35 | 3 | 2042 |
| 36 | 1 | 2104 | 36 | 2 | 2166 |
| 37 | 1 | 2206 | 37 | 1 | 2198 |
| 38 | 3 | 2320 | 38 | 4 | 2255 |

| | | | | | |
|-----------|---|------|-----------|---|------|
| 39 | 3 | 2364 | 39 | 3 | 2326 |
| 40 | 1 | 2398 | 40 | 1 | 2398 |

Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε δύο τυχαίες ακολουθίες 40 αεροσκάφων με χρονικό διάστημα άφιξης 40 λεπτών ,παρατηρούμε όμως ότι τα PLT και οι τύποι των αεροσκαφών διαφέρουν από ακολουθία σε ακολουθία με αυτόν τρόπο μπορούμε να γεννήσουμε ένα πεπερασμένο αριθμό διαφορετικών ακολουθιών για να προσομοιώσουμε το σύστημα αεροδρόμιο - ροή αφίξεων.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι για την ίδια ακολουθία αεροσκαφών (πχ την αριστερή) εάν δώσουμε διαφορετικά σερ PLT[i] ή βέλτιστη ακολουθία που βρίσκεται κάθε φορά δεν είναι η ίδια και αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο ο αλγόριθμος αλλάζει τις θέσεις των αεροσκαφών όπου και θα περιγράψουμε παρακάτω δίνοντας το παρακάτω τμήμα του αλγορίθμου :

```
ALT[1]=0;
sequence[1]=1;
sequence[2]=2;
sequence1[1]=1;
sequence1[2]=2;
plt[sequence[1]]=0;
ALT[sequence[1]]=plt[sequence[1]];
FCFS[1]=ALT[1];
ALT[2]=ALT[sequence[1]]+mtl[type[sequence[1]]][type[sequence[2]]];
min=3000;
sert=2;
land=2;
sum=0;
zz=2;
```

Σε αυτό το σημείο θέτουμε στο πρόγραμμα μας τις αρχικές συνθήκες όπου κάθε αεροσκάφος που εισέρχεται στο πρόβλημα λαμβάνει και έναν κωδικό αριθμό από το 1 έως number ο οποίος αντιστοιχεί στην αρχική θέση του στην ακολουθία. Έτσι ξεκινώντας από τον χρόνο 0 στο πρώτο αεροσκάφος που βρίσκεται στο περιβάλλοντα χώρο του αεροδρομίου δίνουμε την εντολή να προσγειωθεί δίχως καμία κράτηση και κατ' επέκταση δίχως καμία καθυστέρηση και για αυτό θέτουμε ALT[1]=0 στην συνέχεια θέτουμε στην 2^η θέση της ακολουθίας το δεύτερο αεροπλάνο όπως έρχεται δηλαδή με την πολιτική FCFS, αυτό δηλώνεται στο πρόγραμμα μας με τις εντολές sequence[1]=1 ,sequence[2]=2 όπου sequence[i] δείχνει πιο αεροσκάφος βρίσκεται στην i-οστη θέση της ακολουθίας .

Όσον αφορά το δεύτερο αεροσκάφος δίνεται σε αυτό ένας τυπικός χρόνος προσγείωσης ALT[2]=ALT[sequence[1]]+m.l.t[type[sequence[1]]][type[sequence[2]]] δηλαδή σε χρόνο mtl[type[sequence[1]]][type[sequence[2]]] από τον χρόνο προσγείωσης του 1^{ου} αεροσκάφους όπου αντιστοιχεί στο ελάχιστο χρονικό διάστημα μεταξύ αφίξεων αυτών των δύο αεροσκαφών που όπως έχουμε εξηγήσει εξαρτάται από τους τύπους των δύο διαδοχικών αεροσκαφών (type[1],type[2]), αυτό συμβαίνει και για τα υπόλοιπα αεροπλάνα που θα μουν στην ακολουθία. Όμως μέχρι να τελειώσει η εύρεση της καλύτερης ακολουθίας μόνο για το πρώτο αεροπλάνο είναι βέβαιο ότι η θέση του στην τελική ακολουθία θα είναι ίδια με την αρχική διότι στην συνέχεια οι υπόλοιπες πτήσεις θα μουν στην διαδικασία αναζήτησης της καλύτερης θέσης και έτσι το αεροπλάνο 2 μπορεί να βρεθεί σε οποιαδήποτε θέση της ακολουθίας. Ο λόγος που δίνουμε στο δεύτερο αεροσκάφος αυτόν το χρόνο προσγείωσης είναι για να μπορεί το 3 αεροσκάφος να δοκιμαστεί σε 2 τουλάχιστον θέσεις της ακολουθίας την 2 και 3 , το οποίο για να συμβεί πρέπει να είναι γνωστά τα ALT[i] μιας και η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης έχει ως εξής :

$$\text{Min [Tdelay]} = \sum_{i=1}^{i=\text{number}} [\text{ALT}[i] - \text{PLT}[i]]$$

Με το επόμενο τμήμα του αλγορίθμου ξεκινάμε την αναλυτικότερη περιγραφή του τρόπου με τον οποίο βρίσκεται η 'βέλτιστη' ακολουθία.

1^η επαναληπτική διαδικασία

```
for(i=3; i<=number; i++)   π□□□□□π□□□□ (□□□□□□□□) π□□□□□
□□□□□□□□□□
{
```

```
    land=land+1;
    Nac=i;
    sum=0;
    start=2;
```

```
for(df=1;df<=100; df++)  Περιορισμός μετακίνησης θέσης
{
    if(land>df*cps)
    {
        zz=df*cps+1;
    }
}
```

Σε αυτό το σημείο του αλγορίθμου τα αεροσκάφη που δεν έχουν τοποθετηθεί στην ακολουθία μπαίνουν στην διαδικασία για αναζήτηση της καλύτερης θέσης. Εφόσον τα δύο πρώτα αεροσκάφη έχουν τοποθετηθεί στην ακολουθία προσγείωσης ο αλγόριθμος ξεκινά να δοκιμάζει τα επόμενα αεροσκάφη με την σειρά που έχουν έρθει (FCFS) δηλαδή για $i=3$ έως $i=\text{number}$ σε όλες τις δυνατές θέσεις της ακολουθίας που έχουν δημιουργηθεί έως εκείνη την φάση αυξάνοντας κατά μία τις θέσεις αναζήτησης λόγω εισαγωγής νέου αεροσκάφους στην ακολουθία. Έτσι στην αρχή κάθε επανάληψης αυξάνουμε την μεταβλητή land κατά μία μονάδα ($\text{land}=\text{land}+1$), η μεταβλητή αυτή μας δείχνει το πλήθος των αεροσκαφών που θα έχουμε τοποθετήσει σε σειρά προσγείωσης στο τέλος της επανάληψης i . Για παράδειγμα όταν έχουν τοποθετηθεί τα δύο πρώτα αεροσκάφη στην ακολουθία προσγείωσης το 3^ο αεροσκάφος $\text{Nac}=3$ θα δοκιμαστεί στην 2^η θέση και στην 3^η θέση (που δημιουργείται λόγω εισαγωγής νέου αεροσκάφους), στην συνέχεια αφού βρεθεί (με την παρακάτω for) η καλύτερη από αυτές τις δύο θέσεις τοποθετείται στην ακολουθία. Η μεταβλητή $\text{Nac}=i$ μας δείχνει ποίο αεροσκάφος έχει επιλεγεί για να δοκιμαστεί σε όλες τις δυνατές θέσεις της ακολουθίας καθώς και σε ποια επανάληψη βρισκόμαστε. Τα επιλεγμένα αεροσκάφη θα δοκιμάζονται από την θέση $\text{start}=2$ έως την θέση $\text{land}=i$ της ακολουθίας και αυτό διότι θεωρούμε την πρώτη θέση της ακολουθίας ως σταθερή για την έναρξη της αναζήτησης έτσι το κάθε αεροσκάφος i θα δοκιμάζεται σε $i-1$ θέσεις. Ο **περιορισμός μετακίνησης θέσης** θα εξηγηθεί σε άλλο σημείο της εργασίας, προς το παρόν τα αεροσκάφη μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε στην ακολουθία.

Στο παρακάτω παράδειγμα βλέπουμε την δοκιμή του 3^{ου} αεροσκάφους στις θέσεις 2 και 3 της ακολουθίας και το αποτέλεσμα που έχουμε (βλέπε **sum**) στο άθροισμα των καθυστερήσεων, καλύτερη θέση σε αυτήν την ακολουθία για το 3^ο αεροσκάφος είναι η 2^η γιατί προκαλεί τις μικρότερες δυνατές συνολικές καθυστερήσεις.

| ac .number | PLT sec |
|------------|---------|
| 1 | 0 |
| 2 | 34 |
| 3 | 123 |

Προτιμώμενοι χρόνοι άφιξης

| sequence position | ac.number | ALT sec | delay sec | ac.number | ALT sec | delay sec |
|-------------------|-------------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|
| 1 | 1,type[1]=1 | 0 | 0 | 1 type 1 | 0 | 0 |
| 2 | 3,type[3]=2 | 200 | 77 | 2 type 3 | 181 | 147 |
| 3 | 2,type[2]=3 | 270 | 236 | 3 type 2 | 253 | 247 |
| | sum | | 313 | sum | | 394 |

Δοκιμή του 3^{ου} αεροσκάφους στις θέσεις 2 και 3

2^η επαναληπτική διαδικασία

```
for(ii=start; ii<=land; ii++) □□π□□□□□□□ □□π□□□□□□□□ □□□ i
□□□□□□□□□□ □□ □□□□ □□□□□□ □□□□
```

```
{
sum=0;
insertpos=ii;
l=type[sequence[ii-1]];
dr=type[Nac];
```

```
TALT=ALT[sequence[ii-1]]+mlt[l][dr]-plt[Nac];
```

Σε αυτό το τμήμα ξεκινά η αναζήτηση της θέσης από ii=2 έως ii<=land για το αεροσκάφος Nac=i που έχει επιλεγθεί από την παραπάνω επανάληψη for, με την μεταβλητή insertpos=ii γνωρίζουμε την θέση που θα δοκιμαστεί το αεροσκάφος Nac=i. Στην μεταβλητή l καταχωρούμε τον τύπο του αεροσκάφους που βρίσκεται στην αμέσως προηγούμενη θέση insertpos-1, ύστερα στην μεταβλητή dr τοποθετούμε τον τύπο του αεροσκάφους που θα τοποθετηθεί στην ακολουθία. Αυτές οι μεταβλητές θα μας βοηθήσουν να υπολογίσουμε την καθυστέρηση TALT που θα έχει το αεροσκάφος εάν τοποθετηθεί στην θέση insertpos. Παρακάτω υπολογίζεται το άθροισμα των καθυστερήσεων για τον αριθμό των αεροσκαφών που έχουν τοποθετηθεί στην ακολουθία έως τώρα συν το αεροσκάφος Nac=i που δοκιμάζεται στην θέση ii. δηλαδή υπολογίζεται το εξής
$$\sum_{i=1}^{i=land} [ALT[i] - PLT[i]].$$

Για να γίνει αυτό πρέπει να δημιουργηθεί η ακολουθία που θα περιέχει το νέο αεροσκάφος στην θέση insertpos=ii. Εδώ πρέπει να εξηγήσουμε ότι το αεροσκάφος αρχικά θα δοκιμαστεί σε θέσεις μικρότερες της land όποτε χρειάζεται ένα case που θα δημιουργεί την ακολουθία ενημερώνοντας όλα τα ALT[i] και Delay[i] των επομένων αεροσκαφών της ακολουθίας αφού αυτά θα αλλάζουν (domino effect). Επίσης

χρειάζεται και ένα case για την περίπτωση που το αεροσκάφος δοκιμάζεται στην τελευταία θέση της ακολουθίας σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται να ενημερωθούν τα ALT[i], DELAY[i] στα προηγούμενα αεροσκάφη αλλά μόνο στο αεροσκάφος που εισέρχεται. Αυτό συμβαίνει διότι δεν θα επηρεάσει καθόλου την τελευταία βέλτιστη ακολουθία η οποία υπολογίστηκε στην επανάληψη i-1.

Τα case που περιγράψαμε παραπάνω θα διαμορφωθούν ανάλογα με την τιμή του TALT το οποίο μας δίνει την καθυστέρηση του αεροσκάφους στην θέση που δοκιμάζεται, εάν είναι $TALT = Delay[i] < 0$ διότι $ALT < PLT$ (το οποίο συμβαίνει όταν ένα αεροσκάφος δοκιμάζεται σε πολύ μικρότερες θέσεις από αυτές που βρισκόταν αρχικά π.χ το 2^ο αεροσκάφος δοκιμάζεται στην 2^η θέση) τότε επειδή αυτό είναι αδύνατο θέτουμε ως χρόνο προσγείωσης το $ALT[i] = PLT[i]$ με $delay[i] = 0$. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα υποχρεώσουμε το αεροσκάφος να πετάξει με μεγαλύτερη ταχύτητα (είναι ασύμφορο λόγω κατανάλωσης καυσίμων) αλλά θα προσγειωθεί στον προτιμώμενο χρόνο άφιξης.

Αυτό όμως δημιουργεί μεγάλο κενό τουλάχιστον μεγαλύτερο από το υποχρεωτικό $mlt[l][dr]$ που επιβάλλουν οι κανονισμοί επιβαρύνοντας ανώφελα και τα επόμενα αεροσκάφη που υπάρχουν στην ακολουθία (**domino effect**) ειδικά σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης ,επομένως ο αλγόριθμος δεν θα επιλέξει εκείνη την θέση για το αεροσκάφος ως καλύτερη, διότι η δομή του αλγόριθμου κοιτά το συνολικό άθροισμα όλων των καθυστερήσεων και όχι του αεροσκάφους που εισέρχεται.

Περιλαμβάνουμε όμως αυτήν την περίπτωση διότι όταν τα plt απέχουν πολύ μεταξύ τους στην αρχική ακολουθία το οποίο συμβαίνει όταν δεν υπάρχουν πολλές πτήσεις /ώρα πρέπει να τοποθετούνται στην ακολουθία με καθυστέρηση θετική ή μηδέν. Ας σκεφτούμε την περίπτωση 20 αφίξεις /ώρα όπου εκεί ουσιαστικά ο πραγματικός χρόνος προσγείωσης είναι ίσος με το προτιμώμενο διότι αφού δεν υπάρχει συμφόρηση δεν θα αναγκαστούμε να επιβάλλουμε και τους ελάχιστους χρόνους μεταξύ διαδοχικών αφίξεων αφού αυτές και οι προτιμώμενοι χρόνοι άφιξης τους θα απέχουν περισσότερο από τον παράγοντα $mlt[l][dr]$ δηλαδή $PLT[i] - PLT[i-1] >>> mlt[l][dr]$. Έτσι δίνουμε την δυνατότητα στον αλγόριθμο να περιλαμβάνει και τα σενάρια που δεν ανήκουν σε κυκλοφοριακή συμφόρηση. Έτσι σε κάθε περίπτωση θα αναλάβει το υπολογισμό των καθυστερήσεων ένα και μόνο case από τα 4 παρακάτω τα οποία ενεργοποιούνται αφού η συνθήκη μέσα στις παρενθέσεις της if επιβεβαιωθεί..

Περίπτωση 1:

```
if(TALT<0 && insertpos<land)
{
```

```
for(j=land; j>insertpos; j--)
{
sequence[j]=sequence[j-1];
}
sequence[insertpos]=Nac;
```

```
for(jj=2; jj<=land; jj++)
{
l=type[sequence[jj-1]];
```

```
k=type[sequence[jj]];
```

```
ALT[sequence[jj]]=ALT[sequence[jj-1]]+mlt[l][k];
delay[sequence[jj]]=ALT[sequence[jj]]-plt[sequence[jj]];
if(delay[sequence[jj]]<0)
```

```

{
ALT[sequence[jj]]=plt[sequence[jj]];
delay[sequence[jj]]=0;
}
sum=sum+delay[sequence[jj]];
}

}

```

Περίπτωση 2:

```

if(TALT<0 && insertpos==land)
{

sequence[land]=Nac;

for(ffff=2; ffff<=land; ffff++)
{
l=type[sequence[ffff-1]];

k=type[sequence[ffff]];

ALT[sequence[ffff]]=ALT[sequence[ffff-1]]+mlt[l][k];

delay[sequence[ffff]]=ALT[sequence[ffff]]-plt[sequence[ffff]];
if(delay[sequence[ffff]]<0)
{
ALT[sequence[ffff]]=plt[sequence[ffff]];
delay[sequence[ffff]]=0;
}

sum=sum+delay[sequence[ffff]];

}

}

```

Περίπτωση 3:

```

if(TALT>=0 && insertpos<land) {

for(j=land; j>insertpos; j--)
{
sequence[j]=sequence[j-1];
}
sequence[insertpos]=Nac;

for(jj=2; jj<=land; jj++)
{
l=type[sequence[jj-1]];

k=type[sequence[jj]];

```

```

ALT[sequence[jj]]=ALT[sequence[jj-1]]+mlt[l][k];
delay[sequence[jj]]=ALT[sequence[jj]]-plt[sequence[jj]];
if(delay[sequence[jj]]<0)
{
    ALT[sequence[jj]]=plt[sequence[jj]];
    delay[sequence[jj]]=0;
}
sum=sum+delay[sequence[jj]];
}
}

```

Περίπτωση 4:

```

if(TALT>=0 && insertpos==land)
{

sequence[land]=Nac;

for(ffff=2; ffff<=land; ffff++)
{
l=type[sequence[ffff-1]];

k=type[sequence[ffff]];

ALT[sequence[ffff]]=ALT[sequence[ffff-1]]+mlt[l][k];

delay[sequence[ffff]]=ALT[sequence[ffff]]-plt[sequence[ffff]];

if(delay[sequence[ffff]]<0)
{
    ALT[sequence[ffff]]=plt[sequence[ffff]];
    delay[sequence[ffff]]=0;
}
sum=sum+delay[sequence[ffff]];

}

}

```

Τέλος περιπτώσεων

Σε αυτό το σημείο ένα από τα cases έχει ενεργοποιηθεί και μέσα σε αυτό έχει δημιουργηθεί η ακολουθία που περιέχει το αεροσκάφος $Nac=i$ στην θέση $insertpos=ii$, επίσης έχουν ενημερωθεί όλα τα $ALT[i]$, $Delay[i]$ και έχει υπολογιστεί το συνολικό άθροισμα των καθυστερήσεων $\sum_{i=1}^{i=land} [ALT[i] - PLT[i]]$ το οποίο καταχωρείται στην μεταβλητή sum . Στο παρακάτω τμήμα του αλγορίθμου το αεροσκάφος αφαιρείται από την ακολουθία επαναφέροντας την στην αρχική κατάσταση δηλαδή πριν τοποθετηθεί το αεροσκάφος $Nac=i$, η ακολουθία αυτή αντιστοιχεί στην τελευταία βελτιστοποιημένη ακολουθία για τα πρώτα $land-1$ αεροσκάφη που τοποθετήθηκαν στις προηγούμενες

επαναλήψεις της 1^{ης} επαναληπτικής διαδικασίας. Αυτή η επαναφορά πρέπει να γίνει διότι όπως περιγράψαμε και στην συνοπτική περιγραφή του αλγορίθμου C.I.H το κάθε αεροσκάφος (εργασία) θα δοκιμαστεί σε κάθε δυνατή θέση δημιουργώντας τόσες διαφορετικές ακολουθίες όσες είναι και οι θέσεις που θα δοκιμαστεί .

Σε κάθε μια από τις διαφορετικές ακολουθίες πρέπει να υπολογίζεται το συνολικό άθροισμα των καθυστερήσεων και τελικά να επιλεγεί η καλύτερη. Παρακάτω βλέπουμε τις περιπτώσεις 1,2 (cases 1,2) που επαναφέρουν την ακολουθία και ενημερώνουν τα ALT[i], Delay[i], sequence[i] όπως ήταν στην προηγούμενη επανάληψη της επαναληπτικής διαδικασίας 1 . Ανάλογα με το που τοποθετήθηκε το αεροσκάφος για να δοκιμαστεί δηλαδή insertpos<land ή insertpos=land ενεργοποιείται και η ανάλογη περίπτωση για την επαναφορά.

