



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ»

ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΧΑΝΙΑ, 2004

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μανόλη Χριστοδούλου για την συνεχή καθοδήγηση, ενθάρρυνση και υποστήριξη κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, τον φίλο Στράτο για την καθοριστική του βοήθεια σε μερικά σημεία της εργασίας και τον πολύ καλό φίλο Κώστα για την συνεισφορά του κατά τη συγγραφή της εργασίας και την συνεχή στήριξη όλων των φίλων κατά τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με την εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου και τα αγαπημένα μου αδέρφια Μαίρη, Αλέξανδρο και Άρη για όλη την ηθική ενίσχυση, υποστήριξη και την αγάπη που μου παρέχουν σε όλη μου τη ζωή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχιζόμενη αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας σε όλο τον κόσμο έχει ως συνέπεια την αυξανόμενη συμφόρηση και τις καθυστερήσεις. Η έμφυτη αβεβαιότητα καθυστέρησης καθιστά δύσκολο για τις αερογραμμές και τους φορείς παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας να διαχειριστούν τους επιβάτες, τους στόλους και τα πληρώματα. Επιπλέον, η αυξανόμενη συμφόρηση στους πολυσύχολους αερολιμένες έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές ανεπάρκειες. Εμφανίζεται επομένως επιθυμητό να αναπτυχθεί μηχανισμός για να μειώσουν αυτές τις σειρές αναμονής αναχώρησης. Το υψηλό οικονομικό και πολιτικό κόστος της αυξανόμενης χωρητικότητας αερολιμένων με την προσθήκη νέων διαδρόμων δίνει ισχυρά κίνητρα για την έρευνα των λειτουργικών βελτιώσεων στο υπάρχον σύστημα.

Στο Κεφάλαιο 1 προβάλλεται η ανάγκη για οικοδόμηση απλών και ακριβών μοντέλων των αερολιμένων πλήμνης ώστε να παρέχει τις ποσοτικές εκτιμήσεις των λειτουργικών βελτιώσεων των αερολιμένων και να συμβάλλει στην ανακούφιση της συμφόρησης αναχωρήσεων στην επιφάνεια του αερολιμένων και στην βελτίωση των χρόνων καθυστερήσεων.

Το Κεφάλαιο 2 αποτελείται από τρεις βιβλιογραφικές αναφορές για απλά μοντέλα αναμονής εισόδου - εξόδου σε επίγειες διαδικασίες πολυσύχολων αερολιμένων. Αυτά τα μοντέλα είναι βαθμονομημένα και επικυρωμένα χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες διαμορφώσεις διαδρόμων και τα στοιχεία κυκλοφοριακής κίνησης.

Το Κεφάλαιο 3 προτείνεται ένα γενικό μοντέλο που θα ενσωματώσει τις αφίξεις, τις αναχωρήσεις και τους επίγειους χειρισμούς αεροσκαφών ταυτόχρονα. Ακολουθεί το δυναμικό μοντέλο με τις εξισώσεις για έναν απλό αερολιμένα πλήμνης και η κανονικοποίηση του προβλήματος. Και τέλος περιγράφεται το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο εργαλείο του Matlab το Simulink και προσομοιώθηκαν λεπτομερώς οι λειτουργίες του αερολιμένα.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και αναλύονται εκτενώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους που εκτελέστηκε αυτή.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει τα συμπεράσματα που εξάγονται από την διαδικασία προσομοίωσης και την τυχόν μελλοντική έρευνα που μπορεί να ακολουθήσει την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Τέλος στο Παράρτημα εμπεριέχονται περαιτέρω αποτελέσματα της προσομοίωσης για διαφορετικές τιμές παραμέτρων που δίνουν τη δυνατότητα πληρέστερης κατανόησης του εφαρμοσμένου μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΩΝ	7
1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.2.ΚΥΡΙΕΣ ΩΘΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ	9
1.3.ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ΣΤΑ ΠΡΟΣΦΑΤΑ ΣΥΝΟΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	12
1.4.ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΩΝ	13
1.5.ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ	16
1.5.1.Περιγραφή στόχου	17
1.5.2.Προσεγγίσεις στην ανάλυση	20
1.6.ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	22
1.7. ΠΑΡΑΓΩΓΑ	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	25
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	25
2.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
2.2.ΜΟΝΤΕΛΟ Α	25
2.2.1.Πηγές στοιχείων	26
2.2.1.1.Airline Service Quality Performance (ASQP) βάση δεδομένων	26
2.2.1.2.Preferential Runway Assignment System (PRAS) βάση δεδομένων	27
2.2.2.Μοντέλο βαθμονόμησης και επικύρωσης	29
2.2.2.2.Μοντέλο βαθμονόμησης	31
2.2.2.2.1.Αιτήσεις Pushback και άδειες	31
2.2.2.2.2.Χρόνος ταξιδιού από τα τερματικά στο διάδρομο	31
2.2.2.2.3.Διαδικασία υπηρεσιών διαδρόμων αναχώρησης	33
2.2.2.3.Σύγκριση της μοντελοποιημένης εξόδου με ιστορικά στοιχεία	34
2.2.3.Επικύρωση του μοντέλου	35
2.2.4.Έλεγχος της διαδικασίας αναχώρησης	36
2.2.4.1.Κίνητρο:Κόστος του διαδρόμου αναμονή έναντι των καθυστερήσεων πυλών	36
2.2.4.1α.Άμεσες λειτουργικές δαπάνες	36
2.2.4.1β.Περιβαλλοντικές δαπάνες	37
2.2.4.2.Κατευθυντήριες αρχές για την έννοια του ελέγχου	37
2.2.4.3.Ποσοτική αξιολόγηση των σχεδίων ελέγχου των διεργασιών αναχώρησης	38
2.2.4.3.1.Πληροφορίες απαίτησης αναχώρησης	39
2.2.4.3.2.Πληροφορίες ικανότητας διαδρόμων	39
2.2.5.Συμπεράσματα	40
2.3.ΜΟΝΤΕΛΟ Β	40
2.3.1.Διαθέσιμα στοιχεία	41
2.3.1.1.Σχεδιαγράμματα αερολιμένων	41
2.3.1.2.Στοιχεία διαδικασιών πτήσης	43
2.3.1.3.Διαμορφώσεις καιρού και αερολιμένων	44

2.3.2.Μοντέλα.....	46
2.3.2.1.Διαδικασία αναχώρησης (Pushback στην πύλη για απογείωση)	46
2.3.2.1.1.Παρατηρούμενες συμπεριφορές της διαδικασίας αναχώρησης.....	46
2.3.2.1.2.Προτεινόμενη δομή μοντέλου.....	46
2.3.2.1.3.Μέθοδοι βαθμονόμησης.....	47
2.3.2.1.4.Εργασία υπό εξέλιξη.....	49
2.3.2.2.Διαδικασία άφιξης(που προσγειώνεται στην πύλη αφίξεων)	50
2.3.2.3.Επίγειες διαδικασίες(άφιξη πυλών στην πύλη Pushback)	52
2.3.2.3.1.Παρατηρημένη συμπεριφορά των επίγειων διαδικασιών.....	52
2.3.2.3.2.Μοντελοποίηση της δομής.....	54
2.3.2.3.3.Μοντελοποίηση της βαθμονόμησης και της επικύρωσης	56
2.3.3.Προβλέψεις.....	56
2.3.3.1.Έλεγχος συμφόρησης αναχώρησης μέσω των σειρών αναμονής κρατήματος πύλης	57
2.3.3.2.Οφέλη των εναλλασσόμενων διαδικασιών και βελτιωμένα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων	58
2.3.4.Συμπεράσματα.....	59
2.4.ΜΟΝΤΕΛΟ Γ.....	59
2.4.1.Περιγραφή μοντέλου.....	60
2.4.2.Παρατηρήσεις πεδίων και πηγές στοιχείων.....	61
2.4.4.Σύγκριση των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων διαδικασιών.....	66
2.4.4.1.Είσοδοι προσομοίωσης	66
2.4.4.2.Τα αποτελέσματα προσομοίωσης.....	66
2.4.5.Συμπεράσματα.....	69
2.4.5.1.Εφαρμογές και υποθετικά σενάρια.....	69
2.4.5.2.Οι περαιτέρω βελτιώσεις μοντέλου.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	72
ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΑ.....	72
3.1.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ	72
3.2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΚΤΗ	73
3.3.ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	73
3.4.ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTINUOUS CONTROL INPUT)	77
3.5.ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΤΤΑΡΩΝ (CELL DYNAMIC MODEL)	77
3.5.1.Το δυναμικό μοντέλο αερολιμένα	79
3.6.ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (REAL TIME SCHEDULING)	81
3.6.1.Καθορίζοντας την Πραγματική Διακριτή Απόφαση Διεκπεραίωσης (Actual Discrete Dispatching Decision)	81
3.7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SIMULINK.	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	96
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	105
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	105
5.1.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105