Επαναφορά τύπου 1

```
if(insertpos<land)
{

for(jjj=insertpos; jjj<=land; jjj++)
{
sequence[jjj]=sequence[jjj+1];
}

for(jjj=2; jjj<land; jjj++)
{
l=type[sequence[jjj-1]];
k=type[sequence[jjj]] ;
ALT[sequence[jjj]]=ALT[sequence[jjj-1]]+mlt[l][k];
}

}
```

Επαναφορά τύπου 2

```
if(insertpos==land)
{
sequence[insertpos]=0;
ALT[sequence[insertpos]]=0;
for(jjj=2; jjj<land; jjj++)
{
l=type[sequence[jjj-1]];
k=type[sequence[jjj]] ;
ALT[sequence[jjj]]=ALT[sequence[jjj-1]]+mlt[l][k];
}

}
```

Το αεροσκάφος Nac=i διατρέχει τις θέσεις της ακολουθίας, σε κάθε θέση που τοποθετείται υπολογίζεται το σύνολο των καθυστερήσεων όπως περιγράψαμε παραπάνω και καταχωρείται στην μεταβλητή **sum**. Σε κάθε θέση το αποτέλεσμα **sum** συγκρίνεται με το ελάχιστο σύνολο καθυστερήσεων **min** που έχει εμφανιστεί έως τώρα στην 2^η επαναληπτική διαδικασία για το αεροσκάφος Nac=i. Εάν το sum είναι μικρότερο ή ίσο τότε η θέση αυτή θεωρείται η **νέα** καλύτερη για το αεροσκάφος Nac=i οπότε και θέτεται ως νέο ελάχιστο το σύνολο των καθυστερήσεων (sum) της

θέσης ii. Δηλαδή θέτουμε $\min = \text{sum}$ και αποθηκεύεται η νέα καλύτερη θέση στην μεταβλητή $\text{news} = \text{ii}$.

Έτσι μέχρι να 'εισέλθει' η επόμενη καλύτερη θέση λόγο μικρότερου ή ίσου αθροίσματος καθυστερήσεων η παρακάτω συνθήκη "κρατάει" την τελευταία καλύτερη.

Εδώ είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι όταν πρόκειται να τοποθετηθεί το αεροσκάφος $\text{Nac} = i$ ήδη θα έχουν τοποθετηθεί τα προηγούμενα $i-1$ αεροσκάφη, έτσι το αεροσκάφος $\text{Nac} = i$ θα θέλαμε να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχική του θέση, έτσι το ίσον στην σύγκριση παίζει τον ρόλο του ρυθμιστή, δίνοντας το περιθώριο δηλαδή στο αεροσκάφος να «κυλίσσει» από τις αρχικές προς τις τελικές θέσεις που υπάρχουν (ως εκείνη την επανάληψη της 1^{ης} επαναληπτικής διαδικασίας) στην ακολουθία.

```
if(n==1)
{
if(sum<=min )
{

ac=Nac;
newspos=ii;
min=sum;

}

}
}
```

} Τέλος δεύτερης επαναληπτικής διαδικασίας

Σε αυτό το σημείο του προγράμματος έχει τελειώσει η 2^η επαναληπτική διαδικασία, έτσι το αεροσκάφος $\text{Nac} = i$ έχει δοκιμαστεί σε όλες τις δυνατές θέσεις της ακολουθίας και έχει βρεθεί η καλύτερη η οποία προσφέρει την ελάχιστη δυνατή αύξηση στην αντικειμενική συνάρτηση. Όπως περιγράψαμε παραπάνω κάθε φορά που το αεροσκάφος δοκιμάζεται σε μια θέση στην 2^η επαναληπτική διαδικασία η ακολουθία επαναφέρεται στην τελευταία της «βέλτιστη» κατάσταση δηλαδή δίχως το αεροσκάφος $\text{Nac} = i$ για να δοκιμαστεί και στις επόμενες δυνατές θέσεις, επομένως αφού σε αυτό το σημείο γνωρίζουμε την καλύτερη θέση το τοποθετούμε στην ακολουθία και έτσι έχουμε την **νέα βέλτιστη ακολουθία** με την παρακάτω διαδικασία. Με αυτή την διαδικασία ενημερώνονται όλα τα $\text{ALT}[i]$, και υπολογίζονται οι καθυστερήσεις $\text{DELAY}[i]$ όλων των αεροσκάφων που υπάρχουν στην ακολουθία.

Στην περίπτωση που το αεροσκάφος τοποθετείται στο τέλος της (τελευταίας βέλτιστης) ακολουθίας ($\text{newspos} = \text{land}$) είναι αναγκαίο να υπολογίσουμε μόνο το $\text{ALT}[i]$, $\text{Delay}[i]$ του τελευταίου αεροσκάφους αφού τα προηγούμενα δεν επηρεάζονται διότι παραμένουν στην θέση τους. Έτσι έχουμε τις δύο παρακάτω περιπτώσεις :

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1

```
if(newspos==land)
{
sequence[land]=ac;
for(f=2; f<land; f++)
{
```

```

sequence1[f]=sequence[f];
l=type[sequence1[f-1]];
k=type[sequence1[f]];
ALT[sequence[f]]=ALT[sequence[f-1]]+mlt[l][k];
delay[sequence[f]]=ALT[sequence[f]]-plt[sequence[f]];
if(delay[sequence[f]]<0)
{
delay[sequence[f]]=0;
ALT[sequence[f]]=plt[sequence[f]];

}
}
sequence1[land]=ac;

ALT[sequence[land]]=ALT[sequence[land-1]]+mlt[type[sequence[land-1]]][type[sequence[land]]];
delay[sequence[land]]=ALT[sequence[land]]-plt[sequence[land]];
if(delay[sequence[land]]<0)
{
ALT[sequence[land]]=plt[sequence[land]];
delay[sequence[land]]=0;

}
}

```

Στην περίπτωση που το νέο αεροσκάφος τοποθετείται ανάμεσα σε δύο αεροσκάφη δηλαδή $newpos < land$ τότε πρέπει αρχικά να ενημερώσουμε την ακολουθία διότι κάποια θα αλλάξουν θέση από αυτήν που είχαν στην τελευταία καλύτερη ακολουθία. Αρχίζοντας από την $newpos = ii$ και μεταφέροντας κάθε αεροσκάφος κατά μία θέση πάνω ώστε να μείνει κενή η θέση ii ενημερώνουμε τα $ALT[i]$ όλων αεροσκαφών και υπολογίζουμε τις καθυστερήσεις $Delay[i]$, όλα τα παραπάνω τα υλοποιούμε με την παρακάτω διαδικασία:

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2

```

if(newpos<land)
{
for(ff=land; ff>pos; ff--)
{
sequence[ff]=sequence[ff-1];

sequence1[ff]=sequence[ff];
}

sequence[newpos]=ac;;

sequence1[newpos]=sequence[news];

for(pop=2; pop<=land; pop++)
{

```

```

l=type[sequence1[pop-1]];

k=type[sequence1[pop]];

ALT[sequence[pop]]=ALT[sequence[pop-1]]+mlt[l][k];

delay[sequence[pop]]=ALT[sequence[pop]]-plt[sequence[pop]];

if(delay[sequence[pop]]<0)

{

ALT[sequence[pop]]=plt[sequence[pop]];

delay[sequence[pop]]=0;

}

}

}

last=min;

min=min+1000000;

sum=0;

test[ac]=1000;

```

Σε αυτό το σημείο έχουμε την βελτιστοποιημένη ακολουθία για τα πρώτα land (πλήθος) αεροσκάφη τα οποία έχουν μετακινηθεί από τις αρχικές τους θέσεις και βρίσκονται στις καλύτερες δυνατές. Τώρα εάν $N_{ac} < number$ με βάση την νέα καλύτερη ακολουθία ο αλγόριθμος θα επιστρέψει στην επαναληπτική διαδικασία 1 για να τοποθετήσει και τα υπόλοιπα αεροσκάφη στην ακολουθία με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

} Τέλος 1^{ης} επαναληπτικής διαδικασίας

Σε αυτό το σημείο έχουν εκτελεστεί οι N-1 επαναλήψεις και επομένως έχει ολοκληρωθεί η λύση του προβλήματος. Εννοώντας ότι για κάθε αεροσκάφος έχει υπολογιστεί η χρονική στιγμή άδειας προσγείωσης του, η καθυστέρηση του, ο αριθμός των θέσεων που μετακινήθηκε από την αρχική του κτλ.

Στις παρακάτω παραγράφους συγκρίνουμε την πολιτική FCFS η οποία χρησιμοποιείται από πολλά αεροδρόμια με την πολιτική του αλγορίθμου CIH η οποία αλλαγές θέσης των αεροσκαφών σε σχέση με την αρχική ακολουθία.

3.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ C.I.H ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΟΛΙΤΙΚΗ FCFS ΓΙΑ ΚΟΙΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Υποθέτοντας ότι ένας απλός αεροδιάδρομος έχει μέγιστη χωρητικότητα αφίξεων **35-42 αφίξεις/ώρα** κατά μέσο όρο, επίσης υποθέτουμε ότι το αεροδρόμιο

είναι αρκετά μεγάλο ώστε να έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης τουλάχιστον έναν αεροδιάδρομο αποκλειστικά για αφίξεις. Παρακάτω θα δούμε παραδείγματα κυκλοφοριακής συμφόρησης, τις λύσεις και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου καθώς και θα συγκρίνουμε την πολιτική **PS (positioning shifting)** του αλγορίθμου C.I.H με την πολιτική FCFS.

Το παρακάτω σενάριο θεωρείται πολύ έντονο και εμφανίζεται σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης σε μεγάλα αεροδρόμια :

Αριθμός αεροσκαφών :30

Τύποι αεροσκαφών :B747,B727,B707,DC9

Μέγιστη μέση χωρητικότητα αεροδιαδρόμου :40-42 αεροσκάφη /ώρα ή άφιξη ανα 90 sec το ελάχιστο δυνατό

Χρονικό διάστημα αφίξεων:25 min ή 1500sec

Προτιμώμενοι χρόνοι άφιξης :Τυχαίοι όπως και στην πραγματικότητα

Στόχος :Ελαχιστοποίηση καθυστερήσεων κατά μέσο όρο

Τα 30 αεροσκάφη προσεγγίζουν το αεροδρόμιο μέσα σε χρονικό διάστημα 25 λεπτών ,αυτό σημαίνει ότι το τελευταίο αεροσκάφος θα εμφανιστεί στο αεροδρόμιο σε 25 λεπτά από την στιγμή που θα έχει φτάσει το πρώτο αεροσκάφος. Αυτό που μας ενδιαφέρει ακόμα περισσότερο είναι το χρονικό διάστημα $Plt[i]-Plt[i-1]$ πόσο απέχει δηλαδή χρονικά η εμφάνιση των διαδοχικών αεροσκαφών στον περιβάλλοντα χώρο του αεροδρομίου TMA (terminal area).

Παραπάνω εξηγήσαμε ότι οι πληροφορίες όπως οι προτιμώμενοι χρόνοι άφιξης ,ταχύτητα πτήσης κτλ δίνονται από τα ραντάρ αρκετή ώρα πριν την πραγματική άφιξης τους στον αερολιμένα όποτε υπάρχει αρκετός χρόνος για το προγραμματισμό αφίξεων. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα 30 αεροσκάφη, τον τύπο τους, τους προτιμώμενους χρόνους άφιξης, και την θέση τους στην αρχική ακολουθία. Έτσι με την σειρά που εμφανίζονται τα αεροσκάφη στα ραντάρ τους δίνεται και ο ανάλογος αριθμός επομένως ο αριθμός αεροσκαφους δείχνει και την σειρά τους ή καλύτερα την αρχική θέση τους στην ακολουθία .

| Θέση στην ακολουθία | Αριθμός αεροσκάφους | Τύπος αεροσκάφους | Προτιμώμενοι χρόνοι άφιξης (Sec) | Χρόνοι μεταξύ εμφανίσεων στο ραντάρ(sec) |
|---------------------|---------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| 1 ^η | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2 ^η | 2 | 3 | 22 | 22 |
| 3 ^η | 3 | 4 | 81 | 59 |
| 4 ^η | 4 | 2 | 110 | 29 |
| 5 ^η | 5 | 3 | 154 | 44 |
| 6 ^η | 6 | 1 | 219 | 65 |
| 7 ^η | 7 | 1 | 306 | 87 |
| 8 ^η | 8 | 4 | 374 | 68 |
| 9 ^η | 9 | 3 | 458 | 84 |
| 10 ^η | 10 | 2 | 478 | 20 |
| 11 ^η | 11 | 2 | 563 | 85 |
| 12 ^η | 12 | 4 | 646 | 83 |
| 13 ^η | 13 | 1 | 669 | 23 |
| 14 ^η | 14 | 3 | 754 | 85 |
| 15 ^η | 15 | 3 | 834 | 80 |
| 16 ^η | 16 | 1 | 874 | 40 |

| | | | | |
|-----|----|---|---------------------|---------------|
| 17η | 17 | 1 | 896 | 22 |
| 18η | 18 | 4 | 928 | 32 |
| 19η | 19 | 3 | 976 | 48 |
| 20η | 20 | 3 | 1056 | 80 |
| 21η | 21 | 3 | 1086 | 30 |
| 22η | 22 | 1 | 1107 | 21 |
| 23η | 23 | 1 | 1129 | 22 |
| 24η | 24 | 3 | 1192 | 63 |
| 25η | 25 | 1 | 1281 | 89 |
| 26η | 26 | 1 | 1322 | 41 |
| 27η | 27 | 2 | 1383 | 61 |
| 28η | 28 | 2 | 1400 | 17 |
| 29η | 29 | 3 | 1426 | 26 |
| 30η | 30 | 3 | 1497 | 71 |
| | | | Μέσος όρος : | 52 sec |

Βλέπουμε ότι ο μέσος χρόνος μεταξύ αφίξεων στο ραντάρ είναι αρκετά μικρός κάτι που μας δείχνει την ένταση της κυκλοφοριακής συμφόρησης που επιβάλλει αυτό το σενάριο και τις καθυστερήσεις που θα υπάρξουν μιας το αεροδρόμιο μπορεί να εξυπηρετήσει αφίξεις ανά 106.3 sec κατά μέσο όρο και όχι ανά 52 sec που είναι η απαίτηση της κυκλοφοριακής ροής σε αυτή την περίπτωση.

Στην συνέχεια στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το χρονικό διάστημα που θα διαρκέσει η προσγείωση των 30 αεροσκαφών εφαρμόζοντας την πολιτική FCFS ,επίσης φαίνονται οι πραγματικοί χρόνοι προσγείωσης διατηρώντας τους χρόνους ασφαλείας μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων καθώς και οι καθυστερήσεις των πτήσεων

| Θέση ακολουθίας | Αριθμός αεροσκάφους | Τύπος αεροσκάφους | Πραγματικός χρόνος άφιξης | Χρόνος καθυστέρησης |
|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|
| 1η | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2η | 2 | 3 | 181 | 159 |
| 3η | 3 | 4 | 311 | 230 |
| 4η | 4 | 2 | 391 | 281 |
| 5η | 5 | 3 | 461 | 307 |
| 6η | 6 | 1 | 533 | 314 |
| 7η | 7 | 1 | 629 | 323 |
| 8η | 8 | 4 | 857 | 483 |
| 9η | 9 | 3 | 927 | 469 |
| 10η | 10 | 2 | 1027 | 549 |
| 11η | 11 | 2 | 1107 | 544 |
| 12η | 12 | 4 | 1217 | 571 |
| 13η | 13 | 1 | 1289 | 620 |
| 14η | 14 | 3 | 1470 | 716 |
| 15η | 15 | 3 | 1540 | 706 |
| 16η | 16 | 1 | 1612 | 738 |
| 17η | 17 | 1 | 1708 | 812 |
| 18η | 18 | 4 | 1936 | 1008 |
| 19η | 19 | 3 | 2006 | 1030 |

| | | | | |
|-----|----|---|---------------------|-------------------------|
| 20η | 20 | 3 | 2076 | 1020 |
| 21η | 21 | 3 | 2146 | 1060 |
| 22η | 22 | 1 | 2218 | 1111 |
| 23η | 23 | 1 | 2314 | 1185 |
| 24η | 24 | 3 | 2495 | 1303 |
| 25η | 25 | 1 | 2567 | 1286 |
| 26η | 26 | 1 | 2663 | 1341 |
| 27η | 27 | 2 | 2863 | 1480 |
| 28η | 28 | 2 | 2943 | 1543 |
| 29η | 29 | 3 | 3013 | 1587 |
| 30η | 30 | 3 | 3083 | 1586 |
| | | | Μέσος όρος : | 812.07sec ή 13.5 min |

Παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος καθυστερήσεων είναι 812 sec και ο χρόνος προσγείωσης των 30 αεροσκαφών διαρκεί περίπου **52 λεπτά**, αυτό υπολογίζεται ως εξής $ALT[30^{ης} \text{ θέσης}] - ALT[1^{ης} \text{ θέσης}] = 3083 \text{ sec} = 52 \text{ λεπτά}$. Επίσης κάποιες πτήσεις έχουν καθυστερήσεις που απέχουν αρκετά από τον μέσο όρο π.χ το **29^ο** αεροσκάφος έχει σχεδόν την διπλάσια καθυστέρηση από το μέσο όρο.

Επίσης παρατηρούμε ότι η πολιτική **FCFS** δεν μετακινεί κανένα αεροσκάφος από την αρχική του θέση, αυτό φαίνεται από ότι ο αριθμός αεροσκαφών συμπίπτει με την θέση της ακολουθίας.

Χρησιμοποιώντας το ίδιο σενάριο με τα ίδια στοιχεία τα εισάγουμε στον αλγόριθμο για να βρούμε μια καλύτερη ακολουθία η οποία θα μας προσφέρει έναν καλύτερο μέσο όρο καθυστερήσεων αλλά παράλληλα και ένα μικρότερο χρονικό διάστημα για την προσγείωση όλων των αεροσκαφών. Στον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε την βελτιστοποιημένη ακολουθία από τον ευρετικό αλγόριθμο C.I.H :

| Θέση ακολουθίας | Αριθμός αεροσκάφους | Τύπος αεροσκάφους | Πραγματικός χρόνος άφιξης | Ελάχιστοι χρόνοι μεταξύ αφίξεων | Χρόνος καθυστέρησης | Θέσεις μετακίνησης |
|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|
| 1η | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2η | 2 | 3 | 181 | 181 | 159 | 0 |
| 3η | 5 | 3 | 251 | 70 | 97 | 2 |
| 4η | 4 | 2 | 351 | 100 | 241 | 0 |
| 5η | 3 | 4 | 461 | 110 | 380 | 2 |
| 6η | 8 | 4 | 551 | 90 | 177 | 2 |
| 7η | 12 | 4 | 646 | 90 | 0 | 5 |
| 8η | 10 | 2 | 726 | 80 | 248 | 2 |
| 9η | 11 | 2 | 806 | 80 | 243 | 2 |
| 10η | 9 | 3 | 876 | 70 | 418 | 1 |
| 11η | 14 | 3 | 946 | 70 | 192 | 3 |
| 12η | 15 | 3 | 1016 | 70 | 182 | 3 |
| 13η | 19 | 3 | 1086 | 70 | 110 | 6 |
| 14η | 20 | 3 | 1156 | 70 | 100 | 6 |
| 15η | 21 | 3 | 1226 | 70 | 140 | 6 |
| 16η | 24 | 3 | 1296 | 70 | 104 | 8 |
| 17η | 27 | 2 | 1396 | 100 | 13 | 10 |
| 18η | 28 | 2 | 1476 | 80 | 76 | 10 |
| 19η | 29 | 3 | 1546 | 70 | 120 | 10 |
| 20η | 30 | 3 | 1616 | 70 | 119 | 10 |
| 21η | 6 | 1 | 1688 | 72 | 1469 | 15 |

| | | | | | | |
|-----|----|---|------|------------------------|------------------------------|-------------------|
| 22η | 7 | 1 | 1784 | 96 | 1478 | 15 |
| 23η | 13 | 1 | 1880 | 96 | 1211 | 10 |
| 24η | 16 | 1 | 1976 | 96 | 1102 | 8 |
| 25η | 17 | 1 | 2072 | 96 | 1176 | 8 |
| 26η | 22 | 1 | 2168 | 96 | 1061 | 4 |
| 27η | 23 | 1 | 2264 | 96 | 1135 | 4 |
| 28η | 25 | 1 | 2360 | 96 | 1079 | 3 |
| 29η | 26 | 1 | 2456 | 96 | 1134 | 3 |
| 30η | 18 | 4 | 2684 | 228 | 1756 | 12 |
| | | | | Μέσος όρος: | 524 sec ή 8 λεπτά | 5.6 θέσεις |

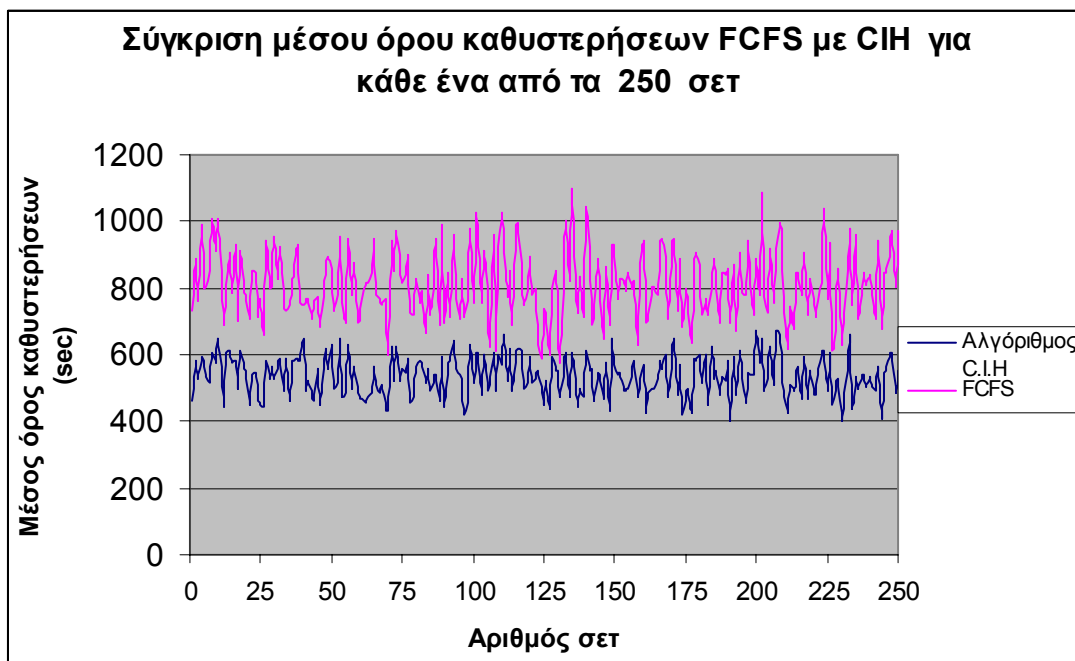
Παρατηρώντας την βελτιστοποιημένη ακολουθία προσγείωσης βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος έχει την τάση να ομαδοποιεί τα αεροσκάφη ανάλογα με τον τύπο τους ,μειώνοντας έτσι σημαντικά τους ελάχιστους χρόνους μεταξύ διαδοχικών αφίξεων.