5.2.ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ	106
5.2.1.Σύγκριση Προσαρμοστικού και Βέλτιστου Ελέγχου.....	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή στα συστήματα ελέγχου αερολιμένων

1.1.Εισαγωγή

Σαν απαίτηση για τις αυξήσεις αεροπορικού ταξιδιού, η συμφόρηση και οι καθυστερήσεις στο σύστημα εναέριας κυκλοφορίας γίνονται πιο συνηθισμένες. Η έμφυτη αβεβαιότητα καθυστέρησης καθιστά δύσκολο για τις αερογραμμές και τους φορείς παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας να διαχειριστούν τους επιβάτες, τους στόλους και τα πληρώματα. Επιπλέον, η αυξανόμενη συμφόρηση στους πολυσύχολους αερολιμένες έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές ανεπάρκειες. Εξακριβωμένες πληροφορίες για ενός αεροσκάφους την τρέχουσα και προβαλλόμενη θέση στο σύστημα είναι εξαιρετικά πολύτιμες για τις αερογραμμές και για τους φορείς παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας. Πολλές από τις καταγεγραμμένες καθυστερήσεις μπορούν να αποδίδονται άμεσα ή έμμεσα στους αερολιμένες.

Η συνεχιζόμενη αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας σε όλο τον κόσμο έχει ως συνέπεια την αυξανόμενη συμφόρηση και τις καθυστερήσεις. Οι μέσοι χρόνοι μπλοκαρίσματος μεταξύ των πολυσύχολων ζευγαριών πόλεων στις ΗΠΑ αυξάνεται συνεχώς (παραδείγματος χάριν, ο μέσος gate-to-gate χρόνος από το Boston Airport στο Washington National Airport αυξάνεται κατά 20% από το 1973 μέχρι το 1994). Η σημαντικότερη δυσχέρεια του U.S. National Airspace System (NAS) εμφανίζεται να είναι οι αερολιμένες. Σε λιγότερο ιδανικές καιρικές συνθήκες, η ικανότητα άφιξης και αναχώρησης μπορεί να μειωθεί εντυπωσιακά, καθώς οι αερογραμμές είναι συχνά απρόθυμες ή ανίκανες στο να μειώσουν την απαίτηση ακυρώνοντας πτήσεις. Η μειωμένη ικανότητα αναχώρησης μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλους taxi-out χρόνους στις ώρες αιχμής, καθώς τα αεροσκάφη υπό αναχώρηση περιμένουν σε μια σειρά αναμονής πριν τους επιτραπεί να απογειωθούν. Αυτοί οι πολλοί μεγάλοι taxi-out χρόνοι όχι μόνο αυξάνουν τις άμεσες λειτουργικές δαπάνες για τις επηρεαζόμενες πτήσεις, αλλά και επιφέρουν αυξανόμενο θόρυβο και μολυσματικές εκπομπές στην επιφάνεια των αερολιμένων.

Προβάλλεται ότι ο αριθμός πτήσεων μέσα στον εναέριο χώρο της ΕΕ θα διπλασιαστεί από το 2015. Η παρούσα Διοικητική Οργάνωση Εναέριας Κυκλοφορίας (Air Traffic Management ATM) και οι αρχές δεν θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την προβαλλόμενη αύξηση σε ζήτηση. Εμφανίζεται επομένως επιθυμητό να αναπτυχθεί μηχανισμός για να μειώσουν αυτές τις σειρές αναμονής αναχώρησης. Το υψηλό οικονομικό και πολιτικό κόστος της αυξανόμενης χωρητικότητας αερολιμένων με την προσθήκη νέων διαδρόμων δίνει ισχυρά κίνητρα για την έρευνα των λειτουργικών βελτιώσεων στο υπάρχον σύστημα. Κατά συνέπεια, διάφορες προσπάθειες είναι εν εξελίξει για να βελτιώσουν τη διαχείριση συμφόρησης αερολιμένων, την απόδοση και την προβλεψιμότητα. Για να επιτευχθεί ο στόχος της αυξανόμενης προβλεψιμότητας και αποδοτικότητας των αερολιμένων, πολλή έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για να μελετήσει τις διαδικασίες αναχώρησης και άφιξης στους πολυσύχλους αερολιμένες. Η οικοδόμηση απλών και ακριβών μοντέλων της πλήμνης (hub) αερολιμένων μπορεί αρκετά να βοηθήσει κάποιον να καταλάβει τις δυναμικές αερολιμένα, και μπορεί να παρέχει τις ποσοτικές εκτιμήσεις των λειτουργικών βελτιώσεων των αερολιμένων.

Οι μελλοντικές διαδικασίες του ATM θα πρέπει να γίνουν πιο εύκαμπτες προκειμένου να αυξηθεί η καθοδόν (en-route) χωρητικότητα, να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις και να οδηγήσουν σε μια μεγαλύτερη ικανότητα να εξυπηρετηθούν οι προτιμημένες από χρήστες τροχιές. Οι νέες ικανότητες θα πρέπει να επιτρέψουν την εύκαμπτη δρομολόγηση, καθώς επίσης και τις δυναμικές τροποποιήσεις στις διαδρομές αεροσκαφών ως αντίδραση σε αλλαγές στις συνθήκες καιρού και κυκλοφορίας. Οι τερματικές και en-route λειτουργίες του ATM θα πρέπει να ενσωματωθούν για να παρέχουν ομαλές κυκλοφοριακές ροές μέσα και έξω από τις τερματικές περιοχές (gate-to-gate.).

Η χρήση των προηγμένων εννοιών τεχνολογίας πληροφοριών κρίνεται σημαντική ώστε να διαδραματίσει βασικό ρόλο στην κάλυψη των απαιτήσεων των μελλοντικών διαδικασιών του ATM. Η χρήση μερικών από αυτές τις έννοιες θα οδηγήσει στην ανάπτυξη εργαλείων που θα παρέχουν την αποτελεσματική και ουσιαστική ενίσχυση στην (πολλαπλών επιπέδων) διαδικασία λήψης απόφασης που μπορεί να περιλάβει πιλότους, επίγειους ελεγκτές, αερογραμμές, κ.λ.π. στο μελλοντικό περιβάλλον του ATM. Ειδικότερα, σημαντική κρίνεται η χρήση των τεχνολογιών πληροφοριών state-of-art που προέρχονται από τους τομείς των επικοινωνιών, των δικτύων υπολογιστών, της βελτιστοποίησης και του βέλτιστου ελέγχου.

Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στα προβλήματα του ATM μόνο πολύ πρόσφατα έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται. Παραδείγματος χάριν, η εφαρμογή των τεχνικών στο ρωμαλέο βέλτιστο έλεγχο (robust optimal control) και ο ημισαφής προγραμματισμός έχουν εφαρμοστεί για να εξετάσουν τα βασικά προβλήματα στα συστήματα του ATM όπως η επίλυση συγκρούσεων με πολλά αεροσκάφη, η αποφυγή σύγκρουσης των τεμνόμενων ροών αεροσκαφών, η διαμόρφωση και ο βέλτιστος έλεγχος των επίγειων διαδικασιών. Οι τεχνικές στην υβριδική ανάλυση συστημάτων και τη θεωρία παιγνίων επίσης έχουν εφαρμοστεί πρόσφατα στα προβλήματα της ελαχιστοποίησης του διαχωρισμού των αεροσκαφών που απέχουν μικρά διαστήματα.