Εξαιτίας αυτής της μείωσης ο συνολικός χρόνος προσγείωσης των 30 αεροσκαφών διαρκεί 2684 sec δηλαδή 45 λεπτά ,συγκριτικά δηλαδή με την πολιτική FCFS το χρονικό κέρδος είναι 52λεπτά-45λεπτά=7 λεπτά .

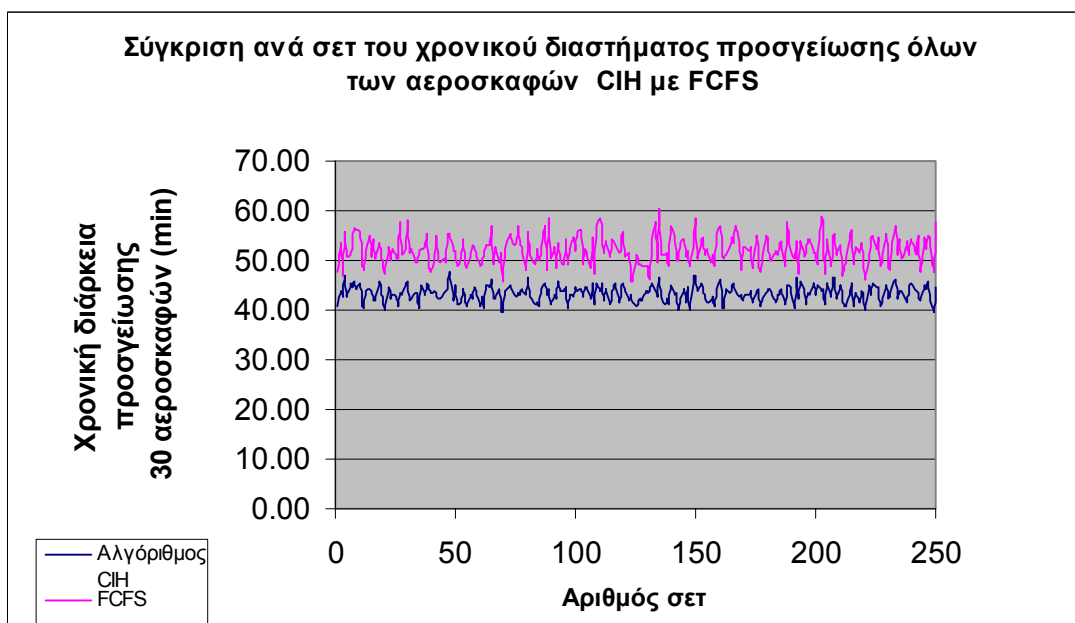
Για να κατανοήσουμε ότι ο χρόνος των 7 λεπτών είναι ιδιαίτερα σημαντικός αρκεί να δείξουμε ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα γνωρίζοντας ότι ο μέσος χρόνος μεταξύ αφίξεων σε έναν αεροδιάδρομο είναι 106.3 sec (κατά μέσο όρο) θα μπορούσαν να προσγειωθούν 3 αεροπλάνα κατά μέσο όρο . Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος C.I.H εκμεταλλεύεται καλύτερα την χωρητικότητα του αεροδιαδρόμου. Από την άποψη του μέσου όρου των καθυστερήσεων ο αλγόριθμος C.I.H παρουσιάζει μια μείωση 35.4% σε σχέση με τον μέσο όρο που παρουσιάζει η πολιτική FCFS .

Ο μέσος όρος των καθυστερήσεων εδώ είναι 8 λεπτά /πτήση ,αλλά υπάρχουν και αεροσκάφη με την τριπλάσια καθυστέρηση από τον μέσο όρο ,αυτό οφείλεται στην μεγάλη μετακίνηση κάποιων αεροσκαφών από τις αρχικές τους θέσεις (π.χ τα αεροσκάφη 18,6,7) όπως φαίνεται και στο πίνακα . Η μεγάλη αυτή μετακίνηση των αεροσκαφών από τις αρχικές τους θέσεις προκαλεί κατά κύριο λόγο και τις μεγάλες αποκλίσεις από τον μέσο όρο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα βαθμό εισάγοντας στο μοντέλο του αλγορίθμου έναν περιορισμό στην μετακίνηση των θέσεων τον οποίο θα παρουσιάσουμε αργότερα σε αυτήν την εργασία.

Για να αντιληφθούμε και να αποδείξουμε το κέρδος από την χρήση ενός αλγορίθμου που αναλαμβάνει τον προγραμματισμό αφίξεων χρειάζεται μεγαλύτερος όγκος δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό προσομοιώνουμε 250 φορές το σύστημα με την συγκεκριμένη κυκλοφοριακή ροή (30 αεροσκάφη/25 λεπτά).Δηλαδή γεννάμε αρχικά 250 τυχαία σετ των 30 αεροσκαφών τα οποία προσεγγίζουν το αεροδρόμιο μέσα στο χρονικό διάστημα των 25 λεπτών (με τυχαίους προτιμώμενους χρόνους άφιξης για κάθε σετ).Το κάθε ένα από αυτά τα σετ το επιλύουμε με τον αλγόριθμο C.I.H και το συγκρίνουμε με την πολιτική αφίξεων FCFS. Και στην συνέχεια παρουσιάζουμε συγκριτικά (CIH με FCFS) τον μέσο όρο καθυστερήσεων που προσφέρει η κάθε μέθοδος για κάθε σετ (Ιστόγραμμα 1). Επίσης παρουσιάζουμε για κάθε σετ το συνολικό χρονικό διάστημα προσγείωσης των 30 αεροσκαφών και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων (Ιστόγραμμα 2).

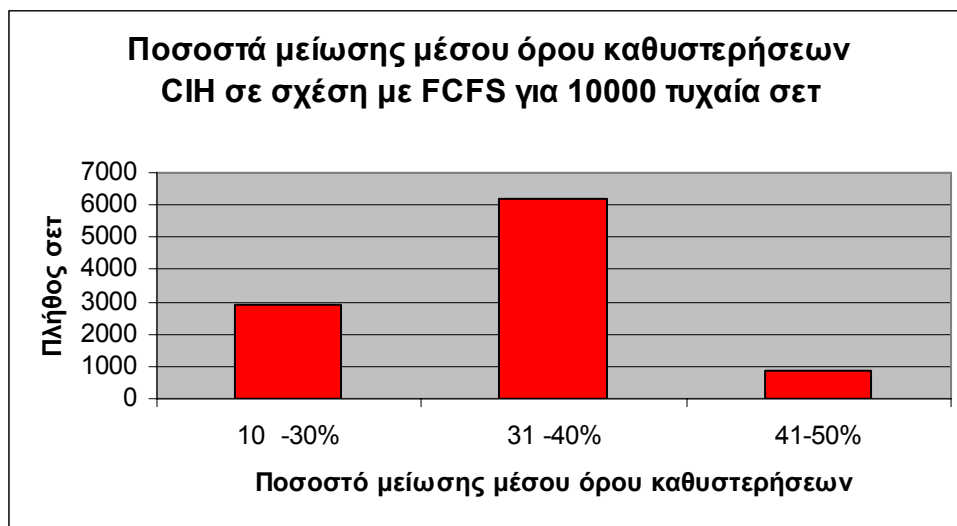


Ιστόγραμμα 1



Ιστόγραμμα 2

Στο ιστόγραμμα 1 βλέπουμε καθαρά την υπεροχή του αλγορίθμου C.I.H σε σύγκριση με την πολιτική FCFS σε κάθε σετ όσον αφορά τον μέσο όρο των καθυστερήσεων. Επίσης στο ιστόγραμμα 2 παρατηρούμε ότι χρειάζονται 40-45 λεπτά για την προσγείωση όλων των αεροσκαφών με τον αλγόριθμο C.I.H ενώ με την πολιτική FCFS χρειάζονται 48-58 λεπτά, φαίνεται λοιπόν και εδώ η υπεροχή του αλγορίθμου έναντι της πολιτικής FCFS. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα ποσοστά μείωσης του μέσου όρου των καθυστερήσεων που προκαλεί ο αλγόριθμος σε σχέση με την απλή πολιτική αφίξεων FCFS για 10000 διαφορετικά σετ των 30 αεροσκαφών που προσεγγίζουν το αεροδρόμιο μέσα σε 25 λεπτά.



Ιστόγραμμα 3

Παρατηρούμε στο ιστόγραμμα 3 ότι η μείωση του μέσου όρου των καθυστερήσεων είναι δεδομένη για κάθε ένα από τα 10000 διαφορετικά σετ. Από αυτά 6000 χιλιάδες σετ ή το 60% παρουσιάζει μείωση 31-40% του μέσου όρου καθυστερήσεων σε σχέση με την πολιτική FCFS, το 30% των σετ παρουσιάζει μείωση 10-30% και ένα μικρότερο ποσοστό 10% παρουσιάζει μείωση 41-50%.



Ιστόγραμμα 4

Στο παραπάνω ιστόγραμμα 4 μπορούμε να παρατηρήσουμε τα ποσοστά μείωσης στο συνολικό χρόνο προσγείωσης των 30 αεροσκαφών που προκαλεί η λύση του αλγορίθμου C.I.H σε σχέση με την πολιτική FCFS .

Για κάθε ένα από τα 10000 διαφορετικά σετ υπολογίζουμε την διαφορά του συνολικού χρόνου προσγείωσης του αλγορίθμου C.I.H με την πολιτική αφίξεων FCFS.

Έτσι τα ποσοστά μείωσης κυμαίνονται από 4% έως 30%. Για 8443 σετ ή για το 84,43% των σετ η μείωση κυμαίνεται από 11% έως 20% , για 1065 σετ από αυτά δηλαδή για το 10,65% των σετ η μείωση κυμαίνεται από 21% έως 30% και για ένα 0,5% των σετ η μείωση είναι 4% έως 10%. Επομένως ο αλγόριθμος C.I.H αποδεικνύεται αποτελεσματικότερος από την εύκολη στην εφαρμογή της πολιτική αφίξεων FCFS.

Όπως δείξαμε και παραπάνω είναι πολύ σημαντική η μείωση του χρονικού διαστήματος προσγείωσης του σετ αεροσκαφών ακόμη και κατά 3 λεπτά διότι κάθε

λεπτό που περνάει είναι σημαντικό για την χωρητικότητα του αεροδρομίου. Στην προσομοίωση των 10000 σετ ο αλγόριθμος μειώνει κατά μέσο όρο το χρονικό διάστημα προσγειώσεων (30 αεροσκαφών) κατά 8,7 λεπτά ,η μείωση αυτή είναι πολύ σημαντική εάν σκεφτούμε ότι μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα θα μπορούσαν να προσγειωθούν ακόμη 6 αεροσκάφη κατά μέσο όρο και ότι στην περίπτωση εφαρμογής της FCFS τα 6 αυτά αεροσκάφη θα ανάμεναν για προσγείωση σε τροχιές κράτησης αυξάνοντας την καθυστέρηση τους .

Η μείωση στον μέσο όρο των καθυστερήσεων αλλά και η μείωση του συνολικού χρόνου προσγείωσης κάθε σετ έγκειται στην αλλαγή των θέσεων που συνεπάγεται τους ελάχιστους χρόνους μεταξύ αφίξεων. Για να δείξουμε αυτή την μείωση υπολογίζουμε τον μέσο όρο μεταξύ αφίξεων που δημιουργεί η πολιτική FCFS και ο αλγόριθμος C.I.H για τα ίδια δεδομένα ροής αφίξεων . Το κάθε σετ όπως είπαμε παραπάνω περιέχει 30 αεροσκάφη άρα κάνοντας 2184 προσομοιώσεις (λόγω **περιορισμένων κελιών στο excel**) τότε θα έχουμε 65520 πτήσεις, αριθμός αρκετά μεγάλος για να βγάλουμε ένα συμπέρασμα για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω πίνακα :

| Μέθοδος | Αλγόριθμος C.I.H | Πολιτική αφίξεων FCFS |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Μέσος χρόνος μεταξύ αφίξεων στον αεροδιάδρομο | 86.16sec | 107sec |
| Τυπική απόκλιση | 28.29sec | 49.5 sec |
| Μέση χωρητικότητα | 41-42 αφίξεις ανά ώρα | 33-34 αφίξεις ανά ώρα |

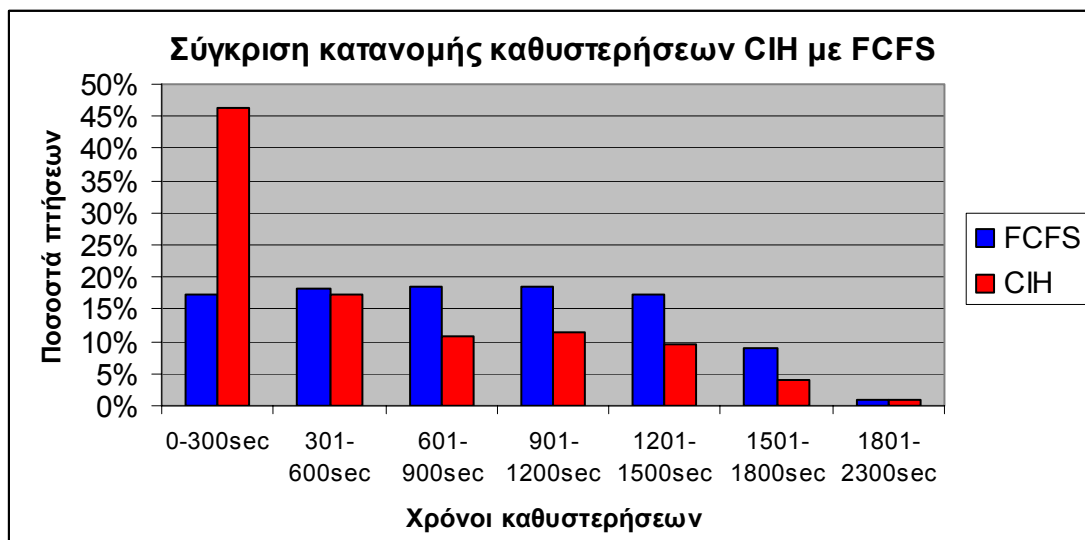
Μέσοι χρόνοι μεταξύ αφίξεων και μέση χωρητικότητα ανάλογα με την μέθοδο

Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε το κέρδος στη χωρητικότητα του αεροδρομίου από την χρήση του αλγόριθμου C.I.H ,κατά μέσο όρο ο αλγόριθμος αυξάνει κατά 7 πτήσεις/ώρα την χωρητικότητα του αεροδιαδρόμου, αριθμός αρκετά σημαντικός για ένα αεροδρόμιο που βρίσκεται σε περίοδο αιχμής.

Επίσης βλέπουμε ότι η πολιτική FCFS επιβεβαιώνει το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για να μετρήσουμε την θεωρητική χωρητικότητα αφίξεων ενός απλού αεροδιαδρόμου. Με τον τρόπο αυτό δείχνουμε ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε παραβλέπει την δυνατότητα να κάνουμε αλλαγές στις αρχικές θέσεις (εφαρμογή FCFS) των αεροσκαφών με αποτέλεσμα να λαμβάνει υπόψη όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγαριών που μπορούν να δημιουργηθούν από τους 4 τύπους αεροσκαφών που έχουμε θεωρήσει.

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο για τον έλεγχο της αποδοτικότητας κάθε μεθόδου είναι η κατανομή των καθυστερήσεων και τα αντίστοιχα ποσοστά που καταλαμβάνουν. Έτσι για να δείξουμε την κατανομή των καθυστερήσεων δηλαδή το πόσο καθυστερούν κάποιες πτήσεις και με τι συχνότητα προσομοιώνουμε το σενάριο 30αεροσκάφη/25 λεπτά 2000 φορές, αποκτώντας έτσι στοιχεία για 60000 πτήσεις.

Στο παρακάτω γράφημα μπορούμε να δούμε την κατανομή των καθυστερήσεων και το ποσοστό που καταλαμβάνουν σε 60000 πτήσεις συγκρίνοντας την πολιτική FCFS με τις λύσεις του αλγόριθμου C.I.H για τα ίδια δεδομένα:

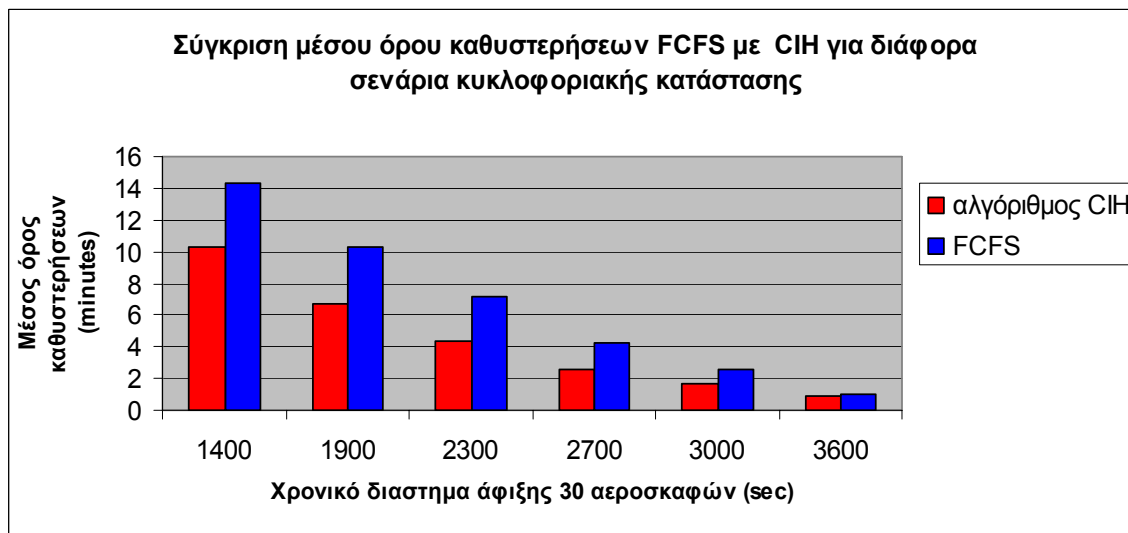


Ιστόγραμμα 5

Στο ιστόγραμμα 5 παρατηρούμε ότι το **74%** των πτήσεων παρουσιάζει καθυστέρηση κάτω των 15 λεπτών (**900sec**) για τον αλγόριθμο C.I.H ενώ για την πολιτική FCFS μόνο το **54%** (για τα ίδια δεδομένα), το κέρδος από την χρήση του αλγόριθμου είναι αρκετά σημαντικό και για τις καθυστερήσεις και κατ'επέκταση για το κόστος που προέρχεται από κράτηση του αεροσκάφους για αρκετό χρόνο σε τροχιές αναμονής. Όμως υπάρχουν και αρκετές πτήσεις όπου οι καθυστερήσεις τους ξεπερνούν κατά πολύ τα 15 λεπτά και για τις δύο μεθόδους.

Πιο αναλυτικά ένα ποσοστό της τάξης του 11.37% καθυστερεί 15 -20 λεπτά για τον αλγόριθμο C.I.H ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για την πολιτική FCFS είναι 18.57%, ένα ποσοστό 9.5% καθυστερεί 20-25 λεπτά για τον αλγόριθμο ενώ για την πολιτική FCFS ανέρχεται στο 17.24% σχεδόν δηλαδή διπλάσιο ποσοστό. Επίσης ένα ποσοστό 3.87% καθυστερεί 25-30 λεπτά για τον C.I.H σε αντίθεση με την πολιτική FCFS που το ποσοστό αυτό είναι σχεδόν 9%. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος καταφέρνει να 'κρατήσει' τα περισσότερα αεροσκάφη σε μικρές καθυστερήσεις ενώ η πολιτική FCFS έχει μεγάλα ποσοστά πτήσεων (**46%**) στις μεγάλες καθυστερήσεις δηλαδή άνω των 15 λεπτών.