Η προτεινόμενη εργασία έχει σαν στόχο να συμπληρώσει και να επεκταθεί επάνω σε μερικές από αυτές τις πρόωρες εξελίξεις προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ρεαλιστικότερα σενάρια που επίσης είναι συμβατά με το τοπίο της ΕΕ και τους κανονισμούς του για τις διαδικασίες του ATM. Ειδικότερα, έχει ως πρόθεση να αναπτύξει ένα πλήρες και ενσωματωμένο σύνολο εργαλείων (μοντέλα και αλγόριθμοι με μία κατάλληλη και συμβατή διάταξη λογισμικού) που θα συμβάλει ουσιαστικά στην επιτυχή λειτουργία των μελλοντικών ATMs. Προγραμματίζεται επίσης να εξεταστούν και να επικυρωθούν τα νέα εργαλεία με τις προσομοιώσεις που θα είναι αντιπροσωπευτικές του νέου Διεθνούς Αερολιμένα της Αθήνας (Athens International Airport AIA). Μια τέτοια δοκιμή μπορεί να έχει μεγάλη σημασία λαμβάνοντας υπόψη την υπερφόρτωση κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και επίσης λαμβάνοντας υπόψη τους επερχόμενους Ολυμπιακούς αγώνες του 2004.

1.2.Κύριες ωθήσεις της έρευνας

Η ερευνητική διάταξη στοχεύει στις ακόλουθες κατευθύνσεις:

- να βελτιώσει τα Ευρωπαϊκά Μοντέλα Συστημάτων Εναέριου Χώρου (European Airspace System) μέσω της βαθμονόμησης και της επικύρωσης στα πρόσφατα σύνολα δεδομένων
- να κατασκευάσει απλά και ακριβή μοντέλα των πλημνών (hub) των αερολιμένων
- να ερευνήσει τη σχέση των συγκεντρωμένων και αποκεντρωμένων, αερομεταφερόμενων διαχωριστικών δομών στους περιορισμούς διαχείρισης ροής αεροσκαφών.
- να ερευνήσει τη χρήση των δεκτών GPS στον καθορισμό της θέσης και της ταχύτητας των αεροσκαφών

Ένα σημαντικό συστατικό της προτεινόμενης εργασίας αφιερώνεται στη *βελτίωση των ευρωπαϊκών μοντέλων συστημάτων εναέριου χώρου μέσω της βαθμονόμησης και της επικύρωσης στα πρόσφατα σύνολα δεδομένων*. Μερικά λογικά καλά αναπτυγμένα μοντέλα των μεγάλων, σύνθετων συστημάτων εναέριου χώρου είναι τώρα διαθέσιμα. Αυτά περιλαμβάνουν τα μοντέλα δικτύων αναμονής, όπως το Κατά Προσέγγιση Μοντέλο Καθυστερήσεων Δικτύων (Approximate Network Delays AND), που αναπτύσσεται στο Massachusetts Institute of Technology (MIT). Άλλα μοντέλα προσομοίωσης περιλαμβάνουν τα μοντέλα χρησιμοποιώντας το Preston Group's Total Airport and Airspace Modeler (TAAM).

Γενικά, τα μοντέλα δικτύων αναμονής προσφέρουν πολύ γρήγορη εκτέλεση και εισαγωγές που είναι απλούστερες να αλλάξουν, αλλά δίνουν τις λιγότερες αναλυτικές πληροφορίες από των υψηλότερου επιπέδου λεπτομερειών μοντέλων προσομοίωσης. Τα

μοντέλα αναμονής έχουν βρεθεί έτσι καταλληλότερα για τις μελέτες στις οποίες πολλές επιλογές πρέπει να εξεταστούν, στις οποίες τα αποτελέσματα σε πιο υψηλά επίπεδα συνάθροισης αρκούν.

Τα μοντέλα αναμονής έχουν χρησιμοποιηθεί με καλή επίδραση στις στρατηγικές μελέτες, δηλ. στις μελέτες για να ερευνηθεί η μελλοντική συμπεριφορά του ευρωπαϊκού συστήματος εναέριου χώρου υπό διάφορους όρους, γενικά σε αρκετά υψηλά επίπεδα συνάθροισης. Παραδείγματος χάριν, οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί χαρακτηριστικά στις επιδράσεις του ATM στα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων σε σφαιρικές μετρικές όπως τη συνολική ετήσια καθυστέρηση και τις σχετικές δαπάνες, ή τα ετήσια έσοδα από τα μίλια επιβατών, για χρόνους περίπου για μια δεκαετία στο μέλλον.

Τα μοντέλα τυπικά έχουν βαθμονομηθεί με στοιχεία από τις διαθέσιμες πηγές περίπου τρία έως πέντε έτη πριν. Οι πρόσφατες πηγές στοιχείων προσφέρουν αρκετά περισσότερες αναλυτικές πληροφορίες, πιο εξακριβωμένες πληροφορίες, και καταλληλότερα συστήματα διαχείρισης στοιχείων, από αυτές που ήταν διαθέσιμες όταν βαθμονομήθηκαν τελευταία τα μοντέλα. Οι νέες πληροφορίες είναι σε πηγές διαθέσιμες στο διαδίκτυο από την Eurocontrol, που παρέχουν τις σχεδόν σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες θέσης για τα αεροσκάφη στις περισσότερες Eurocontrol χώρες.

Οι νέες πηγές στοιχείων, με τέτοιες γνωστές εισαγωγές όπως τα πραγματικά στοιχεία διαδικασιών δίνουν μια μεγάλη ευκαιρία να γίνουν δύο σημαντικές βελτιώσεις στα μοντέλα Eurocontrol. Κατ' αρχάς, τα μοντέλα μπορούν να βαθμονομηθούν ακριβέστερα από πριν. Δεύτερον, αλλά το πιο σημαντικό, τα νέα συστήματα δίνουν τις ευκαιρίες να έρθουν αντιμέτωπες οι προβλέψεις των μοντέλων για τα συγκεκριμένα συστατικά Eurocontrol στους συγκεκριμένους χρόνους, με τα ακριβή στοιχεία. Οι λεπτομερείς δοκιμές των προβλέψεων των μοντέλων καθιερώνουν την εμπιστοσύνη στα λεπτομερή αποτελέσματα των μοντέλων, καθώς επίσης και στα συνολικά αποτελέσματά τους. Κατανοώντας αυτές τις ευκαιρίες θα παρέχει στους χρήστες της Eurocontrol και στους φορείς παροχής υπηρεσιών δύο χρήσιμα αποτελέσματα: καλύτερη κατανόηση των προβλημάτων στη δυναμική εναέριου χώρου, δίνοντας χρήσιμη καθοδήγηση στην ανάπτυξη των εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για το ATM και πιο πειστικές εκτιμήσεις των οφελών που έχουν τα εργαλεία, χρήσιμες για τις αποφάσεις προγράμματος και προϋπολογισμού.

Η οικοδόμηση των απλών και ακριβών μοντέλων των hub των αερολιμένων μπορεί να μας βοηθήσει αρκετά να καταλάβουμε τη δυναμική αερολιμένων, να αξιολογήσουμε τις στρατηγικές ελέγχου για τη γενική αποδοτικότητα αερολιμένων και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για λόγους πρόβλεψης, όπως για να παρέχει τις ακριβείς εκτιμήσεις των χρόνων απογείωσης και προσγείωσης αεροσκαφών. Οι έννοιες από τη θεωρία πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να συλλάβουν την έμφυτη αβεβαιότητα στις διαδικασίες αναχώρησης και άφιξης στους πολυάσχολους αερολιμένες, με τη διαμόρφωση των taxi-in και taxi-out διαδικασιών και άλλων επίγειων διαδικασιών, της διάδοσης των

καθυστερήσεων μεταξύ συνδεδεμένων πτήσεων, και των αλλαγών στην ικανότητα αερολιμένων λόγω των μεταβολών στον καιρό και τους πόρους των αερολιμένων.

Ένα άλλο σημαντικό συστατικό της προτεινόμενης έρευνας στοχεύει στην έρευνα της σχέσης των συγκεντρωμένων και αποκεντρωμένων, αερομεταφερόμενων δομών διαχωρισμού στους περιορισμούς διαχείρισης ροής αεροσκαφών. Αυτή η έρευνα θα στηριχτεί επάνω στα πρόσφατα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν από τη σταθερότητα και την απόδοση των ροών των αεροσκαφών καθώς αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο μέσω των συγκρούσεων. Θα βασιστεί επίσης επάνω στα πρόσφατα ερευνητικά αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν οπουδήποτε αλλού σχετικά με τη συνεργάσιμη αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων.