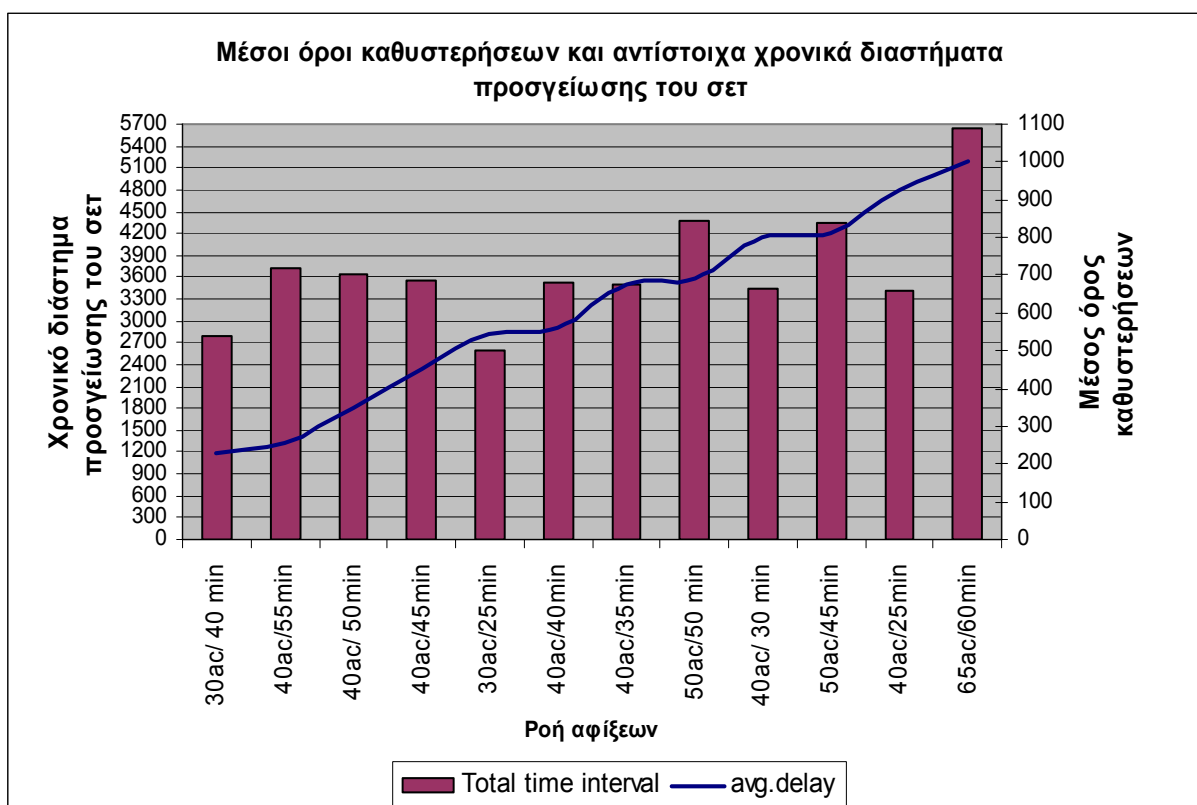
Παρακάτω στο ιστόγραμμα 6 παρουσιάζουμε τον μέσο όρο καθυστερήσεων για διάφορα σενάρια τα οποία τα επιλύουμε με την πολιτική FCFS και τον αλγόριθμο CIH. Έτσι θα διαπιστώσουμε την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου σε διάφορες καταστάσεις κυκλοφοριακής ροής που μπορεί να υπάρξει σε ένα διεθνές αεροδρόμιο σε σχέση με την αποτελεσματικότητα της πολιτικής FCFS.



Ιστόγραμμα 6

Δεδομένου ότι ένας αεροδιάδρομος έχει μέγιστη χωρητικότητα αφίξεων περίπου 35-40 αεροσκάφη/ώρα μπορούμε να διακρίνουμε τις καθυστερήσεις που δημιουργούνται όταν η ζήτηση της κυκλοφορίας ξεπερνά την χωρητικότητα αυτή και το κέρδος στις καθυστερήσεις από τον αλγόριθμο σε καταστάσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης. Παρατηρούμε επίσης ότι όταν η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την μέγιστη χωρητικότητα η πολιτική FCFS συμπίπτει με την λύση του αλγορίθμου, αυτό συμβαίνει διότι το κάθε αεροσκάφος δεν αλλάζει θέση στην ακολουθία (στην λύση του αλγορίθμου) επειδή οι αφίξεις απέχουν αρκετά μεταξύ τους κατά μέσο όρο και δεν υπάρχει ανάγκη από βελτιστοποίηση αλλάζοντας θέσεις στα αεροσκάφη.

Στο παρακάτω ιστόγραμμα 6 α παρατηρούμε διάφορα σενάρια κυκλοφοριακής ροής αφίξεων, για κάθε σενάριο φαίνεται ο μέσος όρος καθυστερήσεων και το χρονικό διάστημα προσγείωσης του κάθε σεν, όλα τα σενάρια και οι λύσεις τους προέρχονται από τον αλγόριθμο CIH.



Ιστόγραμμα 6α

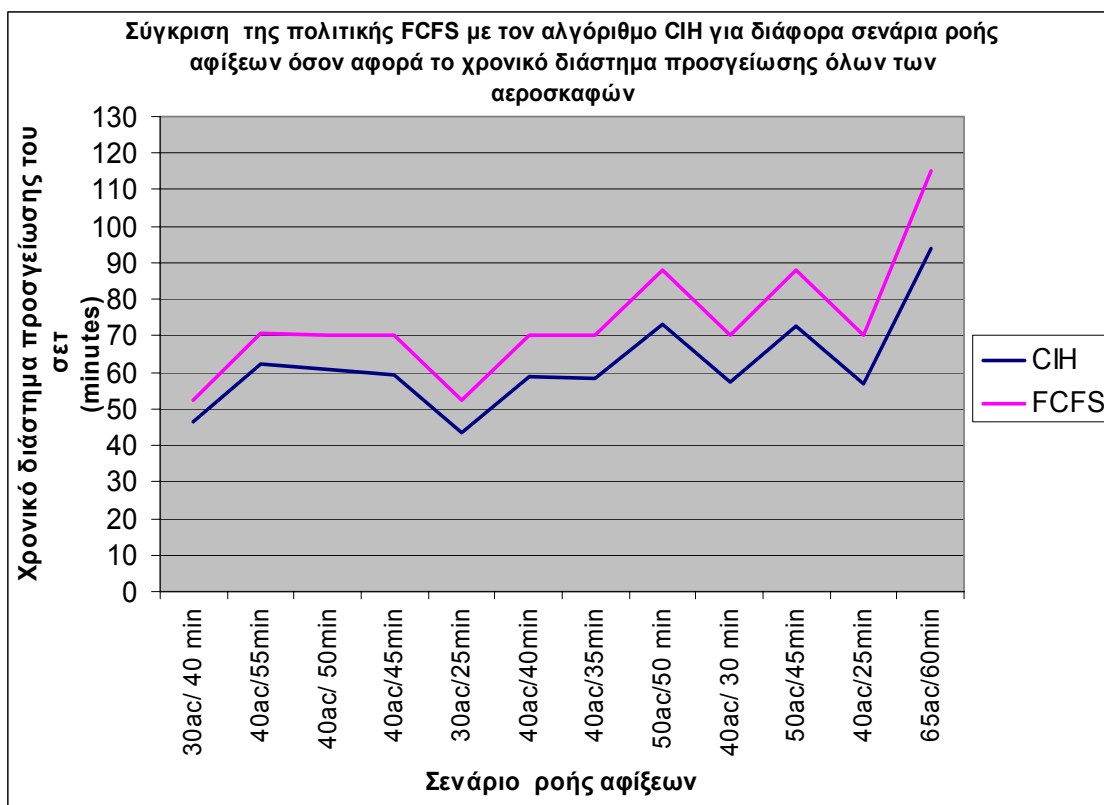
Παρατηρούμε ότι για συγκεκριμένο αριθμό αεροσκαφών όσο πιο “αραιά” τα αεροσκάφη τοποθετούνται στο χρόνο, παράδειγμα η ροή αφίξεων 40ac/55 min με τη ροή αφίξεων 40ac/30min τόσο το χρονικό διάστημα προσγείωσης του σεν των αεροσκαφών αυξάνεται αλλά παράλληλα ο μέσος χρόνος καθυστερήσεων μειώνεται.

Αυτό συμβαίνει διότι όταν τα αεροσκάφη τοποθετούνται αραιά στο χρόνο οι μέσοι χρόνοι μεταξύ αφίξεων στον περιβάλλοντα χώρο του αεροδρομίου είναι μεγάλοι μεταξύ τους όποτε ο αλγόριθμος δεν μπορεί να τα τοποθετήσει χρονικά όσο κοντά γίνεται εφόσον η πολιτική να πιέσει ένα αεροσκάφος να έλθει πιο γρήγορα προς όφελος κάποιου άλλου συνεπάγεται κόστη από την κατανάλωση καυσίμων και εφαρμόζεται σε πολύ ειδικές περιπτώσεις στην πράξη.

Επίσης οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων είναι τυχαίοι μεταξύ τους δηλαδή δεν ισαπέχουν, αυτό σημαίνει ότι μπορεί κάποια ζεύγη αεροσκαφών να απέχουν πολύ παραπάνω από τον ελάχιστο χρόνο μεταξύ αφίξεων (που επιβάλλεται) με αποτέλεσμα

να αυξάνονται οι αδρανείς χρόνοι στην λειτουργία του αεροδρομίου ακόμη και σε σενάριο μεγάλης κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Στο παρακάτω γράφημα 2 μπορούμε να παρατηρήσουμε διάφορα σενάρια κυκλοφοριακή ροής με διαφορετικό αριθμό αεροσκαφών και διαφορετικά διαστήματα άφιξης αυτών. Τα στοιχεία κάθε σεναρίου (για σιγουριά) προέκυψαν από αρκετές προσομοιώσεις για το κάθε ένα, σε κάθε μια από τις προσομοιώσεις λύναμε το σενάριο βγάζοντας την ακολουθία προσγείωσης με τον αλγόριθμο CIH και με την πολιτική αφίξεων FCFS και στην συνέχεια υπολογίζαμε τον μέσο όρο του χρονικού διαστήματος προσγείωσης του σενάριο για τις δύο μεθόδους.



Γράφημα 2

Παρατηρούμε στο παραπάνω γράφημα 2 την διαφορά των 2 μεθόδων και ταυτόχρονα την υπεροχή του αλγόριθμου CIH σε σχέση με την πολιτική FCFS για κάθε σενάριο κυκλοφοριακής ροής. Η διαφορά στο συνολικό χρόνο προσγείωσης του κάθε σεντ αεροσκάφων της πολιτικής FCFS από τον αλγόριθμο CIH κυμαίνεται από 6 λεπτά (για το σενάριο 30ac/40min) έως και 21 λεπτά για το πιο δύσκολο σενάριο το οποίο είναι το 65ac/60min. Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι η πολιτική F.C.F.S δεν διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις αφίξεις σε περιόδους αιχμής, δημιουργώντας μεγάλα κενά μεταξύ αφίξεων, το αποτέλεσμα είναι ο αυξημένος συνολικός χρόνος προσγείωσης του σεντ των αεροσκαφών με αρκετή διαφορά σε ορισμένα σενάρια μειώνοντας έτσι την ικανότητα εξυπηρέτησης αφίξεων του αεροδρομίου.

Στο θεωρητικό μοντέλο μέτρησης της χωρητικότητας ενός απλού αεροδιαδρόμου είχαμε δείξει ότι η μέση ωριαία δυναμικότητα αφίξεων είναι 33 αεροσκάφη και πρακτικά σύμφωνα με σχετική έκθεση της F.A.A είναι 42 αφίξεις ανά ώρα. Στα σενάρια που περιέχονται 40 αεροσκάφη αλλά με διαφορετικό χρονικό διάστημα άφιξης αυτών παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος CIH καταφέρνει να τα προσγειώσει κοντά στο χρονικό διάστημα μιας ώρας δηλαδή όση είναι και η χωρητικότητα ενός αεροδιαδρόμου όσον αφορά τις αφίξεις. Ενώ η πολιτική F.C.F.S στα ίδια σενάρια καθυστερεί την προσγείωση των αεροσκαφών κατά 10 λεπτά.

Επομένως μπορούμε να πούμε ότι ο αλγόριθμος CIH είναι πολύ πιο αποτελεσματικός όσον αφορά την χρήση της χωρητικότητας του αεροδιαδρόμου σε σχέση με την πολιτική F.C.F.S.

Τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου CIH είναι αρκετά όπως δείξαμε , υπάρχουν όμως και **μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής :**

- Μεγάλη μετακίνηση σε αρκετά αεροσκάφη από την αρχική τους θέση έως και 27 θέσεις κύριως των βαρέων αεροσκαφών σε ένα σενάριο που περιλαμβάνει 30 αεροσκάφη
- Οι καθυστερήσεις αρκετών αεροσκαφών απέχουν αρκετά από τον μέσο όρο έως και στο τριπλάσιο ,δηλαδή υπάρχει μεγάλη τυπική απόκλιση
- Τα αεροσκάφη τύπου 1=B747 δηλαδή τα βαριά αεροσκάφη τοποθετούνται συνήθως στο τέλος της ακολουθίας διότι είναι πιο βολικό για τους υπόλοιπους τύπους αεροσκαφών που είναι πιο ελαφριοί .Απόδειξη για αυτό ο πίνακας των ελάχιστων χρόνων μεταξύ αφίξεων όπου παρατηρούμε ότι όποιο αεροσκάφος τοποθετείται μετά τα αεροσκάφη τύπου 1 για προσγείωση θα καθυστερήσει περισσότερο να προσγειωθεί από ότι ένα προσγειωνόταν πριν από αυτό έτσι βοηθάει να τοποθετείται στο τέλος της ακολουθίας .

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω **μειονεκτήματα** θα τοποθετήσουμε στον αλγόριθμο έναν περιορισμό ο οποίος δεν θα επιτρέπει την μετακίνηση του εκάστοτε αεροσκάφους πάνω από ένα όριο δηλαδή πάνω από έναν αριθμό θέσεων, ο αριθμός αυτός θα επιλέγεται από τον χρήστη του προγράμματος.

Στόχος του είναι να μεγιστοποιήσει το ποσοστό των αεροσκαφών που παρουσιάζουν καθυστέρηση κάτω των 15 λεπτών , να ελαχιστοποιήσει ή να εξαλείψει τα ποσοστά των αεροσκαφών που παρουσιάζουν πολύ μεγάλες καθυστερήσεις π.χ άνω των 25 λεπτών ,να μειώσει την μεγάλη απόκλιση από τον μέσο όρο καθυστερήσεων που παρουσιάζουν κάποιες πτήσεις και γενικότερα τα αεροσκάφη να μην απέχουν πολλές θέσεις από την αρχική τους .

Στην παρακάτω παράγραφο του 3^{ου} κεφαλαίου εξηγούμε πως λειτουργεί ο περιορισμός και παρουσιάζουμε σταδιακά τα σημεία που ο αλγόριθμος με τον περιορισμό (CIH –CPS) αποδεικνύεται αποτελεσματικότερος από τον αλγόριθμο στην απλή μορφή του.

3.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΘΕΣΕΩΝ & ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ C.I.H _CPS

Ο περιορισμός που θα βοηθήσει τον αλγόριθμο να μπορεί να τοποθετεί το κάθε αεροσκάφος σε ένα περιορισμένο εύρος θέσεων στην τελική ακολουθία φαίνεται στην αρχή της πρώτης επαναληπτικής διαδικασίας επιλογής αεροσκάφους .

Ο περιορισμός στην γλώσσα προγραμματισμού C++ είναι ο εξής :

For (df=1; df<=100; df++) Περιορισμός στην μετακίνηση θέσεων
{

If (land > df*cps)
{
zz= df*cps+1;

}

}

Η βασική λειτουργία του περιορισμού είναι να χωρίζει τον συνολικό αριθμό των αεροσκαφών που υπάρχουν στην ακολουθία σε ομάδες ανάλογα με την επιλογή CPS που έχουμε κάνει στην αρχή του προγράμματος. Έτσι η μεταβλητή **CPS** ορίζει τον αριθμό των αεροσκαφών που θα υπάρχουν στην κάθε ομάδα και με την βοήθεια της μεταβλητής **zz** θέτει όρια στην μετακίνηση κάθε αεροσκάφους. Υπενθυμίζουμε ότι η μεταβλητή **zz** ουσιαστικά ορίζει την θέση από την οποία θα ξεκινήσει η αναζήτηση (της καλύτερης θέσης) κάθε αεροσκάφους που θα δοκιμαστεί στην ακολουθία.

Ενώ ο αλγόριθμος στην απλή μορφή του αντιμετωπίζει ως μόνο ομάδα τα N αεροσκάφη δοκιμάζοντας κάθε αεροσκάφος από την 2^η θέση έως και την θέση που βρισκόταν αρχικά το αεροσκάφος i , ο αλγόριθμος με τον περιορισμό μετακίνησης θέσης βελτιστοποιεί την ακολουθία κατά ομάδες π.χ εάν η ακολουθία έχει 30 αεροσκάφη και ο περιορισμός θέσης είναι $cps=10$ τότε ο αλγόριθμος θα χωρίσει την ακολουθία σε 3 ομάδες των δέκα αεροσκαφών. Αυτό σημαίνει ότι μετά την βελτιστοποίηση το κάθε αεροσκάφος θα βρίσκεται μέσα στην ομάδα που τοποθετήθηκε αρχικά αλλά ίσως σε διαφορετική θέση. Με αυτόν τον τρόπο τα αεροσκάφη παραμένουν σχετικά κοντά στην αρχική τους θέση.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι παρόλο που ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί την ακολουθία κατά ομάδες παραμένει ως στόχος η ελαχιστοποίηση του συνολικού αθροίσματος καθυστερήσεων όλων των αεροσκαφών N , έτσι περνώντας από ομάδα σε ομάδα δεν θα υπάρχουν μεγάλοι χρόνοι μεταξύ αφίξεων δηλαδή το τελευταίο αεροσκάφος μιας ομάδας και το πρώτο της επόμενης θα έχουν το μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα μεταξύ αφίξεων στις περισσότερες περιπτώσεις.

Για να κατανοήσουμε πλήρως τον περιορισμό θα περιγράψουμε με ένα παράδειγμα την λειτουργία του. Έστω λοιπόν ότι έχουμε 30 αεροσκάφη και επιθυμούμε στην χειρότερη περίπτωση να έχουμε μετακίνηση ενός αεροσκάφους κατά 9 θέσεις. Αρχικά θα χωρίσουμε την ακολουθία σε ομάδες των 10 αεροσκαφών δηλαδή η πρώτη ομάδα θα αποτελείται από τα αεροσκάφη 1,...,10, η δεύτερη από τα αεροσκάφη 11,...,20, και η τρίτη και τελευταία από τα αεροσκάφη 21,...,30. Με αυτόν τον τρόπο διαχωρισμού τα αεροσκάφη θα έχουν μέγιστη αλλαγή θέσης ίση με 9 εάν π.χ το αεροσκάφος 30 τοποθετηθεί στην θέση 21 ή το αεροσκάφος 20 στην θέση 11 κτλ.

Στην πρώτη ομάδα η αναζήτηση θέσης των αεροσκαφών 3,...,10 ξεκινά από την 2^η θέση. Μόλις και το 10^ο αεροσκάφος τοποθετηθεί στην ακολουθία τότε κανένα από τα αεροσκάφη 11,...,20 δεν γίνεται να τοποθετηθεί στις θέσεις 1,...,10 διότι ο περιορισμός θα θέσει ως νέα θέση έναρξης αναζήτησης την 11^η. Στην συνέχεια μόλις και το 20^ο αεροσκάφος δοκιμαστεί στις θέσεις από 11,...,20 και τοποθετηθεί στην ακολουθία, αλλάζει και πάλι η έναρξη αναζήτησης θέσης **zz** και γίνεται από 11 που ήταν 21, όπου θα ξεκινήσει η αναζήτηση για τα αεροσκάφη 21,...,30 τώρα.

Με αυτόν τον τρόπο τα αεροσκάφη δεν απέχουν πολλές θέσεις από την αρχική διατηρώντας ως ένα βαθμό την προτεραιότητα τους. Το πλεονέκτημα είναι ότι με αυτό τον περιορισμό δεν έχουμε το φαινόμενο που είδαμε στον αλγόριθμο CII δηλαδή ένα αεροσκάφος στην ακολουθία των 30 αεροσκαφών να έχει 500sec καθυστέρηση και ένα άλλο να έχει 2100sec, με λίγα λόγια οι αναπόφευκτες καθυστερήσεις κατανομούνται πιο ομοιόμορφα στον αριθμό των αεροσκαφών. Για να δείξουμε τα οφέλη του αλγόριθμου CII-CPS (constrained position shifting) σε σύγκριση με τον αλγόριθμο CII στην απλή μορφή του θα προσομοιώσουμε το σενάριο 30 αεροσκάφη/25 λεπτά αρκετές φορές και θα συγκρίνουμε τις λύσεις των δύο αλγορίθμων για τα ίδια δεδομένα.