Τα σημεία που εξετάζονται είναι τα ακόλουθα:

- Επέκταση και ολοκλήρωση της έρευνας για την αποκεντρωμένη πολλαπλή αντιμετώπιση συγκρούσεων αεροσκαφών υπό κλειστό βρόγχο (closed-loop) με αποκεντρωμένο έλεγχο. Η έρευνα θα επικεντρωθεί στην επέκταση της κατηγορίας συμπεριφορών εναέριας κυκλοφορίας κάτω από την οποία η σταθερότητα και η απόδοση εναέριου χώρου μπορούν να προβλεφθούν και να εγγυηθούν αναλυτικά.
- Ανάπτυξη ενός εργαλείου αντιμετώπισης συγκρούσεων αεροσκαφών και εφαρμογής του για να αναλύσει την αλληλεπίδραση μεταξύ της ελεύθερης δρομολόγησης αεροσκαφών (και ειδικότερα της αποκεντρωμένης αντιμετώπισης συγκρούσεων) και των περιορισμών διαχείρισης ροής εναέριας κυκλοφορίας. Μία άλλη εργασία, επικεντρώνεται στην ελεύθερη δρομολόγηση των αεροσκαφών για τα δεδομένα ποσοστά ροής και πιστοποιεί κατάλληλα την ομάδα για να εξετάσει μεμονωμένα αυτό το πρόβλημα.

Η προτεινόμενη τεχνική προσέγγισης διαφέρει από τις περισσότερες προηγούμενες προσεγγίσεις σε αυτό το πρόβλημα με την υπογράμμιση των ακόλουθων σημείων: Θα εκτελέσει μια λεπτομερή ανάλυση των απλών και ρεαλιστικών σεναρίων και των συμπεριφορών αεροσκαφών. Θα αναλύσει τη συμπεριφορά *κλειστών βρόγχων (closed-loop)* του συστήματος. Η μελέτη θα θεωρήσει ποικίλες καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των πλήρως αποκεντρωμένων δομών λήψης αποφάσεων αεροσκαφών και των μικτών συγκεντρωμένων - αποκεντρωμένων δομών λήψης αποφάσεων για να μελετήσει τα αποτελέσματα του μικτού πληρώματος σε ένα περιβάλλον ελεύθερης-πτήσης.

Η προτεινόμενη έρευνα στοχεύει επίσης στον *προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας των αεροσκαφών βασισμένων στη διαθεσιμότητα των δεκτών GPS* που συνδυάζεται με το σύστημα EGNOS ή Galileo (ανάλογο του συστήματος WAAS που είναι αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη στις ΗΠΑ) των επίγειων σταθμών που αναμένονται για να αναπτυχθούν στα επόμενα έτη ώστε να υπολογίζουν και να δίνουν τα λάθη στα στοιχεία GPS. Παρά την ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος, θα υπάρξει ακόμα κάποιο υπόλοιπο λάθος θέσης και ταχύτητας του οποίου τα χαρακτηριστικά πιθανοτήτων (όπως το 95 και 99.999 επί της εκατό, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τη διαθεσιμότητα του συστήματος WAAS όπως διευκρινίζονται από το SNC) είναι

σημαντικό να υπολογιστούν. Μια από τις δυσκολίες στον υπολογισμό της συνάρτησης πιθανότητας πυκνότητας (pdf) του λάθους θέσης είναι ότι αλλάζει με το χρόνο λόγω των αλλαγών στον αριθμό και τη σχετική θέση των δορυφόρων, τις συνθήκες καιρού και ατμόσφαιρας και άλλους παράγοντες. Σε προηγούμενη εργασία, έχουν αναπτυχθεί οι αλγόριθμοι για το pdf του λάθους θέσης και της περιόδου κατά τη διάρκεια που τα στοιχεία είναι τοπικά στατιστικά στάσιμα με τη χρησιμοποίηση των Parzen Window-type εκτιμητών και της δοκιμής Kolmogorov - Smirnov. Πιστεύουμε ότι αυτές οι τεχνικές θα είναι σημαντικές να καθορίσουν την αξιοπιστία του συστήματος CNS σε κάθε χρονικό σημείο.

Στα παρακάτω τμήματα περιγράφονται με κάποιες λεπτομέρειες μερικά προβλήματα σχετικά με την διάταξη μας όπου εξετάζονται και τα αποτελέσματα για κάθε ένα από αυτά τα προβλήματα.

1.3.Βελτιωμένα ευρωπαϊκά μοντέλα συστημάτων εναέριου χώρου μέσω της βαθμονόμησης και της επικύρωσης στα πρόσφατα σύνολα δεδομένων

Οι στόχοι μας σε αυτήν την μελέτη είναι:

1. Να παρέχει ένα εμπιστευόμενο μοντέλο του Ευρωπαϊκού συστήματος εναέριου χώρου με την οικοδόμηση και τη βαθμονόμηση ενός κατάλληλου μοντέλου δικτύων αναμονής με τα πρόσφατα διαθέσιμα στοιχεία, και να επιδείξει ότι οι λεπτομερείς προβλέψεις για τα γεγονότα στους συγκεκριμένους αερολιμένες, τις τερματικές περιοχές, και τους καθοδόν υποτομείς σε συγκεκριμένους ημερομηνίες και χρόνους συμφωνούν με τα στοιχεία όσον αφορά τις πραγματικές ευρωπαϊκές λειτουργίες.
2. Να παρέχει τη διορατικότητα στη λειτουργία του Ευρωπαϊκού εθνικού συστήματος εναέριου χώρου με περαιτέρω ανάλυση των λεπτομερών προβλέψεων του μοντέλου για να προσδιορίσει τις πηγές συμφόρησης και καθυστέρησης, καθώς επίσης και τις πιθανές επιλύσεις τους.
3. Να απευθύνει ένα συγκεκριμένο θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στο χορηγό, που χρησιμοποιεί το πρόσφατα-βαθμονομημένο μοντέλο.

Τα Ιδρύματα θα συγκεντρώσουν μια ακολουθία των πρόσφατα-διαθέσιμων στοιχείων όσον αφορά τις διαδικασίες του Ευρωπαϊκού συστήματος εναέριου χώρου και άλλα στοιχεία και θα την χρησιμοποιήσουν με τις τυποποιημένες πηγές όπως τα πραγματικά στοιχεία διαδικασιών τερματικής περιοχής στα καιρικά συστήματα όπως επίσης και σε άλλα καιρικά στοιχεία για να βαθμονομήσουν τον αερολιμένα, την τερματική-περιοχή, και τα enroute τμήματα του μοντέλου δικτύων αναμονής NAS. Πρέπει επίσης να στήσουμε σε αυτό το δίκτυο αναμονής διαδικασία που θα ακολουθήσει τις διαδικασίες βαθμονόμησης και επικύρωσης που καθιερώνονται στα ιδρύματα, που περιλαμβάνουν τις προηγούμενες μελέτες διαμόρφωσης Εθνικού Εναέριου Χώρου και αερολιμένων. Το

πρόσφατα-βαθμονομημένο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί έπειτα για να προβλέψει τη συμπεριφορά των συγκεκριμένων συστατικών του Ευρωπαϊκού εναέριου χώρου στους συγκεκριμένους χρόνους που δεν χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση, και αυτές οι προβλέψεις θα συγκριθούν με τις παρατηρήσεις. Εάν είναι απαραίτητο, η βαθμονόμηση θα ρυθμιστεί έως ότου οι προβλέψεις βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις παρατηρήσεις. Κατόπιν, τα σχετικά ιδρύματα θα λειτουργήσουν το προκύπτον εμπιστευόμενο μοντέλο για να προσδιορίσουν τις συγκεκριμένες πηγές συμφόρησης και καθυστέρησης στον Ευρωπαϊκό εναέριο χώρο, καθώς επίσης και τις σχέσεις μεταξύ τους. Παραδείγματος χάριν, ο κορεσμός σχετικά λίγων παρόντων enroute τομέων μπορεί να προκαλέσει τις σημαντικές καθυστερήσεις ground-hold σε διάφορους σημαντικούς αερολιμένες σε μερικές περιοχές.