Ύστερα από 2000 προσομοιώσεις του σεναρίου (30 αεροσκάφη/25 λεπτά) αποκτούμε στοιχεία για 60000 πτήσεις, τα στοιχεία αυτά είναι η μετακίνηση που υπέστη κάθε αεροσκάφος από την αρχική του θέση, η καθυστέρηση του κτλ.

Επίσης έχουμε επιλέξει ως μέγιστη μετακίνηση ενός αεροσκάφους 9 θέσεις ,θα δείξουμε παρακάτω τον λόγο για τον οποίο έγινε αυτή η επιλογή.

Στον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε τις αποδόσεις κάθε έκδοσης του αλγορίθμου :

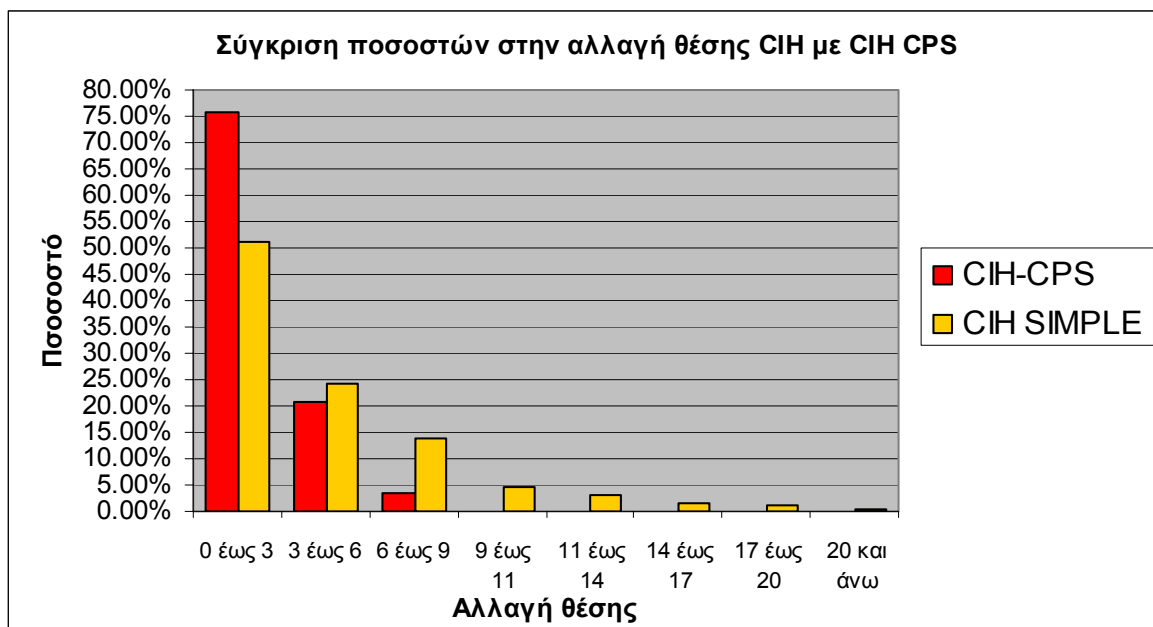
| Στατιστικά στοιχεία για κάθε μέθοδο | | |
|-------------------------------------|------------|--------------------|
| Μέθοδος | CIH simple | CIH CPS (9 θέσεις) |
| Μέσος όρος καθυστερήσεων | 534 sec | 603 sec |
| Τυπική απόκλιση | 502 sec | 410sec |
| Μέγιστη καθυστέρηση | 2300sec | 1800 sec |
| Μέση μετακίνηση θέσης | 5 θέσεις | 2 θέσεις |
| Τυπική απόκλιση αλλαγή θέσης | 4 θέσεις | 2 θέσεις |
| Μέγιστη μετακίνηση | 26 θέσεις | 9 θέσεις |

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι η σημαντική διαφορά που δημιουργεί η εισαγωγή περιορισμού στον αλγόριθμο CIH είναι η περιορισμένη μετακίνηση θέσεων στα αεροσκάφη από την αρχική τους στην ακολουθία. Ο αλγόριθμος στην αρχική μορφή του μπορεί να τοποθετήσει έως και 26 θέσεις ένα αεροσκάφος από την θέση του. Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο CIH-CPS ο οποίος η μέγιστη αλλαγή θέσεων που παρουσιάζει σε κάποια αεροσκάφη είναι μόλις 9 θέσεις.

Αναλυτικότερα κατά μέσο όρο ο αλγόριθμος CIH CPS μετακινεί τα αεροσκάφη κατά 2 ± 2 θέσεις ,ενώ ο αλγόριθμος στην απλή μορφή του παρουσιάζει μετακίνηση θέσεων 5 ± 4 θέσεις. Κάτι αντίστοιχο παρουσιάζεται και στις καθυστερήσεις όπου η μέγιστη καθυστέρηση για τον αλγόριθμο CIH-CPS είναι 1800 sec=30 λεπτά ενώ ο αλγόριθμος CIH παρουσιάζει μέγιστη καθυστέρηση 2300sec=38 λεπτά .Επίσης η διαφορά του μέσου όρου καθυστερήσεων που παρουσιάζουν οι δύο αλγόριθμοι είναι μικρή ,για τον αλγόριθμο CIH –CPS ο μέσος όρος των καθυστερήσεων είναι 603 sec ενώ ο αλγόριθμος CIH παρουσιάζει έναν ελαφρά μικρότερο μέσο όρο της τάξης των 534 sec, αυτό οφείλεται στις μικρότερες σε πλήθος ‘ευκαιρίες’ που έχουν τα αεροσκάφη στον αλγόριθμο CIH CPS να τοποθετηθούν στην ακολουθία σε σχέση με τον αλγόριθμο CIH .

Το κέρδος όμως από την περιορισμένη μετακίνηση θέσεων είναι η χαμηλότερη τυπική απόκλιση στον μέσο όρο των καθυστερήσεων όπως φένεται και στο παραπάνω πίνακα.

Στο παρακάτω ιστόγραμμα 7 παρατηρούμε το ποσοστό των αεροσκαφών και το πόσο μετακινήθηκαν από την αρχική τους θέση , συγκρίνοντας έτσι τις δύο εκδοχές αυτού του αλγορίθμου για 60000 πτήσεις στο έντονο κυκλοφοριακό σενάριο 30αεροσκάφη/25λεπτά.

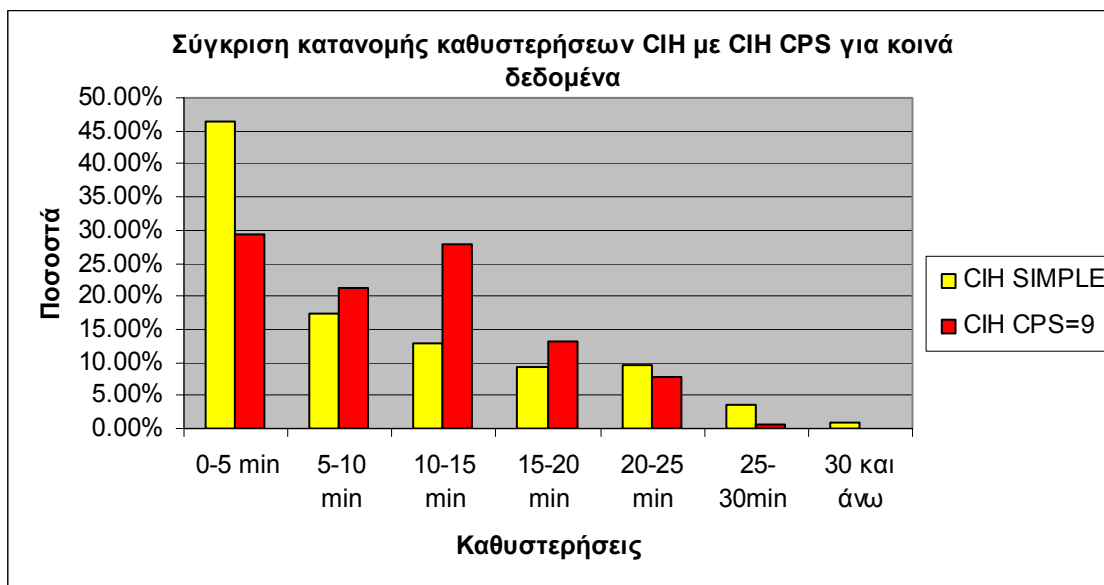


Ιστόγραμμα 7

Παρατηρούμε ότι στον αλγόριθμο CIH CPS το μεγαλύτερο ποσοστό των αεροσκαφών (75%) μετακινείται από 0 έως 3 θέσεις ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τον αλγόριθμο στην απλή εκδοχή του είναι μόλις (51%) .Ακολουθεί το ποσοστό 20.7% το οποίο παρουσιάζει μετακίνηση των αεροσκαφών από 3 έως 6 θέσεις για τον αλγόριθμο CIH CPS ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τον αλγόριθμο CIH είναι 25% και τέλος τα ποσοστά από 6 έως 9 θέσεις για τον CIH CPS και CIH είναι 3.5% και 13.88% αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα ποσοστά για μεγαλύτερες των 9 θέσεων μετακινήσεις (με κίτρινο χρώμα) ανήκουν στον απλό αλγόριθμο CIH , τα ποσοστά αυτά είναι μικρά αλλά πολύ σημαντικά . Για παράδειγμα το ποσοστό που αντιστοιχεί στην μετακίνηση των αεροσκαφών από 17-20 θέσεις είναι 0.97% στις 60000 πτήσεις για τον αλγόριθμο CIH ,όμως αυτό το ποσοστό αντιστοιχεί σε 582 πτήσεις ο οποίος είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός και δεν θέλουμε κανένα αεροσκάφος να έχει τόσες μεγάλες αλλαγές θέσεων.

Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου CIH CPS λοιπόν έναντι του αλγορίθμου CIH είναι ότι εγγυάται τις μικρές αλλαγές θέσης σε κάθε αεροσκάφος (ανάλογα με την επιλογή που κάνει) και με μικρό κόστος στον μέσο όρο των καθυστερήσεων όπως είδαμε και παραπάνω.

Στο παρακάτω ιστόγραμμα 7 συγκρίνουμε την κατανομή καθυστερήσεων που δημιουργεί ο αλγόριθμος CIH και ο αλγόριθμος CIH CPS για κοινά δεδομένα.



Ιστόγραμμα 8

Αρχικά να θυμίσουμε ότι οι καθυστερήσεις που καταγράφονται είναι αυτές που διαρκούν πάνω από 15 λεπτά (ή πάνω από 18 ανάλογα με διάφορες παραμέτρους όπως καιρός κτλ) ,αυτό σημαίνει ότι υπεισέρχονται κόστη για καθυστερήσεις άνω των 15 λεπτών, αυτό το επιβάλλει η ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας (Federal aviation administration) .Μέσα από αυτό το πρίσμα μας ενδιαφέρει αρκετά ο αλγόριθμος CIH CPS ή ο αλγόριθμος CIH να παρουσιάζει στο μεγαλύτερο ποσοστό πτήσεων καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών ,διότι αυτό θα σημαίνει κέρδος για τις αεροπορικές εταιρίες τους επιβάτες αλλά και για την ίδια την λειτουργία του αεροδρομίου.

Παρατηρώντας το **ιστόγραμμα 8** βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος CIH CPS παρουσιάζει ένα ποσοστό της τάξης του 78.34% το οποίο έχει καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τον αλγόριθμο CIH είναι 76.6%.Η διαφορά αυτών των δύο ποσοστών αντιστοιχεί σε 1020 πτήσεις από τις 60000 , βλέπουμε έτσι εδώ την υπεροχή του αλγορίθμου CIH CPS σε σχέση με τον αλγόριθμο στην απλή μορφή του. Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι ότι ο αλγόριθμος CIH σε αντίθεση με τον αλγόριθμο CIH-CPS παρουσιάζει αυξημένα ποσοστά στις καθυστερήσεις 20-25 λεπτά ,25-30 λεπτά ,30 λεπτά και άνω με αντίστοιχα ποσοστά 9.54% ,3.72%, 0.96% ενώ ο αλγόριθμος CIH CPS 7.90%,0.71%,0% στις αντίστοιχες καθυστερήσεις. Αυτό δείχνει ότι ο περιορισμός του αλγορίθμου CIH CPS βοηθά να ‘κρατηθούν’ οι καθυστερήσεις όσο γίνεται περισσότερο στις μικρές κατηγορίες ,με άλλα λόγια μικραίνει το φάσμα των καθυστερήσεων .

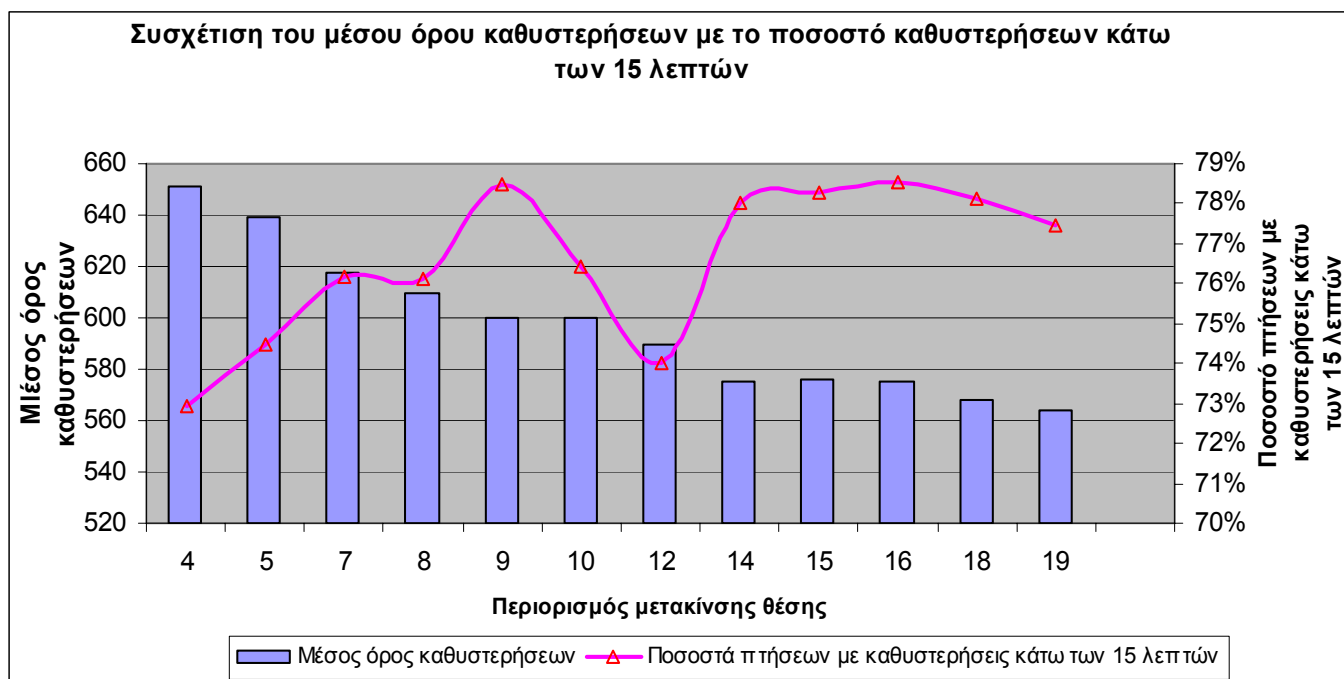
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να δείξουμε τον λόγο που επιλέξαμε μέγιστη μετακίνηση **9 θέσεις** για το σενάριο αυτό. Στο παρακάτω πίνακα παρατηρούμε τα στατιστικά στοιχεία για διάφορες επιλογές μέγιστης μετακίνησης θέσης. Σε κάθε περίπτωση προσομοιώνουμε 2000 φορές το σενάριο **30 αεροσκάφη /25 λεπτά** και παρουσιάζουμε τα στατιστικά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν περισσότερο .Τα σημαντικότερα είναι ο μέσος όρος αλλαγής θέσεων, οι μέγιστες αλλαγές θέσεων ,ο μέσος όρος των καθυστερήσεων και η απόκλιση τους, και το σημαντικότερο, το ποσοστό των αεροσκαφών που έχουν καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών όπου επιθυμούμε να είναι το μέγιστο δυνατό για λόγους που έχουμε ήδη εξηγήσει.

| Επιλογή μέγιστης μετακίνησης | Μέσος όρος καθυστερήσεων | Τυπική απόκλιση καθυστερήσεων | Ποσοστό καθυστερήσεων κάτω των 15 λεπτών | Ποσοστό καθυστερήσεων άνω των 15 λεπτών | Μέσος όρος μετακίνησης θέσης | Τυπική απόκλιση μετακίνησης θέσης |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--|---|------------------------------|-----------------------------------|
| απεριόριστη | 531 | 502 | 76.39% | 23.61% | 4.3 | 4.1 |
| 4 | 651 | 407 | 72.91% | 27.09% | 1.2 | 1 |
| 5 | 639 | 404 | 74.50% | 25.50% | 1.4 | 1.3 |
| 7 | 618 | 404 | 76.17% | 23.83% | 1.7 | 1.6 |
| 8 | 610 | 405 | 76.11% | 23.89% | 1.9 | 1.8 |
| 9 | 600 | 409 | 78.53% | 21.47% | 2 | 2 |
| 10 | 600 | 412 | 76.44% | 23.56% | 2.2 | 2 |
| 12 | 590 | 423 | 74.00% | 26.00% | 2.5 | 2.2 |
| 14 | 575 | 434 | 78.03% | 21.97% | 3 | 2.5 |
| 15 | 576 | 434 | 78.28% | 21.72% | 3 | 2.5 |
| 16 | 575 | 433 | 78.52% | 21.48% | 2.9 | 2.5 |
| 18 | 568 | 431 | 78.15% | 21.85% | 3 | 2.5 |
| 19 | 564 | 436 | 77.44% | 22.56% | 3 | 3 |

Πίνακας στατιστικών στοιχείων για διάφορες επιλογές μετακίνησης θέσης

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό καθυστερήσεων κάτω των 15 λεπτών το παρουσιάζει η επιλογή μέγιστης μετακίνησης θέσης με αριθμό 9 με ποσοστό 78.51% , ταυτόχρονα παρουσιάζει χαμηλή τυπική απόκλιση στις καθυστερήσεις συγκριτικά με τις υπόλοιπες επιλογές αλλά και χαμηλό μέσο όρο καθυστερήσεων ,μπορεί να μην είναι ο ελάχιστος από όλες τις επιλογές αλλά δεν έχει αξιοσημείωτη διαφορά έτσι δεν λαμβάνουμε σοβαρά υπόψη την παράμετρο αυτή. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η μέγιστη επιλογή μετακίνησης θέσης (πρώτη στήλη) τόσο ο μέσος όρος των καθυστερήσεων μειώνεται και η τυπική απόκλιση αυξάνεται ,παράλληλα η μείωση αυτή του μέσου όρου δεν συνεπάγεται και μείωση στα ποσοστά πτήσεων άνω των 15 λεπτών επομένως παραμένει ως η καλύτερη επιλογή η μέγιστη μετακίνηση θέσης 9.

Τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία τα τοποθετούμε στο ιστόγραμμα 9 που φέρεται παρακάτω για να δούμε και γραφικά την απόδοση που παρουσιάζει ο αλγόριθμος για διάφορες επιλογές μέγιστης μετακίνησης για το σενάριο 30 αεροσκάφη/25 λεπτά.



Ιστόγραμμα 9

Παρατηρούμε στο ιστόγραμμα 9 ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι ομάδες που χωρίζουμε τα αεροσκάφη τόσο ο μέσος όρος των καθυστερήσεων για αυτό το σενάριο μειώνεται. Αυτό οφείλεται στις ευκαιρίες δοκιμής (πλήθος) που έχει το κάθε αεροσκάφος, δηλαδή επιλέγοντας μέγιστη μετακίνηση θέσεων 4 οι δυνατές δοκιμές κάθε αεροσκάφους είναι πολύ λιγότερες από το ότι στην περίπτωση που έχουμε επιλέξει μέγιστη μετακίνηση θέσης 15 όπου ένα αεροσκάφος είναι πιο πιθανό να βρει την θέση που 'βολεύει' όλη την ακολουθία των αεροσκαφών προς όφελος του μέσου όρου καθυστερήσεων.