Τα Ιδρύματα θα χρησιμοποιήσουν το πρόσφατα-βαθμονομημένο μοντέλο σε μια μελέτη ενός συγκεκριμένου ζητήματος των Ευρωπαϊκών διαδικασιών εναέριου χώρου. Μια τέτοια μελέτη θα μπορούσε να περιλάβει την εφαρμογή του προσδιορισμένου μοντέλου σε πραγματικό χρόνο για μια ενσωματωμένη συμφόρηση εναέριου χώρου και μια πρόβλεψη καθυστερήσεων.

1.4. Διαμόρφωση και έλεγχος των αερολιμένων

Σαν απαίτηση για τις αυξήσεις εναέριας κυκλοφορίας, η συμφόρηση και οι καθυστερήσεις στο σύστημα εναέριας κυκλοφορίας γίνονται πιο κοινότητες. Η έμφυτη αβεβαιότητα καθυστέρησης καθιστά δύσκολο για τις αερογραμμές και τους φορείς παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας να διαχειριστούν τους επιβάτες, τους στόλους και τα πληρώματα. Επιπλέον η αυξανόμενη συμφόρηση στους πολυσύχολους αερολιμένες οδηγεί στις σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές ανεπάρκειες. Οι εξακριβωμένες πληροφορίες για την τρέχουσα και προβαλλόμενη θέση ενός αεροσκάφους στο σύστημα είναι εξαιρετικά πολύτιμες στις αερογραμμές και τους φορείς παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας. Πολλές από τις καταγεγραμμένες καθυστερήσεις μπορούν να αποδοθούν άμεσα ή έμμεσα στους αερολιμένες. Κατά συνέπεια, διάφοροι αερολιμένες είναι εν εξελίξει για να βελτιώσουν τη συμφόρηση αερολιμένων τη διαχείριση, την αποδοτικότητα και την ικανότητα πρόβλεψης. Για να επιτύχει το στόχο της αυξανόμενης ικανότητας πρόβλεψης και της αποδοτικότητας αερολιμένων, πολλή έρευνα έχει αναληφθεί για να μελετήσει τις διαδικασίες αναχώρησης και άφιξης στους πολυσύχολους αερολιμένες.

Τα περισσότερα ιδιαίτερα λεπτομερή μοντέλα των διαδικασιών αερολιμένων όπως τα SIMMOD, TAAM ή η μηχανή αερολιμένων είναι βασισμένα σε μια λεπτομερή, φυσική διαμόρφωση των διαδικασιών αερολιμένων. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να είναι χρήσιμα να αξιολογήσουν σχετικά ποιοτικά αποτελέσματα των διάφορων βελτιώσεων στην

αποδοτικότητα αερολιμένα. Αναπαράγουν με μεγάλη λεπτομέρεια το σχεδιάγραμμα από έναν αερολιμένα και τους κανόνες λειτουργίας και τη δυναμική από κάθε πύλη, τον τροχοδρόμο και το διάδρομο για κάθε τύπο αεροσκάφους. Αυτά τα μοντέλα είναι χρήσιμα να εξετάσουν διαδικαστικές αλλαγές στη δρομολόγηση των αεροσκαφών στο σύστημα τροχοδρόμων. Εντούτοις, βαθμονομώντας και επικυρώνοντας τους η επίσημη αίσθηση είναι ότι αποτελούν μια πολύ μεγάλη πρόκληση, εάν όχι έναν αδύνατο στόχο. Το μειονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι η δυσκολία και το υψηλό κόστος της λήψης του στατιστικών σημαντικών επικυρωμένων στοιχείων για όλους τους παράγοντες του αερολιμένα κάτω πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις, και για να εξάγουν μία εξαντλητική επικύρωση από αυτά τα στοιχεία. Είναι έτσι δύσκολο να λάβουν από αυτά τα μοντέλα γρήγορες και αξιόπιστες εκτιμήσεις των οφελών των νέων εννοιών διαδικασιών στην κλίμακα του αερολιμένα κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης χρονικής περιόδου. Κατά συνέπεια, αυτά τα μοντέλα απαιτούν πολύ σημαντικές προσπάθειες και εκτενής γνώση ιδιαίτερης εργασίας του αερολιμένα που βρίσκεται υπό μελέτη για να επιδράσουν οι ποσοτικές πληροφορίες και να παραχθούν βελτιωμένες διαδικασίες αερολιμένα.

Αλλά μοντέλα, όπως το Approximate Network Delays μοντέλο (A.N.D.), παίρνουν μία συνολική (ή μακροσκοπική) προοπτική της ικανότητας και της απαίτησης σε έναν αερολιμένα κατά τη διάρκεια της ημέρας και παρέχουν εκτιμήσεις των καθυστερήσεων. Αυτά τα μοντέλα επιτρέπουν να μελετηθεί η διάδοση των καθυστερήσεων στην κλίμακα NAS, αλλά η μακροσκοπική άποψη για τους αερολιμένες δεν συλλαμβάνει αρκετές λεπτομέρειες των μεμονωμένων διαδικασιών αερολιμένων για να μελετήσουν τα σχέδια της μείωσης των taxi-out χρόνων.

Μία ενδιάμεση μοντελοποιημένη προσέγγιση, στην οποία τα μοντέλα εισόδου-εξόδου των τερματικών του αερολιμένα, τα συστήματα τροχοδρόμων και διαδρόμων τίθενται μαζί για να λάβουν ένα ‘μεσοσκοπικό’ μοντέλο αερολιμένων. Το σύστημα τερματικών του αερολιμένα και το σύστημα διαδρόμων είναι μοντελοποιημένα ως servers αναμονής, και μία στοχαστική κατανομή παράγεται για το χρόνο ταξιδιού στο σύστημα τροχοδρόμου από το τερματικό στη σειρά αναμονής διαδρόμων. Αυτό το μοντέλο συλλαμβάνει τη διαδικασία αναχώρησης με αρκετές λεπτομέρειες για να υπολογίσει την αποτελεσματικότητα των σχεδίων ελέγχου αναχώρησης, να μειώσει τους taxi-out χρόνους, ενώ παραμένει αρκετά απλό να επιτρέψει μια γρήγορη βαθμονόμηση και επικύρωση σε κάθε διαμόρφωση διαδρόμων. Μία παρόμοια προσέγγιση διαμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε από τον Shumsky για να αναπτύξει ντετερμινιστικά (αιτιοκρατικά) μοντέλα που προβλέπουν τους χρόνους απογείωσης πτήσεων σε σημαντικούς αερολιμένες. Μερικά από αυτό τα μοντέλα αναπαριστούν το σύστημα διαδρόμων ως server αναμονής του οποίου η ικανότητα είναι σταθερά πάνω από 10 μικρά διαστήματα. Σε αυτά τα μοντέλα, τα αεροσκάφη φθάνουν στη σειρά αναμονής διαδρόμων στο τέλος ενός ονομαστικού χρόνου ταξιδιού στο σύστημα τροχοδρόμου. Ο Shumsky παρατήρησε επίσης μια σχέση μεταξύ της συμφοράς αερολιμένα και του ποσοστού αναχώρησης αερολιμένα που είναι η βάση μιας απλής στρατηγικής ελέγχου αναχώρησης αξιολογημένης σε αυτό το έγγραφο. Η μεσοσκοπική μοντελοποιημένη προσέγγιση ακολουθήθηκε επίσης από τον Hebert, ο οποίος ανέπτυξε ένα μοντέλο της διαδικασίας αναχώρησης στο LaGuardia Airport, βασισμένο σε στοιχεία 5 ημερών, για να προβλέψει

τις καθυστερήσεις αναχωρήσεων. Σε αυτό το μοντέλο, η απαίτηση αναχώρησης είναι μια ανομοιογενής διαδικασία Poisson, και οι taxi-out χρόνοι μοντελοποιούνται ως το άθροισμα ενός ονομαστικού χρόνου ταξιδιού στη σειρά αναμονής διαδρόμων και ενός χρόνου υπηρεσιών διαδρόμων. Ο διάδρομος μοντελοποιείται ως πολλών βαθμών διαδικασία Markov στην οποία οι ολοκληρώσεις υπηρεσιών ακολουθούν Erlang-6 κατανομή. Ο server διαδρόμων μπορεί επίσης να γίνει απών μετά από μια αναχώρηση, και η διαμόρφωση του χρόνου απουσίας είναι Erlang-9.

Οι πειραματικές εκθέσεις, οι επιτόπιες έρευνες και οι στατιστικές αναλύσεις των αυτόματα καταγραφμένων στοιχείων δείχνουν ότι η ικανότητα διαδρόμων (runway) είναι ο αρχικός περιορισμός στη διαδικασία αναχώρησης στους πολυάσχολους αερολιμένες όπως το Boston Logan International Airport. Παραδείγματος χάριν, ουσιαστική συμφόρηση παρατηρήθηκε στο Logan Airport κάτω από ορισμένες διαμορφώσεις του αερολιμένα, που οδηγούν σε σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές ανεπάρκειες. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στην κατάρτιση των συνολικών μοντέλων αναχώρησης αερολιμένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να προβλέψουν τους taxi-out χρόνους. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να βαθμονομηθούν και να επικυρωθούν λεπτομερώς, και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ποσοτικοποιήσουν τα αποτελέσματα από την κράτηση στις πύλες τους (gate-hold) των υπό αναχώρηση αεροσκαφών κατά τη διάρκεια των περιόδων συμφόρησης των συστημάτων τροχοδρόμων (taxiway).

Η διαδικασία άφιξης αερολιμένων έχει μελετηθεί εντατικά για αερομεταφερόμενη κυκλοφορία, ειδικά μέσω της ανάπτυξης διοικητικών εργαλείων άφιξης αερολιμένα όπως το Center/ TRACON Automation System (CTAS), μια ακολουθία από εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για να βοηθήσει το TRACON να διαχειριστεί τη ροή των αεροσκαφών που φθάνουν σε έναν πολυάσχολο αερολιμένα. Τα διοικητικά εργαλεία άφιξης όπως το CTAS παρέχουν δύο οφέλη για κορεσμένους αερολιμένες. Κατ' αρχάς, συμβάλλουν στην αύξηση της απόδοσης αερολιμένων με την επίτευξη της αποδοτικής εξισορρόπησης διαδρόμων και συστηματοποιώντας τις ροές άφιξης αεροσκαφών. Δεύτερον, η ισχυρή βασισμένη σε μοντέλο πρόβλεψη τροχιάς του CTAS επιτρέπει πρακτικά ακριβή πρόβλεψη των χρόνων προσγείωσης αεροσκαφών μέχρι 40 λεπτά εκ των προτέρων. Αυτές οι ακριβείς εκτιμήσεις για το χρόνο προσγείωσης έχουν τη δυνατότητα να ωφελήσουν τις αερογραμμές ουσιαστικά προσφέροντας πληροφορίες πρόβλεψης για τις εισερχόμενες πτήσεις.

Αντίθετα, οι περισσότερες μελέτες του συστήματος εναέριων μεταφορών δεν εξετάζουν τις επίγειες διαδικασίες. Στην πραγματικότητα, σε πολλά μοντέλα ο επίγειος χρόνος, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες και τις δραστηριότητες από wheels-on μέχρι wheels-off, υποτίθεται ότι ήταν σταθερού μήκους. Αυτή η υπόθεση αγνοεί τα αποτελέσματα αναμονής που προκύπτουν στους αερολιμένες και υπονοεί ότι οι αερογραμμές δεν μπορούν να επηρεάσουν τις καθυστερήσεις και την διάδοση καθυστέρησης ενώ τα αεροσκάφη είναι στο έδαφος. Εντούτοις, στην πράξη οι αερογραμμές προσπαθούν συχνά να μικραίνουν τους επίγειους χρόνους των καθυστερημένων αεροσκαφών προκειμένου να ελέγξουν τις προς τα κάτω επιδράσεις των καθυστερήσεων.

Εδώ προτείνεται ένα μοντέλο που θα ενοποιηθεί για τις αφίξεις αποβάσεων και τις διαδικασίες αναχώρησης και θα βασιστεί στη τεχνολογία επαναλαμβανόμενων δυναμικών νευρωνικών δικτύων (dynamic recurrent neural network technology) για το σχεδιασμό και τον έλεγχο ενός ιδιαίτερα σύνθετου, διακριτού γεγονότος, μεγάλης κλίμακας πολύπλοκου συστήματος, όπως περιγράφεται ακολούθως και εξετάζει την πρότυπη περιγραφή των επίγειων διαδικασιών. Το μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες κυκλοφορίας καθώς επίσης και τους καταχωρητές (buffers) για την άφιξη και την αναχώρηση των αεροσκαφών στους αερολιμένες. Αυτό το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των διαδικασιών στους κορεσμένους αερολιμένες. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται είναι βασισμένη στα επαναλαμβανόμενα υψηλής-τάξης νευρωνικά δίκτυα (recurrent high order neural networks), που αναπτύσσονται από το εργαστήριο αυτοματισμού του Technical University of Crete. Οι προσαρμοστικές μη γραμμικές μέθοδοι (adaptive nonlinear methods) για τα συστήματα που παρουσιάζουν άγνωστη δομή θα χρησιμοποιηθούν και τελικά βασισμένες στα υπάρχοντα στοιχεία, στη δοκιμή και στην αξιολόγηση θα εκτελεστούν.

1.5.Αλληλεπίδραση μεταξύ της επίλυσης συγκρούσεων και των περιορισμών διαχείρισης κυκλοφοριακής ροής

Ο τρέχων enroute έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας σύμφωνα με τα Όργανα Κανόνων Πτήσης (Instrument Flight Rules) συγκεντρώνεται ως επί το πλείστον στο πλαίσιο ενός δεδομένου τομέα, όπου ο ελεγκτής enroute φέρει την αρχική ευθύνη χωρισμού αεροσκαφών και εκδίδει τις άδειες ότι οι πιλότοι πρέπει να εμμένουν. Οι πρόσφατες καινοτομίες αμφισβητούν τώρα αυτήν την αρχιτεκτονική ελέγχου. Παραδείγματος χάριν, η ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας επικοινωνιών, μαζί με τη βελτιωμένη τεχνολογία εύρεσης πορείας και θέσης αεροσκάφους (όπως το GPS ή το RNAV) θα επιτρέψει την πρόσβαση για κάθε πιλότο στις ίδιες περιβάλλουσες πληροφορίες θέσης αεροσκαφών όπως είναι διαθέσιμες σήμερα στους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας. Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν αφαιρέσει έναν από τους αρχικούς λόγους για το τρέχον, συγκεντρωμένο σύστημα ελέγχου και έχουν οδηγήσει στη δυνατότητα ανάπτυξης της "Ελεύθερης Πτήσης (Free Flight)", μια έννοια με την οποία οι πιλότοι έχουν την άδεια για περισσότερη ελευθερία στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο αναπτύσσεται αποτελεσματικά μια κατανομημένη υποδομή ελέγχου. Διάφορα ζητήματα προκύπτουν από αυτήν την εξέλιξη. Αυτά περιλαμβάνουν:

Παρουσία μικτού πληρώματος: Μια μεταρρύθμιση του συστήματος εναέριων μεταφορών θα ενσωματώσει απαραίτητως μια φάση όπου ο στόλος αεροσκαφών θα είναι ετερογενής, μερικά αεροσκάφη που εξοπλίζονται για τη "Ελεύθερη Πτήση" ενώ άλλα θα διατηρήσουν το συμβατικό εξοπλισμό, ενδεχομένως μέχρι το τέλος της οικονομικά χρήσιμης ζωής τους. Η παρουσία τέτοιας κυκλοφορίας δημιουργεί ερωτήματα ως προς τον τρόπο με τον οποίο τα εξοπλισμένα και μη-εξοπλισμένα αεροσκάφη θα συνυπάρξουν στον εθνικό εναέριο χώρο.