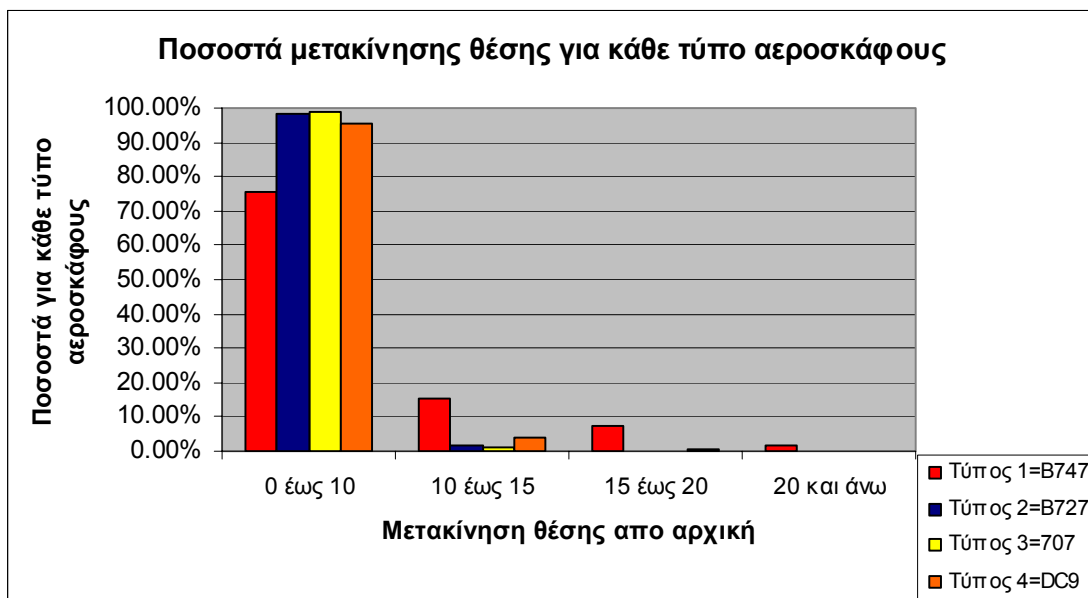
Ωστόσο η διαφορά στον μέσο όρο των καθυστερήσεων δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική και ταυτόχρονα όπως παρατηρούμε στο ιστόγραμμα 9 δεν συνεπάγεται και ότι θα έχουμε αυξημένα ποσοστά πτήσεων με καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών όταν έχουμε και μικρότερο μέσο όρο καθυστερήσεων. Το ποσοστό των πτήσεων με καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα λόγω του ότι οι πτήσεις αυτές δεν καταγράφονται σύμφωνα με την F.A.A και επομένως δεν δημιουργείται το ανάλογο κόστος. Αυτό συμβαίνει διότι ο μέσος όρος των καθυστερήσεων δεν μας δίνει καμία πληροφορία για την κατανομή των καθυστερήσεων.

Παρατηρούμε ότι για τις επιλογές του περιορισμού μετακίνησης θέσης από 4 έως 9 το ποσοστό των πτήσεων με καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών αυξάνεται με τοπικό μέγιστο την επιλογή 9 όπου παρουσιάζει ποσοστό 78.53% που σημαίνει ότι κατά μέσο όρο στα 30 αεροσκάφη όπου προσεγγίζουν τον αερολιμένα μέσα σε 25 λεπτά τα 23 από αυτά θα έχουν καθυστέρηση κάτω των 15 λεπτών με αποτέλεσμα να θεωρούνται ότι έφτασαν στην ώρα τους (**on-time**) ενώ τα υπόλοιπα θα έχουν καθυστερήσεις που κυμαίνονται από 16-30 λεπτά.

Αντιλαμβανόμαστε ότι για αυτό το σενάριο δεν υπάρχει λόγος να έχουμε μετακίνηση θέσεων μεγαλύτερη των 9 θέσεων διότι η επιλογή αυτή όπως είδαμε μας δίνει λύσεις με μικρό μέσο όρο και ταυτόχρονα το 75% των αεροσκαφών να μετακινείται κατά μέσο όρο από 0-3 θέσεις και το 95 % από 0-6 θέσεις όπως φαίνεται και στο ιστόγραμμα 7. Επίσης η επιλογή αυτή κατέχει και το μεγαλύτερο ποσοστό πτήσεων με καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών κάτι που συμφέρει οικονομικά και τις αεροπορικές εταιρίες και τα αεροδρόμια.

Στο παρακάτω ιστόγραμμα 10 παρουσιάζουμε ένα άλλο μειονέκτημα του αλγορίθμου **C1H** το οποίο είναι η τοποθέτηση των βαρέων αεροσκαφών στο τέλος της ακολουθίας πολύ συχνά ανεξάρτητα από το ποια ήταν η αρχική τους θέση. Έτσι το ιδανικό θα ήταν τα βαριά αεροσκάφη να εμφανίζονται προς το τέλος του κάθε σετ έτσι ώστε να μην μετακινούνται πολύ από την αρχική τους θέση αλλά και μην επηρεάζουν τα μικρότερα αλλά αυτό δεν συμβαίνει στην πράξη πάντα.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι τα αεροσκάφη αυτά επιβαρύνονται με τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις λόγω της μεγάλης μετακίνησης συγκριτικά με τα υπόλοιπα αεροσκάφη της εκάστοτε ακολουθίας. Προσομοιώνουμε αρκετές φορές το έντονο σενάριο κυκλοφοριακής συμφόρησης 30 αεροσκάφη /25 λεπτά και αποκτούμε στοιχεία για 60000 πτήσεις ώστε το δείγμα να είναι μεγάλο.



Ιστόγραμμα 10

Ύστερα από τις απαραίτητες προσομοιώσεις έχουμε στην διάθεση μας στοιχεία όσον αφορά την μετακίνηση των αεροσκαφών από την αρχική τους θέση και τον τύπο του κάθε αεροσκάφους .

Έχουμε χωρίσει την μετακίνηση στην θέση σε 4 κατηγορίες όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο ιστόγραμμα 10 και έχουμε συμπεριλάβει τους 4 τύπους των αεροσκαφών.

Παρατηρούμε ότι για τα αεροσκάφη τύπου 2,3,4 σχεδόν το 98% μετακινείται από την αρχική του θέση από 1 έως 10 θέσεις ενώ το αντίστοιχο ποσοστό μετακίνησης θέσης για τα αεροσκάφη τύπου 1 είναι μόλις 75%. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος 'δίνει' προτεραιότητα στα αεροσκάφη τύπου 2,3,4 διότι έτσι είναι αποτελεσματικότερη η μείωση του αθροίσματος των καθυστερήσεων.

Στην επόμενη κατηγορία η οποία είναι για μετακίνηση θέσεων από 11 έως και 15 θέσεις παρατηρούμε πολύ χαμηλά ποσοστά για τα αεροσκάφη τύπου 2,3,4 τα οποία είναι 1.79%,0.93%,3.97% αντίστοιχα, ενώ τα αεροσκάφη τύπου 1 εμφανίζουν ποσοστό 15.3% πολύ μεγαλύτερο δηλαδή από τους υπόλοιπους τύπους αεροσκαφών.

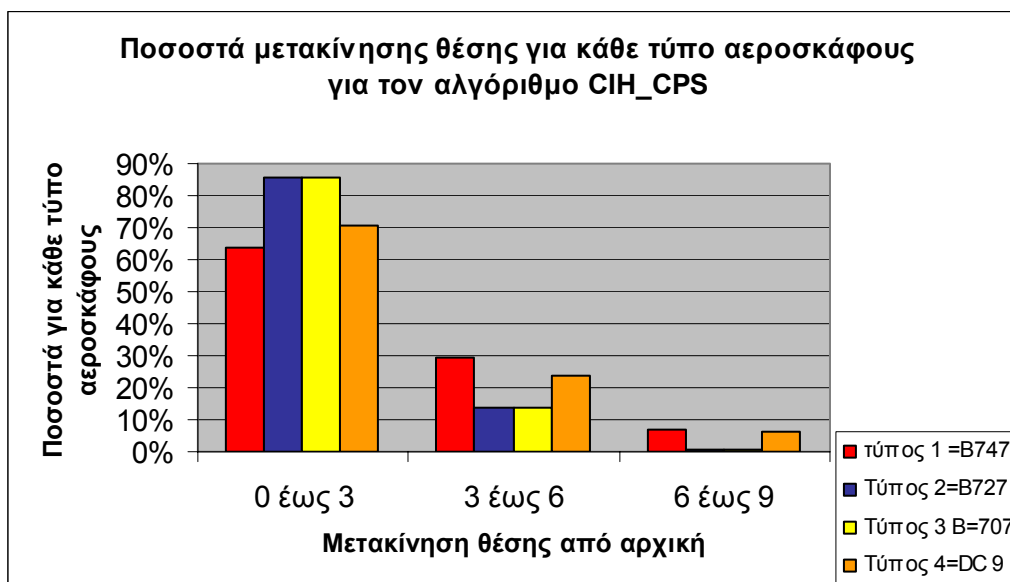
Στην ακόμη μεγαλύτερη μετακίνηση θέσεων από 16 έως και 20 θέσεις τα αεροσκάφη τύπου 2,3 εμφανίζουν μηδενικό ποσοστό ενώ τα αεροσκάφη τύπου 4 εμφανίζουν το ποσοστό της τάξης του 0.34% μόνο. Αντιθέτως τα αεροσκάφη τύπου 1 εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένο ποσοστό σε σχέση με τα υπόλοιπα, της τάξης του 7.4%. Τέλος τα αεροσκάφη τύπου 1 είναι τα μόνα που εμφανίζουν μετακίνηση θέσης από 21 θέσης και άνω με ποσοστό 1.70%.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι τα αεροσκάφη τύπου 1 εμφανίζουν μεγάλη μετακίνηση θέσεων από την αρχική τους και έχουν μεγάλες καθυστερήσεις μιας και περιμένουν να προσγειωθούν τα υπόλοιπα πριν από αυτά.

Προφανώς αυτό δεν είναι δίκαιο για αυτές τις πτήσεις και έτσι πρέπει να υπάρχει ένα όριο στην μετακίνηση θέσης από την αρχική τους .

Η λύση και σε αυτό το πρόβλημα του αλγορίθμου CIH έρχεται από τον περιορισμό μετακίνησης θέσης όπου ο αλγόριθμος CIH _CPS δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα συνολικά .Δηλαδή δεν βελτιστοποιεί την ακολουθία θεωρώντας και τα 30 αεροσκάφη ,αλλά βελτιστοποιεί την ακολουθία κατά ομάδες .Έτσι τα αεροσκάφη μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου παραμένουν στην αρχική τους ομάδα αλλά σε διαφορετική θέση από την αρχική.

Στο παρακάτω ιστόγραμμα 11 παραθέτουμε τα αποτελέσματα για τα ίδια στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε για να κατασκευάσουμε το ιστόγραμμα 10 ,μόνο που σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα προέρχονται από την εκτέλεση του αλγορίθμου CIH CPS με περιορισμό μετακίνησης θέσης μέχρι 9 θέσεις.



Ιστόγραμμα 11

Παρατηρούμε ότι όλοι οι τύποι αεροσκαφών παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά στην μικρότερη κατηγορία μετακίνησης θέσης όπου αντιστοιχεί σε μετακίνηση θέσης από 0 έως 3 θέσεις. Τα μεγαλύτερα ποσοστά τα παρουσιάζουν οι τύποι αεροσκαφών 2,3 όπου είναι 85.53% και 85.5% αντίστοιχα, ακολουθεί ο τύπος 4 με ποσοστό 70% και ο τύπος 1 με ποσοστό 65%.

Στην επόμενη κατηγορία μετακίνησης θέσης από 3 έως 6 τα ποσοστά για τα αεροσκάφη τύπου 2,3 είναι χαμηλά της τάξης του 13.65%, 13.59% αντίστοιχα. Για τα αεροσκάφη τύπου 1 το ποσοστό ανέρχεται περίπου στο 30 % αυτό σημαίνει ότι το 94% των αεροσκαφών μετακινούνται από 0 έως 6 θέσεις, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τον αλγόριθμο CIH είναι μόνο 58.71% βλέπουμε το κέρδος για τα αεροσκάφη του τύπου 1 (τα βαρύτερα της κατηγορίας) από την χρήση του περιορισμού μετακίνησης θέσης. Με λίγα λόγια ο περιορισμός αυτός αντιμετώπισε το μειονέκτημα του αλγορίθμου CIH σε μεγάλο βαθμό όπου παρατηρούσαμε μεγάλες μετακινήσεις των αεροσκαφών αυτού του τύπου. Εν συνεχεία τα αεροσκάφη τύπου 4 παρουσιάζουν μετακίνηση θέσεων από 3 έως 6 θέσεις σε ποσοστό 23.52%.

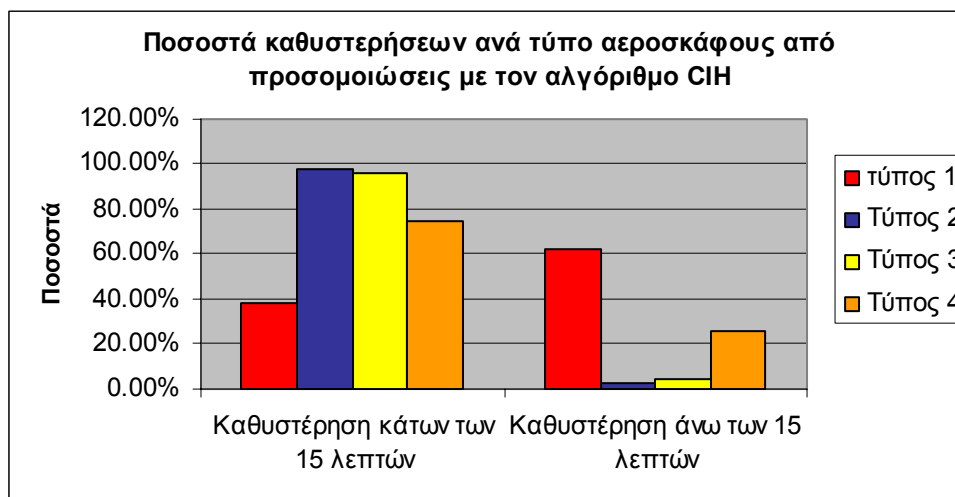
Στην τελευταία κατηγορία μετακίνησης θέσης από 6 έως 9 θέσεις το ποσοστό για τα αεροσκάφη τύπου 1 είναι 6 % όπως και για τα αεροσκάφη τύπου 4. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τα αεροσκάφη τύπου 2,3 είναι 0.82% και 0.91% αντίστοιχα.

Γενικά παρατηρούμε ότι τα αεροσκάφη τύπου 1 και 4 παρουσιάζουν αυξημένα ποσοστά σε σχέση με τα υπόλοιπα στις κατηγορίες 3-6, 6-9 αυτό οφείλεται στο ότι τα αεροσκάφη τύπου 1 είναι τα βαρύτερα και τα αεροσκάφη τύπου 4 τα ελαφρύτερα όποτε πρέπει να μετακινούνται περισσότερο για να μην επηρεάζουν τα υπόλοιπα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όποιος τύπος αεροσκάφους (2,3,4) τοποθετηθεί πίσω από αεροσκάφος τύπου 1 θα καθυστερήσει αρκετά να προσγειωθεί αφού το αεροσκάφος τύπου 1 είναι το βαρύτερο και έχει και τους μεγαλύτερους ελάχιστους χρόνους μεταξύ αφίξεων, όποτε βολεύει να τοποθετείται πίσω από τους τύπους 2,3,4 για να μειώνονται οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων.

Ομοίως τα αεροσκάφη τύπου 4 όπως ήδη έχουμε τονίσει στο κεφάλαιο 2.1 είναι τα ελαφρύτερα από τα 1,2,3, αυτό συνεπάγεται ότι οποιοδήποτε αεροσκάφος προσγειώνεται πριν από αυτά προκαλεί και αυξημένο ελάχιστο χρονικό διάστημα προσγείωσης για τα αεροσκάφη τύπου 4. Έτσι τα αεροσκάφη αυτών των τύπων αναγκάζονται να μετακινούνται περισσότερο από τα αεροσκάφη τύπου 2,3.

Όπως είπαμε παραπάνω οι τύποι των αεροσκαφών 1 και 4 παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις σε σχέση με τα αεροσκάφη τύπου 2 και 3 όταν η βελτιστοποίηση γίνεται από τον αλγόριθμο CIH. Στο παρακάτω ιστόγραμμα 12 βλέπουμε τα ποσοστά καθυστερήσεων άνω των 15 λεπτών και κάτω 15 λεπτών για κάθε τύπο αεροσκάφους που δημιουργεί ο αλγόριθμος. Τα δεδομένα για την

κατασκευή του ιστογράμματος 12 είναι κοινά με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για το ιστόγραμμα 10.

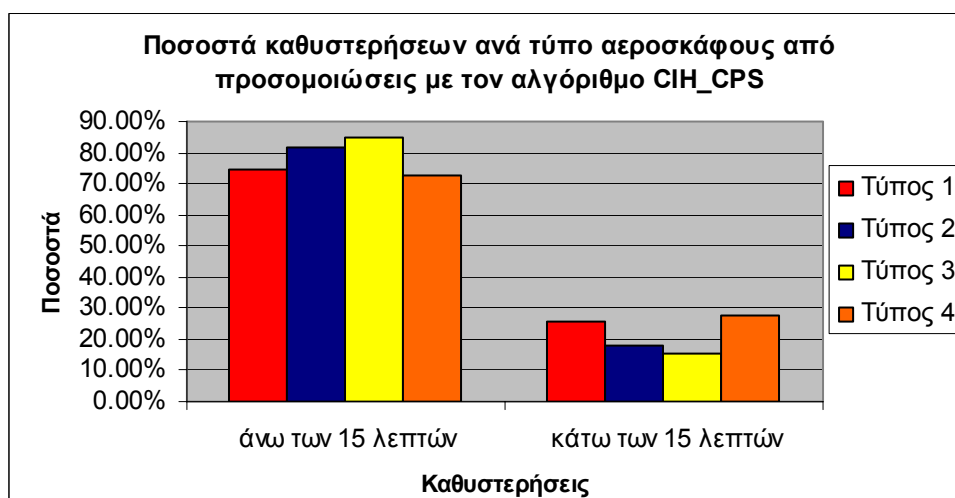


Ιστόγραμμα 12

Στο ιστόγραμμα 12 παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των αεροσκαφών τύπου 1 (61.88%) παρουσιάζει καθυστέρηση άνω των 15 λεπτών αυτό σημαίνει ότι κατά μέσο όρο 6 στα 10 αεροσκάφη τύπου 1 σε μια ακολουθία 30 αεροσκαφών θα επιβαρυνθούν με καθυστερήσεις άνω των 15 λεπτών ενώ τα αεροσκάφη τύπου 2 και 3 παρουσιάζουν καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών σε ποσοστά 97.55% και 95.57% αντίστοιχα.

Επίσης τα αεροσκάφη τύπου 4 παρουσιάζουν καθυστερήσεις άνω των 15 λεπτών σε αυξημένο ποσοστό της τάξης του 25.75% την στιγμή που τα αντίστοιχα ποσοστά για τα αεροσκάφη τύπου 2 και 3 είναι 2.45% και 4.43% αντίστοιχα.

Τα αυξημένα ποσοστά καθυστερήσεων άνω των 15 λεπτών κυρίως για τα αεροσκάφη τύπου 1 αλλά και για τα αεροσκάφη τύπου 4 μπορούν να μειωθούν με την χρήση του αλγορίθμου CIH_CPS. Στο παρακάτω ιστόγραμμα 13 του αλγορίθμου CIH_CPS βλέπουμε την βελτίωση συγκριτικά με το ιστόγραμμα 12 του αλγορίθμου CIH. Για την κατασκευή του ιστογράμματος 13 χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για το ιστόγραμμα 12, επίσης θέτουμε ως περιορισμό μετακίνησης θέσης τον αριθμό 9 που όπως δείξαμε είναι η καλύτερη επιλογή για αυτό το σενάριο.