Παρουσία περιορισμών διαχείρισης ροής εναέριας κυκλοφορίας: Αν και η έννοια ελεύθερης πτήσης τείνει να ξεφύγει ριζικά από το τρέχον σύστημα με το να στοχεύσει στην άρση όσο το δυνατόν περισσότερων από τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το φορέα παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας, αναμένεται ότι ορισμένοι περιορισμοί θα παραμείνουν όπως οι περιορισμοί στα ποσοστά άφιξης και αναχώρησης αερολιμένων, οι αυστηρές καιρικές συνθήκες και ο ειδικός εναέριος χώρος χρήσης. Είναι έπειτα σημαντικής σπουδαιότητας να μελετηθεί πώς τα αποκεντρωμένα σχέδια ανίχνευσης και ανάλυσης σύγκρουσης θα ενεργήσουν παρουσία των περιορισμών διαχείρισης ροής. Αντιθέτως, είναι επίσης σημαντικό να καθοριστεί η επιρροή των σχεδίων ανίχνευσης και ψηφίσματος σύγκρουσης στη διατύπωση των περιορισμών ροής: Πράγματι, οι περιορισμοί ροής θεωρούνται συχνά ως τρόπος να δομήσει σωστά την κυκλοφορία ώστε να αντιμετωπιστούν από τα συστήματα διαχείρισης χαμηλότερης εναέριας κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης σύγκρουσης και της ανάλυσης.

Αβεβαιότητα, σταθερότητα και απόδοση: Τα ζητήματα με οικονομικό συμφέρον υπάρχουν για να καταλάβουμε υπό ποιους όρους η Ελεύθερη Πτήση είναι πραγματικά μια ασφαλής και βιώσιμη αποκεντρωμένη επιλογή στη διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας. Εκτός από μερικές εξαιρέσεις, αυτό το πρόβλημα έχει δοθεί είτε περιορισμένο είτε χωρίς καμία θεώρηση. Σαν συνέχεια στην ερευνητική δραστηριότητά μας σε αυτήν την περιοχή, προτείνουμε να εκτελέσουμε την έρευνα για τον αντίκτυπο της αβεβαιότητας συμπεριφοράς στη σωστή εκτέλεση της εναέριας κυκλοφορίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οποιαδήποτε στιγμή οι περιορισμοί ροής εμφανίζονται στις συγκεκριμένες θέσεις στον εθνικό εναέριο χώρο. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να είναι κακοκαιρία, SUA, συμφόρηση εναέριου χώρου και μέτρηση αφίξεων / περιορισμοί διαστημάτων.

Επομένως θα υποβάλουμε τις ακόλουθες ερωτήσεις: Πώς οι περιορισμοί ροής έχουν επιπτώσεις στο εύρος και την πιθανότητα των σημαντικών συγκρούσεων αεροσκαφών; Πόσο η αντιμετώπιση σύγκρουσης αεροσκαφών μπορεί να αναστατώσει - επηρεάσει τις διοικητικές διαδικασίες κυκλοφοριακής ροής όταν οι περιορισμοί ή τα εμπόδια ροής είναι παρόντα;

1.5.1.Περιγραφή στόχου

Ο σχετικός σκοπός θα στηριχθεί σε καθαρισμένα μοντέλα που καθιερώνονται προηγουμένως:

Μοντέλα

Τα προηγούμενα δύο έτη ερευνητικών προσπαθειών έχουν δείξει ότι η επιλογή των μοντέλων είναι ουσιαστική να προσφέρει τις πολύτιμες απαντήσεις στο καταναεμημένο πρόβλημα εναέριων μεταφορών. Κατά τη διάρκεια αυτής της έρευνας, θα επικεντρωθούμε στα σενάρια που περιλαμβάνουν ταυτόχρονα την απαίτηση για τη

διαβεβαίωση διαχωρισμού και την ανάγκη για τον έλεγχο ροής. Για εκείνο τον σκοπό, θα εργαστούμε με τα συγκεκριμένα μοντέλα της δυναμικής αεροσκαφών, της συμπεριφοράς αεροσκαφών και των σεναρίων που επεξηγούν τα προβλήματα που εξετάζονται.

Μοντέλα της δυναμικής αεροσκαφών

Βασιζόμενοι επάνω στην προηγούμενη έρευνα, θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που προτείνεται από τον John Andrews για να περιγράψει τη συμπεριφορά των μεμονωμένων αεροσκαφών. Σε αυτό το μοντέλο, όλα τα αεροσκάφη κινούνται σε ευθείες γραμμές και εκτελούν άμεσες στροφές. Ένα ελαφρώς διαφορετικό μοντέλο ελιγμού, το μοντέλο *offset*, θα χρησιμοποιηθεί κατά διαστήματα. Αυτό το απλούστερο μοντέλο θεωρεί τους ελιγμούς αεροσκαφών να αποτελούνται από τις στιγμιαίες αλλαγές θέσης αεροσκαφών παρά το εύρος ταχύτητας και τις φέρουσες αλλαγές.

Μοντέλα των πληροφοριών αεροσκαφών

Ενώ οι πληροφορίες μπορούν να είναι διαθέσιμες για την κατάσταση ολόκληρου του εθνικού εναέριου χώρου, αυτό το πρόγραμμα θα υποθέσει ότι μόνο ένα περιορισμένο ποσό πληροφοριών, που βασίζεται γύρω από τη θέση αεροσκαφών ή τον τομέα του ελεγκτή, είναι διαθέσιμο ή χρησιμοποιημένο από τον πιλότο ή τον ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας (στην περίπτωση του μικτού πληρώματος).

Μοντέλα της αντιμετώπισης συγκρούσεων αεροσκαφών

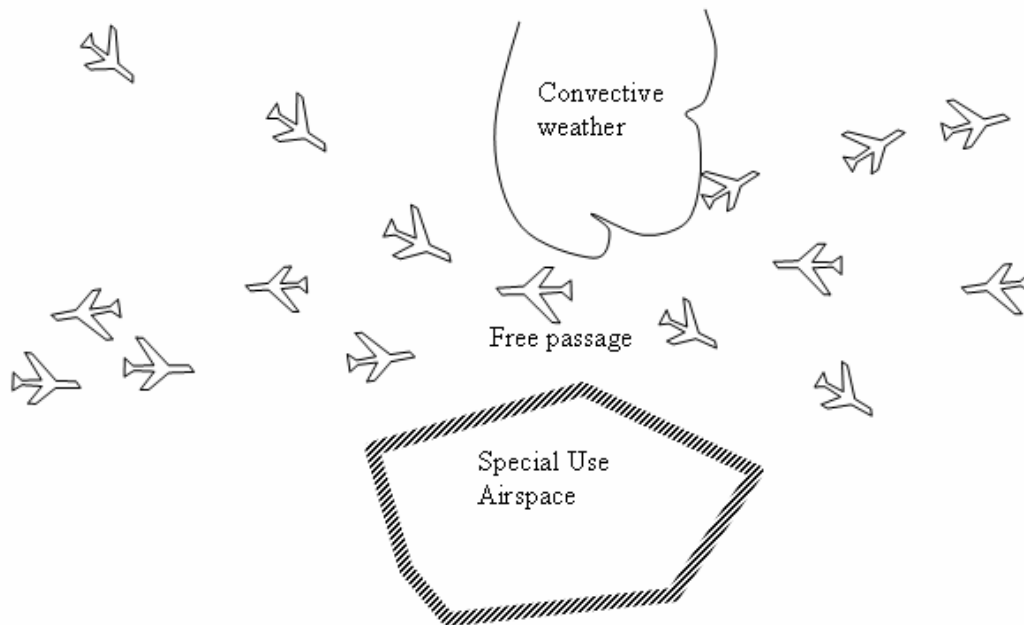
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της προτεινόμενης εργασίας είναι ότι η συμπεριφορά *κλειστών βρόγχων* (*closed-loop*) αεροσκαφών θα ερευνηθεί, δηλαδή η συμπεριφορά αεροσκαφών να μπορεί να επηρεαστεί από τους γείτονές της. Αυτό είναι μια σημαντική διαφορά από τις παραδοσιακότερες προσεγγίσεις (όπως τα μοντέλα αερίου), οι οποίες υποθέτουν έναν ανοικτό βρόχο, μόριο-όπως συμπεριφορά αεροσκαφών, και αγνοούν έτσι τα πιθανά οφέλη της *ανατροφοδότησης* για να μειώσουν το περιστατικό των συγκρούσεων. Αυτά τα μοντέλα αντιμετώπισης συγκρούσεων περιλαμβάνουν τη διατύπωση μιας αντικειμενικής λειτουργίας (αυτή η αντικειμενική λειτουργία μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε αεροσκάφος και η ίδια αντικειμενική λειτουργία μπορεί να μοιραστεί με όλα τα μη εξοπλισμένα αεροσκάφη υπό έλεγχο ATSP).