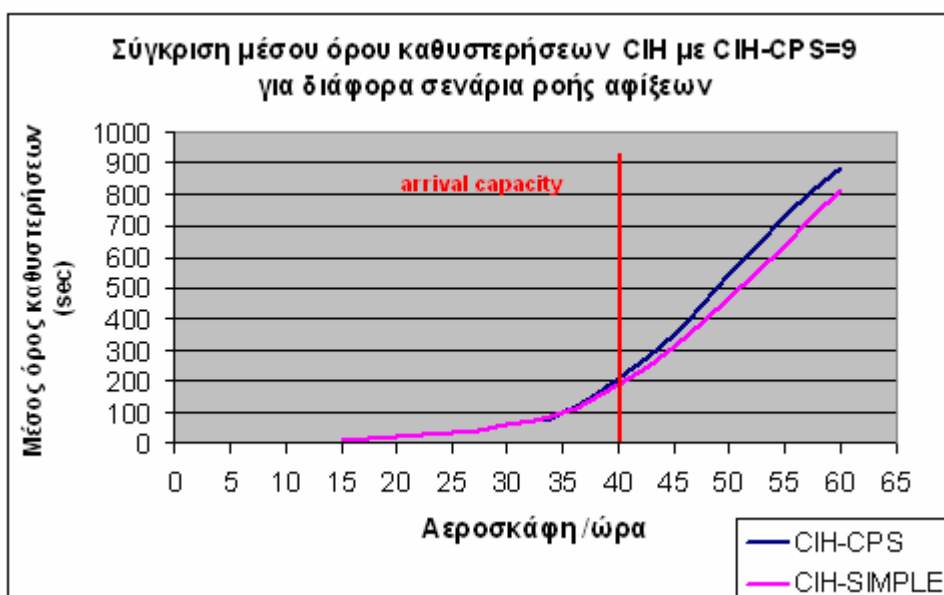
Ιστόγραμμα 13

Στο ιστόγραμμα 13 παρατηρούμε ότι οι καθυστερήσεις ανά τύπο είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένες σε σύγκριση με την κατανομή που δημιουργεί για τα ίδια

δεδομένα ο αλγόριθμος CIIH .Το ποσοστό καθυστερήσεων άνω των 15 λεπτών για τον τύπο αεροσκαφών 1 μειώθηκε από **61.88%** του αλγορίθμου CIIH στο 25.65 % με τον αλγόριθμο CIIH_CPS ,βλέπουμε λοιπόν την βελτίωση που μας προσφέρει η χρήση περιορισμού μετακίνησης θέσης . Όσον αφορά τα αεροσκάφη τύπου 4 τα αεροσκάφη έμειναν σχεδόν στα ίδια επίπεδα ενώ τα αεροσκάφη τύπου 2 και 3 αύξησαν τα ποσοστά τους στις καθυστερήσεις άνω των 15 λεπτών .

Βλέπουμε λοιπόν από την κατανομή αυτή στο ιστόγραμμα 13 ότι η χρήση του περιορισμού στον αλγόριθμο CIIH_CPS διαχειρίζεται τους προβληματικού τύπους αεροσκαφών (1,4) πιο δίκαια από τον αλγόριθμο CIIH κατανέμοντας πιο δίκαια τις καθυστερήσεις στους διάφορους τύπους των αεροσκαφών.

Έχει αρκετό ενδιαφέρον να δούμε στην συνέχεια την γραφική παράσταση του μέσου όρου των καθυστερήσεων συναρτήσει της κυκλοφοριακής συμφόρησης .Προσμοιώνουμε για αυτόν το σκοπό διάφορα σενάρια κυκλοφοριακής συμφόρησης και υπολογίζουμε για κάθε ένα από αυτά τον μέσο όρο των καθυστερήσεων και για τις δύο μεθόδους ,δηλαδή για τον αλγόριθμο CIIH και τον αλγόριθμο CIIH_CPS .

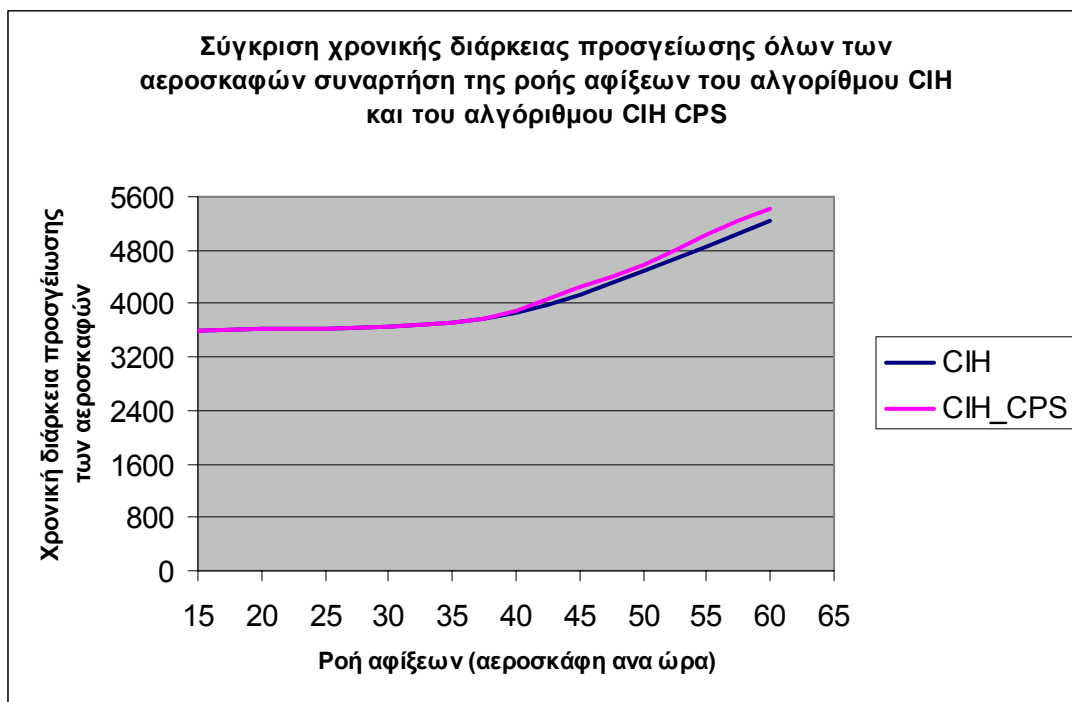


Γράφημα 3

Στο παραπάνω γράφημα 3 παρατηρούμε ότι οι δύο μέθοδοι προγραμματισμού της ακολουθίας παρουσιάζουν την ίδια απόδοση για ροή αφίξεων μικρότερης ή ίσης της χωρητικότητας που είναι 35-40 αεροσκάφη/ώρα.

Για ροή αφίξεων που υπερβαίνει την χωρητικότητα ενός απλού αεροδιαδρόμου η διαφορά των δύο μεθόδων είναι μικρή ,με λίγο καλύτερη απόδοση όσον αφορά τους μέσους όρους καθυστέρησης να την παρουσιάζει ο αλγόριθμος CIIH ο οποίος δεν έχει περιορισμό στην μετακίνηση θέσεων.

Με αυτό το γράφημα αποδεικνύουμε ότι ο περιορισμός μετακίνησης θέσης μπορεί να περιορίζει την εύρεση της “καλύτερης” ακολουθίας υπό το πρίσμα του μέσου όρου καθυστερήσεων όμως η διαφορά που προκαλεί αυτός ο περιορισμός δεν είναι σημαντική και ταυτόχρονα αντιμετωπίζει και βελτιώνει όλα τα μειονεκτήματα του αλγορίθμου CIIH τα οποία είναι σημαντικά όπως είδαμε στα παραπάνω ιστογράμματα. Μια άλλη παράμετρος που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι η συνολική χρονική διάρκεια προσγείωσης του κάθε σετ (ροή αφίξεων) στο παρακάτω γράφημα 4 παρουσιάζουμε την απόδοση του αλγορίθμου CIIH και του αλγορίθμου CIIH_CPS για μέγιστη μετακίνηση θέσεων ίση με 9 θέσεις.



Γράφημα 4

Στο γράφημα 4 παρατηρούμε ότι οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν στα περισσότερα σενάρια ροής αφίξεων την ίδια απόδοση ακριβώς. Για αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση άνω των 40 αεροσκαφών /ώρα υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο αλγορίθμων αλλά είναι ελάχιστη, με λίγο καλύτερη την απόδοση που παρουσιάζει ο αλγόριθμος CIH.

Έτσι και σε αυτό το σημείο ο αλγόριθμος CIH_CPS αποδεικνύεται αποτελεσματικός με ελάχιστη διαφορά από τον αλγόριθμο CIH αλλά και αντιμετωπίζοντας ταυτόχρονα όλα τα μειονέκτημα του αλγορίθμου CIH πολύ αποτελεσματικά.

3.5 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ RECEDING HORIZON CONTROL

Ο ευρετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε για να λύσουμε το πρόβλημα του προγραμματισμού ακολουθίας προσγείωσης CIH έχει και άλλες παραλλαγές που έχουν χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές για να λύσουν με διαφορετικό τρόπο το πρόβλημα αυτό. Μια σημαντική παραλλαγή του αλγορίθμου CIH βρίσκεται στο επιστημονικό paper: “ **Receding Horizon Control for Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling** ” το οποίο συντάχθηκε από τους Hiao-Bing Hu και Wen Huan Chen.

Σε αυτό το επιστημονικό έγγραφο γίνεται λόγος για την εφαρμογή των αλγορίθμων στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας και γενικότερα στο **air traffic management**. Παρουσιάζεται διεξοδικά μια εκδοχή-παραλλαγή του αλγορίθμου CIH και συγκρίνεται με ένα αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού. Η εκδοχή του αλγορίθμου **CIH** ο οποίος ονομάζεται **RHC** αποδεικνύεται αποδοτικός για εφαρμογή **on-line** δεδομένων και είναι **real time**.

Δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πραγματικά δεδομένα κυκλοφοριακής ροής και να προγραμματίζει την σειρά προσγείωσης των αεροσκαφών όταν απαιτείται και αυτό οφείλεται στο ότι είναι αρκετά γρήγορος στους υπολογισμούς του. Σε αυτό το σημείο πρέπει να θυμίσουμε ότι ένα αεροδρόμιο γνωρίζει τα αεροσκάφη που πλησιάζουν για προσγείωση αρκετή ώρα πριν (περίπου 40 λεπτά) για να έχει τον χρόνο να προετοιμαστεί και να προγραμματίσει την σειρά αφίξεων.

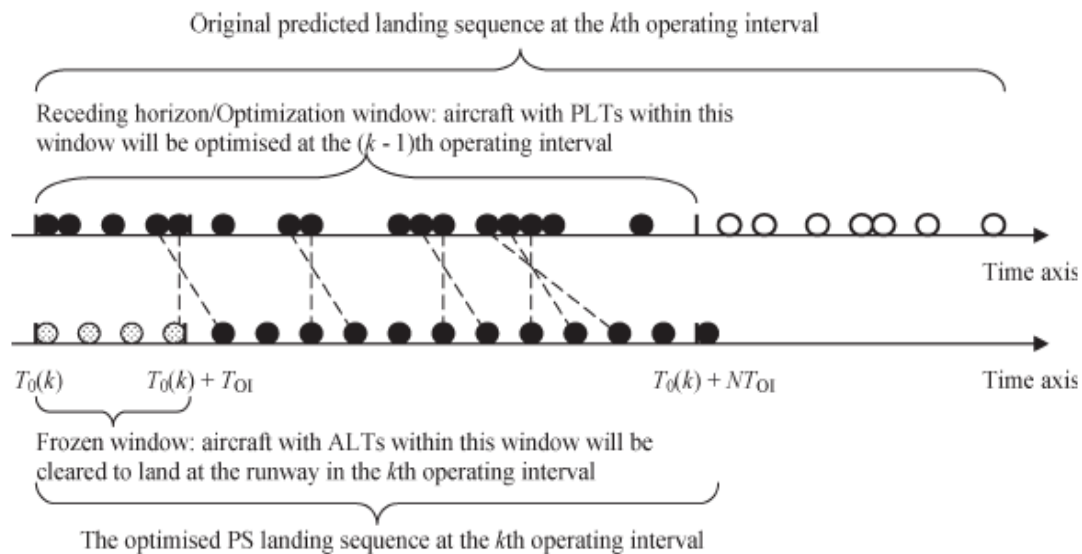
Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται όπως είπαμε στον αλγόριθμο CIH όσον αφορά τον τρόπο που βελτιστοποιεί, όμως προκειμένου να αντιμετωπίσει τα μειονεκτήματα του όπως π.χ μεγάλες μετακινήσεις μερικών αεροσκαφών από τις αρχικές τους θέσεις με παράλληλα μεγάλες αποκλίσεις στις καθυστερήσεις από τον μέσο όρο (προς τα πάνω) εισάγει τον όρο χρονικό ορίζοντα το οποίο είναι ένα παράθυρο βελτιστοποίησης. Αυτό το παράθυρο καταλαμβάνει ένα χρονικό διάστημα και κινείται κατά μήκος του άξονα των χρόνων. Το κάθε παράθυρο (χρονικός ορίζοντας) αποτελείται από N λειτουργικά χρονικά διαστήματα τα οποία καταλαμβάνουν χρόνο T το κάθε ένα.

Τα N και T είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες που προσδιορίζουν την απόδοση του αλγορίθμου μιας και ορίζουν τον αριθμό των αεροσκαφών που θα συμπεριλαμβάνονται σε κάθε λειτουργικό χρονικό διάστημα T και θα βελτιστοποιούνται κάνοντας αλλαγές στις αρχικές τους θέσεις.

Κάθε λειτουργικό διάστημα ξεκινά από την χρονική στιγμή $T_N = T_{N-1} + (N-1) \times T$ και τελειώνει την χρονική στιγμή $T_N + N \times T$ για $N = 1, 2, 3, 4, \dots, N$. Τα αεροπλάνα με $PLT[i]$ (προτιμώμενος χρόνος προσγείωσης) που ανήκουν μέσα στο χρονικό διάστημα αυτό θεωρούνται ως μια ομάδα αεροσκαφών (κάθε φορά) η οποία πρέπει να βελτιστοποιηθεί κάνοντας τις απαραίτητες αλλαγές στις θέσεις, τα υπόλοιπα αεροσκάφη θα συμπεριληφθούν στο επόμενο λειτουργικό διάστημα που τους αφορά χρονικά.

Στην συνέχεια τα αεροσκάφη προγραμματίζονται και τοποθετούνται σε μια σειρά ή ακολουθία προσγείωσης από τον αλγόριθμο CIH ο οποίος κάνει τις απαραίτητες αλλαγές στις αρχικές θέσεις των αεροσκαφών. Σε κάθε αεροπλάνο που βρίσκεται μέσα σε αυτό το λειτουργικό διάστημα δίνεται ο πραγματικός χρόνος προσγείωσης $ALT[i]$ και υπολογίζεται η καθυστέρηση που θα έχει καθώς και πόσες θέσεις μετακινήθηκε από την αρχική του. Σαν επόμενο βήμα του αλγορίθμου RHC είναι να επιτρέπει την προσγείωση των αεροσκαφών που έχουν $ALT[i]$ μέσα στο λειτουργικό χρονικό διάστημα N , αντίθετα τα αεροσκάφη που έχουν $ALT[i]$ που υπερβαίνει το λειτουργικό διάστημα N μεταφέρονται για βελτιστοποίηση και προγραμματισμό στο επόμενο λειτουργικό διάστημα $N+1$. Τα παραπάνω που περιγράψαμε φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :

Αυτά τα λειτουργικά χρονικά διαστήματα είναι περίπου κάτι ανάλογο με την λογική που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος CIH_CPS ο οποίος χωρίζει τα αεροσκάφη ανά ομάδες των $CPS = 4, 5, 6, \dots, N_{ac}$ αεροσκαφών όπως ήδη εξηγήσαμε στην παράγραφο 3.3. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε σχηματικά αυτά που περιγράψαμε παραπάνω για τον τρόπο που λειτουργεί ο αλγόριθμος RHC.



Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου του αλγορίθμου RHC (Receding Horizon Control) σε σχέση με την μέθοδο που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος CIIH με τον περιορισμό CPS είναι ότι δεν εγγυάται απόλυτα την περιορισμένη μετακίνηση θέσεων για κάθε αεροσκάφος .

Αυτό συμβαίνει διότι όπως εξηγήσαμε σε κάθε βελτιστοποιημένο λειτουργικό διάστημα τα αεροσκάφη που έχουν $Alt[i]$ που υπερβαίνει τα όρια αυτού μεταφέρονται στο επόμενο λειτουργικό διάστημα και αυτό μπορεί να συμβεί αρκετές φορές με αποτέλεσμα να μπορούν να υπάρξουν μεγάλες μετακινήσεις από τις αρχικές θέσεις σε κάποια αεροσκάφη.

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε το σενάριο 30 αεροσκάφη /23 λεπτά το οποίο επιλύεται με τον αλγόριθμο CIIH_CPS και με τον αλγόριθμο RHC.Στον αλγόριθμο RHC με βάση το επιστημονικό έγγραφο η λύση προέρχεται θέτοντας $T= 5$ λεπτά (χρονικό διάστημα) και $N=9$ (λειτουργικά διαστήματα) .

Αρχικά παραθέτουμε τα δεδομένα του προβλήματος, όπου είναι οι προτιμώμενοι χρόνοι άφιξης, ο τύπος και ο αριθμός κάθε αεροσκάφους όπου συμπίπτει με την αρχική θέση τους στην ακολουθία :

| Αριθμός αεροσκάφους | Τύπος αεροσκάφους | Προτιμώμενος χρόνος άφιξης PLT (sec) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1 | 4 | 17 |
| 2 | 2 | 50 |
| 3 | 1 | 117 |
| 4 | 3 | 129 |
| 5 | 4 | 143 |
| 6 | 1 | 174 |
| 7 | 3 | 217 |
| 8 | 1 | 260 |
| 9 | 3 | 288 |
| 10 | 4 | 340 |
| 11 | 4 | 350 |
| 12 | 2 | 505 |
| 13 | 2 | 526 |
| 14 | 4 | 541 |
| 15 | 4 | 554 |
| 16 | 3 | 590 |
| 17 | 4 | 648 |
| 18 | 1 | 651 |
| 19 | 2 | 669 |
| 20 | 3 | 691 |
| 21 | 1 | 707 |
| 22 | 3 | 762 |
| 23 | 4 | 769 |
| 24 | 2 | 792 |
| 25 | 4 | 859 |
| 26 | 1 | 993 |
| 27 | 2 | 1064 |
| 28 | 4 | 1077 |
| 29 | 4 | 1207 |
| 30 | 1 | 1401 |

Σε αυτό το σενάριο έχουν συμπεριληφθεί όλοι οι τύποι των αεροσκαφών (1,2,3,4), έτσι θεωρούμε 30 αεροσκάφη τα οποία προσεγγίζουν τον αεροδιάδρομο μέσα σε 23 λεπτά συνολικά, οι χρόνοι είναι τυχαίοι μεταξύ των αφίξεων όπως και στην πραγματικότητα συμβαίνει σε ένα αεροδρόμιο σε περίοδο κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε την λύση από τον αλγόριθμο **RHC** και την λύση από τον αλγόριθμο **CIH_CPS** για περιορισμό μέγιστης μετακίνησης θέσης ίσο με 10. Σε αυτόν τον πίνακα φαίνεται ο πραγματικός χρόνος προσγείωσης, η καθυστέρηση για κάθε αεροσκάφος, η αλλαγή από την αρχική του θέση, και η θέση του στην ακολουθία για κάθε έναν αλγόριθμο. Επίσης φαίνονται οι υπολογισμοί των μέσων όρων και της τυπικής απόκλισης στα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν, όπου είναι οι καθυστερήσεις και η αλλαγή των αεροσκαφών από τις αρχικές τους θέσεις.

| Λύση αλγορίθμου RHC | | | | Λύση αλγορίθμου CIH_CPS | | | |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------|
| Αριθμός αεροσκάφους | Πραγματικός χρόνος προσγείωσης (sec) | Καθυστέρηση (sec) | Αλλαγή θέσης | Αριθμός αεροσκάφους | Πραγματικός χρόνος προσγείωσης (sec) | Καθυστέρηση (sec) | Αλλαγή θέσης |
| 1 | 17 | 0 | 0 | 1 | 17 | 0 | 0 |
| 2 | 97 | 47 | 0 | 2 | 97 | 47 | 0 |
| 4 | 167 | 38 | 1 | 4 | 167 | 38 | 1 |
| 7 | 237 | 20 | 3 | 7 | 237 | 20 | 3 |
| 9 | 307 | 19 | 4 | 9 | 307 | 19 | 4 |
| 6 | 379 | 205 | 0 | 5 | 437 | 294 | 1 |
| 8 | 475 | 215 | 1 | 10 | 527 | 187 | 3 |
| 3 | 571 | 454 | 5 | 3 | 599 | 267 | 3 |
| 16 | 752 | 162 | 7 | 6 | 695 | 572 | 6 |
| 20 | 822 | 131 | 10 | 8 | 791 | 611 | 4 |
| 22 | 892 | 130 | 11 | 18 | 887 | 621 | 3 |
| 12 | 992 | 487 | 0 | 16 | 1068 | 326 | 6 |
| 13 | 1072 | 546 | 0 | 20 | 1138 | 366 | 8 |
| 19 | 1152 | 483 | 5 | 12 | 1238 | 664 | 2 |
| 24 | 1232 | 440 | 9 | 13 | 1318 | 633 | 5 |
| 27 | 1312 | 248 | 11 | 19 | 1398 | 632 | 6 |
| 10 | 1422 | 1082 | 7 | 11 | 1508 | 989 | 5 |
| 11 | 1512 | 1162 | 7 | 14 | 1598 | 1048 | 5 |
| 14 | 1602 | 1061 | 5 | 15 | 1688 | 985 | 0 |
| 15 | 1692 | 1138 | 5 | 17 | 1778 | 1223 | 6 |
| 17 | 1782 | 1134 | 4 | 23 | 1868 | 1300 | 6 |
| 23 | 1872 | 1103 | 1 | 25 | 1958 | 1296 | 5 |
| 25 | 1962 | 1103 | 2 | 28 | 2048 | 1265 | 0 |
| 28 | 2052 | 975 | 4 | 29 | 2138 | 1265 | 1 |
| 29 | 2142 | 935 | 4 | 24 | 2218 | 1137 | 3 |
| 5 | 2232 | 2089 | 21 | 27 | 2298 | 1097 | 3 |
| 18 | 2304 | 1653 | 9 | 22 | 2368 | 1592 | 3 |
| 21 | 2400 | 1693 | 7 | 21 | 2440 | 1400 | 1 |
| 30 | 2496 | 1095 | 1 | 26 | 2536 | 1543 | 3 |
| 26 | 2592 | 1599 | 4 | 30 | 2632 | 1231 | 0 |
| | Μέσος όρος | 714.9 | 4.93 | | Μέσος όρος | 755 | 3.2 |
| | Απόκλιση | 594.64 | 4.58 | | Απόκλιση | 513 | 2.3 |

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε τις λύσεις που προκύπτουν από τους δύο αλγορίθμους RHC, CIH_CPS για το ίδιο σενάριο αλλά και για τα ίδια δεδομένα τα οποία βρίσκονται στην προηγούμενη σελίδα.

Παρατηρούμε ότι οι δύο ακολουθίες που προκύπτουν είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους ,για παράδειγμα η λύση του αλγορίθμου RHC προκαλεί στο αεροσκάφος με αριθμό 5 μετακίνηση από την αρχική του θέση 21 θέσεις ,προκαλώντας του καθυστέρηση 34 λεπτά ή 2089 sec , ενώ στον αλγόριθμο CIH_CPS δεν παρατηρείται τέτοιο φαινόμενο εξαιτίας του περιορισμού μετακίνησης θέσης .Επίσης όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην λύση του αλγορίθμου CIH_CPS δεν υπάρχει αεροσκάφος με καθυστέρηση άνω των 26 λεπτών ή 1592 sec αλλά και αεροσκάφος με μετακίνηση πάνω από 8 θέσεις παρόλο που το όριο που εμείς έχουμε θέσει είναι 10.

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο όπως αρκετές φορές έχουμε τονίσει είναι το συνολικό χρονικό διάστημα που χρειάζεται για την προσγείωση ενός σκετ αεροσκαφών (30 στην περίπτωση μας).Για να το υπολογίσουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο $T_{length} = \max[talt(1), talt(2), \dots, talt(Nac)] - \min[talt(1), talt(2), \dots, talt(Nac)]$ όπου Nac είναι ο αριθμός των αεροσκαφών που θεωρούμε στο πρόβλημα μας. Έτσι ο αλγόριθμος RHC προσγειώνει τα 30 αεροσκάφη μέσα σε χρονικό διάστημα 2575 sec 42,91 λεπτών ενώ ο αλγόριθμος CIH_CPS μέσα σε χρονικό διάστημα 43.5 λεπτών ή 2615 sec. Όπως βλέπουμε η διαφορά είναι πολύ μικρή μεταξύ των δύο χρονικών διαστημάτων.

Ο μέσος όρος των καθυστερήσεων για τον αλγόριθμο RHC είναι 714 sec ενώ για τον αλγόριθμο CIH_CPS είναι 755 sec όμως το σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου CIH_CPS είναι η μικρότερη τυπική απόκλιση που παρουσιάζει , η οποία είναι κατά 81 sec ή κατά 1.3 λεπτά μικρότερη. Πρέπει να τονίσουμε ότι ένα καλύτερος μέσος όρος καθυστερήσεων δεν είναι απόλυτα πλεονέκτημα όταν η τυπική απόκλιση είναι μεγάλη και κάποια αεροσκάφη απέχουν πολύ από τον μέσο όρο των καθυστερήσεων.

Επίσης η διαφορά των δύο μέσων όρων είναι μικρή και ισούται με 40 δευτερόλεπτα για κάθε αεροσκάφος ,όμως τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου CIH_CPS είναι πολύ σημαντικότερα όπως το ότι η μετακίνηση των αεροσκαφών από τις αρχικές θέσεις τους πρακτικά είναι 3 ± 2 θέσεις ενώ για τον αλγόριθμο RHC είναι 5 ± 5 δηλαδή και μεγαλύτερος μέσος όρος και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση.

Το επόμενο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ο αλγόριθμος CIH_CPS κρατάει σε χαμηλά επίπεδα τις καθυστερήσεις των αεροσκαφών που υπερβαίνουν τα 15 λεπτά . Αντίθετα ο αλγόριθμος RHC παρουσιάζει αεροσκάφη με καθυστέρηση άνω των 25 λεπτών έως και 34 λεπτών όταν η μέγιστη καθυστέρηση στον αλγόριθμο CIH_CPS είναι 26 λεπτά .

Επομένως για αυτά τα δεδομένα ο αλγόριθμος CIH_CPS κατανέμει καλύτερα τις καθυστερήσεις από ότι ο αλγόριθμος RHC με την έννοια ότι δεν παρουσιάζει καθυστερήσεις άνω των 26 λεπτών, έχει μικρότερη απόκλιση στον μέσο όρο των καθυστερήσεων αλλά ταυτόχρονα έχει λίγο μεγαλύτερο μέσο όρο . Αυτό ήταν ένα τυπικό παράδειγμα για να παρουσιάσουμε την λογική κάθε ενός αλγορίθμου τονίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

4.ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε κάθε διεθνές αεροδρόμιο ανά τον κόσμο συμβαίνουν τυχαία γεγονότα όπως νέες αφίξεις προστίθενται στο πλάνο πτήσεων , ακυρώσεις πτήσεων, ανάγκη προσγείωσης ενός αεροσκάφους σε διαφορετικό προορισμό λόγω καιρικών συνθηκών ή βλάβης , με αποτέλεσμα ο προγραμματισμός εκ των προτέρων να αποδεικνύεται αναποτελεσματικός διότι αυτά τα γεγονότα συμβαίνουν ξαφνικά και δίχως καμία προειδοποίηση .Από την άλλη μεριά η ίδια η κυκλοφοριακή ροή και οι ανάγκες της (ζήτηση) ξεπερνούν την ικανότητα εξυπηρέτησης των αεροδρομίων δημιουργώντας κυκλοφοριακή συμφόρηση και προβλήματα όπως καθυστερήσεις και κόστη στις

αεροπορικές εταιρίες και μη ικανοποιημένους επιβάτες. Έτσι χρειάζεται απαραίτητα η σωστή διαχείριση τους την οποία αναλαμβάνει το **Air traffic management**.

Το **Air traffic management** οργανώνει τις πτήσεις, την σειρά αφίξεων και αναχωρήσεων ελέγχει και παρέχει την ασφάλεια μέσα στα κέντρα και τους τομείς ,παρέχει στους υπόλοιπους ελεγκτές τις απαραίτητες πληροφορίες για τον καλύτερο συντονισμό και γενικότερα συντονίζει την εναέρια κυκλοφορία με στόχο τις μικρότερες δυνατές καθυστερήσεις σε αφίξεις και σε αναχωρήσεις , παρέχοντας πάντα την απαραίτητη ασφάλεια που επιβάλλουν οι διεθνής κανονισμοί εναέριας κυκλοφορίας.

Μέχρι πρότεινος τα αεροδρόμια εφαρμόζαν ως πολιτική εξυπηρέτησης την **F.C.F.S** (first come first served) η οποία δέχεται και εξυπηρετεί την κυκλοφορία με την σειρά που εμφανίζεται στο σύστημα αεροδρόμιο .Από την στιγμή που η κυκλοφορία αυξήθηκε δραματικά παρατηρήθηκε ότι η πολιτική αυτή δεν χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τις δυνατότητες και την χωρητικότητα των αεροδρομίων προκαλώντας μεγάλες καθυστερήσεις ειδικά σε περιόδους αιχμής όπου η κυκλοφοριακή ροή ξεπερνά κατά πολύ ορισμένες φορές την χωρητικότητα του εκάστοτε διεθνούς αεροδρομίου .

Έτσι υπήρξε η ανάγκη συντονισμού και ο προγραμματισμός των πτήσεων έτσι ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλες καθυστερήσεις και τα κόστη που αυτές προκαλούν από την αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και από τις ρήτρες που επιβάλλει η σχετική νομοθεσία στα αεροδρόμια αλλά και στις αεροπορικές εταιρίες οι οποίες καλούνται να πληρώσουν τους πελάτες τους όταν η πτήση τους καθυστερεί πάνω από ένα όριο.

Ο προγραμματισμός αφίξεων γίνεται 1 με 2 μέρες πριν την πραγματική άφιξη των πτήσεων στο αεροδρόμιο το οποίο ονομάζεται πλάνο πτήσεων ,ωστόσο το πλάνο αυτό δίνει απλά μια ένδειξη για το τι πρόκειται να αντιμετωπίσει το αεροδρόμιο ,διότι στην πράξη το πλάνο αυτό μπορεί να μην ισχύσει λόγω τυχαίων γεγονότων που συμβαίνουν στην εναέρια κυκλοφορία όπου είναι ένα δυναμικό περιβάλλον γεμάτο αβεβαιότητα. Επομένως υπάρχει η ανάγκη ο προγραμματισμός των πτήσεων να γίνεται σε πραγματικό χρόνο (**Real time**) έτσι ώστε τα στοιχεία στα οποία βασίζεται να είναι πραγματικά δίχως την αβεβαιότητα των τυχαίων γεγονότων που περιέχει ένα πλάνο πτήσεων εκ των προτέρων.

Έτσι η λύση ήρθε από τον χώρο της επιχειρησιακής έρευνας όπου διάφοροι επιστήμονες σε συνεργασία με τους αρμόδιους φορείς ανέπτυξαν διάφορα λογισμικά τα οποία βοηθούν στον προγραμματισμό των πτήσεων σε πραγματικό χρόνο προς όφελος των αεροδρομίων των αεροπορικών εταιριών και των επιβατών. Τα λογισμικά αυτά είναι συνδεδεμένα με τα ραντάρ από τα οποία λαμβάνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες όσον αφορά τις πτήσεις που βρίσκονται σε πορεία προς το αεροδρόμιο.

Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τα χρονικά κενά μεταξύ των αεροσκαφών δηλαδή τον ρυθμό αφίξεων αεροσκαφών στον περιβάλλοντα χώρο του αεροδρομίου ,την ταχύτητα πτήσης ,την κατεύθυνση από την οποία έρχονται ,το τύπο του αεροσκάφους κτλ.

Στο πλαίσιο αυτό έχουν γραφτεί πολλοί αλγόριθμοι οι οποίοι αποτελούν το βασικό σημείο των λογισμικών αυτών. Ο κύριος στόχος τους είναι να καταφέρουν να προγραμματίσουν την σειρά αφίξεων με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε τις μικρότερες δυνατές καθυστερήσεις σε κάθε πτήση και επίσης να χρησιμοποιούν την ωριαία χωρητικότητα των αεροδιαδρόμων όσο πιο αποτελεσματικά γίνεται .

Αυτό σημαίνει ότι σε περιόδους αιχμής πρέπει η εξυπηρέτηση των αεροσκαφών ανά μονάδα χρόνου να είναι ίση με την χωρητικότητα του αεροδιαδρόμου για να μπορούμε να πούμε ότι ο προγραμματισμός αφίξεων είναι αποτελεσματικός.

Η πολιτική F.C.F.S όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3 δεν βοηθά ούτε στην μείωση των καθυστερήσεων αλλά ούτε και στην σωστή εκμετάλλευση της χωρητικότητας του αεροδρόμιου ,αντίθετα δημιουργεί καθυστερήσεις και μειώνει την ικανότητα του αεροδρομίου να δεχθεί αφίξεις δηλαδή μειώνει τον ρυθμό εξυπηρέτησης του. Αυτό συμβαίνει επειδή η πολιτική αυτή εξυπηρετεί τα αεροσκάφη με την σειρά που εμφανίζονται στο αεροδρόμιο με αποτέλεσμα κάποια αεροσκάφη που αφικνούνται διαδοχικά να είναι τέτοιων τύπων που να απαιτείται (βάση διεθνών κανονισμών)

μεγάλο χρονικό διάστημα ασφάλειας μεταξύ των αφίξεων μειώνοντας έτσι την χωρητικότητα του αεροδρομίου σε πολλές περιπτώσεις.

Έτσι ο τρόπος αντιμετώπισης του παραπάνω φαινομένου ήταν να γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές θέσεων στα αεροσκάφη από τις αρχικές τους έτσι ώστε να μειωθούν τα κενά μεταξύ των αφίξεων στον αεροδιάδρομο μειώνοντας τις καθυστερήσεις και το συνολικό χρόνο προσγείωσης ενός αριθμού αεροσκαφών. Ο ευρετικός αλγόριθμος C1H που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 3 είναι αποδοτικός όσον αφορά την μείωση των καθυστερήσεων αλλά και την μείωση του συνολικού χρόνου προσγείωσης ενός σετ αεροσκαφών.

Ο αλγόριθμος αυτός θεωρεί σε κάθε περίπτωση το σύνολο των αεροσκαφών ως στοιχεία προς επίλυση και στόχος του είναι να ελαχιστοποιεί το συνολικό άθροισμα των καθυστερήσεων όλων των αεροσκαφών. Το αποτέλεσμα είναι οι καθυστερήσεις των αεροσκαφών στα περισσότερα αυτά (ανάλογα την κυκλοφοριακή ροή) να είναι σε σχετικά μικρά επίπεδα αλλά σε κάποια άλλα να απέχουν πολύ από τον μέσο όρο έως και στο τριπλάσιο πολλές φορές. Με λίγα λόγια δηλαδή η τυπική απόκλιση του μέσου όρου των καθυστερήσεων είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα η κατανομή των καθυστερήσεων σε έναν αριθμό αεροσκαφών που θεωρούμε στο πρόβλημα να μην είναι αυτή που θα θέλαμε.

Αυτό όπως δείξαμε και στο κεφάλαιο 3 οφείλεται στην μεγάλη μετακίνηση κάποιων τύπων αεροσκαφών από τις αρχικές τους θέσεις συνήθως πιο πίσω στην ακολουθία προσγείωσης προκαλώντας τους τις μεγάλες αυτές καθυστερήσεις, με την σειρά του αυτό συμβαίνει διότι κάποια αεροσκάφη π.χ τύπου 1 είναι βέλτιστο να τοποθετούνται πίσω από τους υπόλοιπους τύπους που έχουμε θεωρήσει έτσι ώστε να μειώνονται τα κενά μεταξύ αφίξεων.

Αν τώρα αυτά τα αεροσκάφη τύχει να εμφανιστούν στην αρχή της ακολουθίας τότε ο αλγόριθμος θα αναγκαστεί να τα τοποθετήσει κατά πάσα πιθανότητα προς το τέλος της ακολουθίας προκαλώντας μεγάλες μετακινήσεις από τις αρχικές τους θέσεις και κατ' επέκταση μεγάλες καθυστερήσεις σε σχέση με τον μέσο όρο.

Σε αυτό το σημείο γίνεται αντιληπτό ότι εάν στον αλγόριθμο C1H κάθε φορά θεωρούμε έναν μικρό αριθμό αεροσκαφών που χρειάζεται να τα τοποθετήσουμε στις σωστές θέσεις δημιουργώντας την κατάλληλη σειρά-ακολουθία αφίξεων ίσως τα μειονεκτήματα που περιγράψαμε παραπάνω να μην εμφανίζονταν τόσο έντονα αλλά αυτό δεν θα εξυπηρετούσε τις ανάγκες ενός αεροδρομίου το οποίο σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης έχει να διαχειριστεί έναν μεγάλο αριθμό πτήσεων.

Από την άλλη πλευρά εάν ο αριθμός των αεροσκαφών που θεωρούμε είναι πολύ μεγάλος π.χ άνω των 40 αεροσκαφών τότε ο αλγόριθμος C1H θα παρουσιάζει μεγάλες μετακινήσεις αεροσκαφών με ταυτόχρονες μεγάλες καθυστερήσεις 'αδικώντας' κάποια αεροσκάφη τα οποία θα μπορούσαν να αποφύγουν αυτές τις καθυστερήσεις, παράλληλα ένα αεροδρόμιο έχει ανάγκη από προγραμματισμό μεγάλου αριθμού αεροσκαφών όποτε χρειάζεται απαραίτητα ένας περιορισμός στις μετακινήσεις των αεροσκαφών από τις αρχικές τους θέσεις. Οι καθυστερήσεις που θεωρούνται μεγάλες όπως έχει ήδη ειπωθεί και καταγράφονται σύμφωνα με την ομοσπονδιακή διοίκηση αεροπορίας F.A.A είναι αυτές που διαρκούν άνω των 15 λεπτών.

Στόχος λοιπόν κάθε λογισμικού είναι κάθε πτήση να μην υπερβαίνει αυτό το όριο αν είναι δυνατόν, αυτό φυσικά είναι αδύνατο σε περιπτώσεις μεγάλης κυκλοφοριακής συμφόρησης, όμως μπορούμε να το πετύχουμε σε κάποιο βαθμό με τον περιορισμό μετακίνησης θέσεων που περιγράψαμε στην παράγραφο 3.4 (CPS).

Ο περιορισμός CPS στην ουσία χωρίζει τον αριθμό των αεροσκαφών που θέλουμε να βρούμε την βέλτιστη ακολουθία σε μικρότερες ομάδες ανά συγκεκριμένο αριθμό αεροσκαφών όσων δηλαδή έχουμε επιλέξει. Το αποτέλεσμα αυτού του διαχωρισμού των συνολικών αεροσκαφών σε ομάδες είναι ότι το κάθε αεροσκάφος μπορεί να αλλάξει θέση αλλά περιορισμένα από την αρχική του και μέσα στα όρια της ομάδας που ανήκει. Σαν συνέπεια αυτού είναι ότι στην τελική ακολουθία το κάθε αεροσκάφος θα μπορεί (αν χρειάζεται) να απέχει τόσες θέσεις όσες εμείς έχουμε

επιλέξει ανεξάρτητα από τον τύπο του και την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Έτσι αποφεύγουμε το φαινόμενο κάποια αεροσκάφη για παράδειγμα να απέχουν έως και 28 θέσεις από την αρχική τους σε ένα σύνολο 30 αεροσκαφών.

Επίσης η κατανομή των καθυστερήσεων στο εκάστοτε σενάριο είναι καλύτερη υπό το πρίσμα ότι σε κάθε σενάριο οι καθυστερήσεις που εμφανίζονται δεν ξεπερνούν ένα όριο και 'συγκρατούνται' σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τον αλγόριθμο C.I.H στην απλή μορφή του.

Μπορεί λοιπόν ο αλγόριθμος CIH_CPS να παρουσιάζει ελάχιστα αυξημένο μέσο όρο καθυστερήσεων στα διάφορα σενάρια κυκλοφοριακής ροής σε σχέση με τον αλγόριθμο CIH όμως παρουσιάζει μειωμένη τυπική απόκλιση στον μέσο όρο των καθυστερήσεων που αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα όσον αφορά την κατανομή των καθυστερήσεων. Επίσης σε κάθε σενάριο ορίζοντας τον κατάλληλο περιορισμό μετακίνησης θέσεων για τον αλγόριθμο CIH_CPS έχουμε και αυξημένο ποσοστό πτήσεων που παρουσιάζουν καθυστερήσεις κάτω των 15 λεπτών σε σύγκριση με τον αλγόριθμο CIH. Το αυξημένο ποσοστό αυτό συνεπάγεται και μείωση του κόστους που προέρχεται από τις καθυστερήσεις.

Όσον αφορά τώρα το συνολικό χρονικό διάστημα προσγείωσης των αεροσκαφών λαμβάνοντας διάφορα σενάρια υπόψη οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια απόδοση με λίγο καλύτερη αυτή του αλγορίθμου CIH αλλά δίχως αξιοσημείωτες διαφορές.

Έτσι στην πράξη είναι προτιμότερη η χρήση του αλγορίθμου CIH_CPS ο οποίος εγγυάται την περιορισμένη μετακίνηση θέσεων σύμφωνα με την επιλογή μας και ταυτόχρονα αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τα μειονεκτήματα του αλγορίθμου CIH.

Επίσης στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι και οι δύο αλγόριθμοι είναι πολυωνυμικού χρόνου κάτι που σημαίνει ότι είναι αρκετά γρήγοροι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά από τα αεροδρόμια.

Οι δύο αλγόριθμοι αυτοί είναι αποδοτικοί και μπορούν να βοηθήσουν στον προγραμματισμό αφίξεων μειώνοντας ως ένα σημαντικό βαθμό τις καθυστερήσεις αλλά και χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά την χωρητικότητα του εκάστοτε αεροδρομίου, ωστόσο το πρόβλημα της ολοένα και αυξανόμενης κυκλοφοριακής ροής πρέπει να αντιμετωπιστεί με οικοδόμηση νέων αεροδιαδρόμων στα αεροδρόμια αυξάνοντας την χωρητικότητα τους ή με την οικοδόμηση νέων αεροδρομίων το οποίο είναι και η καλύτερη λύση στο πρόβλημα της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης της εναέριας κυκλοφορίας.