Μοντέλα – σεναρίων των περιορισμών κυκλοφοριακής ροής

Τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής υπό εξέταση θα περιλάβουν την ύπαρξη των μειωμένων περιορισμών ροής. Οι περιορισμοί κυκλοφοριακής ροής μπορούν να προκύψουν ως αποτέλεσμα του περιορισμένου διαθέσιμου εναέριου χώρου (αυτό συμβαίνει όταν σφοδρός καιρός αναπτύσσεται καθοδόν) και τείνουν έπειτα να παράγουν περισσότερες συγκρούσεις μεταξύ των αεροσκαφών για τα δεδομένα ποσοστά ροής αεροσκαφών. Υπό αυτούς τους όρους, υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ του κανονισμού ροής και της αντιμετώπισης συγκρούσεων. Οι περιορισμοί ροής ενεργούν ως φίλτρο για να περιορίσουν την κυκλοφορία στα επίπεδα όπου οι συγκρούσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν ασφαλώς.

Μπορούν επίσης να προκύψουν κοντά στους αερολιμένες λόγω των περιορισμών ποσοστού αποδοχής διαδρόμων, οπότε σ' αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει καμία άμεση σχέση μεταξύ του περιορισμού ροής και της αντιμετώπισης συγκρούσεων.

Κατά τη διάρκεια αυτού του προγράμματος, θα εξετάσουμε τις καταστάσεις όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 1.1 κατωτέρω, όπου ο διαθέσιμος εναέριος χώρος είναι περιορισμένος λόγω της παρουσίας εμποδίων (σφοδρός καιρός ή Ειδικός Εναέριος Χώρος Χρήσης ή και τα δύο).



Σχήμα 1.1. Συγκλίνον σχέδιο αεροσκαφών

Άλλα σενάρια θα περιλάβουν τη συγχωνευμένη κυκλοφορία. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα τέτοιων σεναρίων είναι ότι τείνουν να παρέχουν τη χρονική και γεωμετρική δομή στην κυκλοφορία, η οποία μπορεί να είναι ευεργετική στις αναλύσεις σταθερότητας και απόδοσης. Η δομή φανερώνεται από την άποψη του χωρικού προσανατολισμού ροής (στο σχήμα 1.1 αεροσκάφη θα τείνουν να βρεθούν στο νοτιοδυτικό-βορειοδυτικό τεταρτημόριο και τα σημεία στο νοτιοανατολικό-βορειοανατολικό τεταρτημόριο σχετίζονται με τη δυσχέρεια κυκλοφορίας). Φανερώνεται επίσης από την άποψη των περιορισμών κυκλοφοριακής ροής. Μια ιδιαίτερη περίπτωση των περιορισμών ροής εκφράζεται ως περιορισμοί miles-in-trail και ο αντίκτυπός που έχουν στη σταθερότητα επίλυσης συγκρούσεων. Εντούτοις, η εισαγωγή της ελεύθερης πτήσης θα επιτρέψει άλλους τύπους δομών ελέγχου ροής, συμπεριλαμβανομένων των windowing σχεδίων, με τα οποία ο αριθμός αεροσκαφών μπορεί να ρεύσει μέσα στην περιορισμένη περιοχή οποτεδήποτε το παράθυρο ενός δεδομένου μήκους είναι

περιορισμένο. Αυτός ο τύπος περιορισμού επιτρέπει ένα μεγαλύτερο σύνολο συμπεριφορών αεροσκαφών από τις απαιτήσεις miles-in-trail.

1.5.2. Προσεγγίσεις στην ανάλυση

Η ανάλυσή θα βασιστεί επάνω στην παρατήρηση ότι η παρουσίαση των enroute περιορισμών ροής τείνει φυσικά να δομήσει τις ροές αεροσκαφών γύρω από εκείνους τους περιορισμούς. Παραδείγματος χάριν, η enroute κυκλοφορία κοντά σε έναν πολυσύχολο αερολιμένα τείνει να οργανωθεί σύμφωνα με τις ακτινωτές γραμμές εντός ή εκτός από εκείνο τον ιδιαίτερο αερολιμένα, με τους περιορισμούς σε πόσα αεροσκάφη μπορεί να ρεύσει προς ή από εκείνο τον αερολιμένα. Επιπλέον, η κυκλοφορία που χρειάζεται τη μετακίνηση λόγω ενός σημαντικού καιρικού κελιού θα τείνει να συγκεντρωθεί κοντά σε εκείνο το κελί. Μέσα σε εκείνα τα πλαίσια θα ερευνηθεί η επιρροή διάφορων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμών ροής, στην απόδοση των συστημάτων αποφυγής σύγκρουσης. Επιπρόσθετα, θα μελετηθεί επίσης πώς η βελτιωμένη γνώση για τις αποκεντρωμένες και μικτές στρατηγικές επίλυσης συγκρούσεων μπορεί να βοηθήσει στο να χαλαρώσει τους περιορισμούς ροής.

Όλες αυτές οι ερωτήσεις πρέπει να αρχίσουν από τον υπολογισμό των διαταραχών στις τροχιές που βιώνονται με τα αεροσκάφη δεδομένου ότι προσπαθούν να αλλάξουν τις τροχιές τους για να διαχειριστούν enroute τις συγκρούσεις. Θα μελετηθούν ειδικότερα τα ακόλουθα προβλήματα:

Αντίκτυπος της μεμονωμένης ζώνης επιτήρησης αεροσκαφών στην αποδοτικότητα της επίλυσης συγκρούσεων:

Αυτό το πρόβλημα στοχεύει στην ανάλυση από μια θεμελιώδη σκοπιά της επιρροής της γνώσης για διαφορετική κυκλοφορία στην αποδοτικότητα των σχεδίων επίλυσης συγκρούσεων. Οι αρχικές αναλύσεις φαίνονται να δείχνουν ότι η σχέση μεταξύ του μεγέθους της ζώνης επιτήρησης και της αποδοτικότητας των επιλύσεων συγκρούσεων δεν είναι απαραίτητα μονοτονική όπως κάποιος μπορεί να περιμένει. Αναμένεται ότι μια τέτοια μελέτη θα απαιτήσει τις τροχιές αεροσκαφών κατά μήκος των οποίων οι πολλαπλές ταχύτητες και βασικές αλλαγές μπορεί να πρέπει να γίνουν.

Μικτό πλήρωμα αεροσκαφών:

Αυτό το πρόβλημα, παρόμοιο με τον προηγούμενο, στοχεύει στην ανάλυση της συμπεριφοράς κλειστών βρόγχων (closed-loop) ενός συστήματος περιλαμβάνοντας τους αποκεντρωμένους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων (εξοπλισμένα αεροσκάφη) και τους συγκεντρωμένους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων (όπως ο φορέας παροχής υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας, που ενεργεί εξ ονόματος των μη εξοπλισμένων αεροσκαφών). Σε ένα τέτοιο σενάριο, τα εξοπλισμένα Ελεύθερης-Πτήσης αεροσκάφη μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις ζώνες επιτήρησης που βασίζονται στα ίδια τα αεροσκάφη, ενώ ο συγκεντρωμένος ιθύνων θα χρησιμοποιούσε μια σταθερή ζώνη επιτήρησης, παρόμοια με τους σημερινούς enroute τομείς.

Μικτές και άγνωστες συναρτήσεις κόστους:

Σε ένα αποκεντρωμένο περιβάλλον, τα μεμονωμένα αεροσκάφη μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις διαφορετικές συναρτήσεις κόστους (παραδείγματος χάριν, ο δείκτης δαπανών που χρησιμοποιείται για την αερογραμμή για να ζυγίσει την ανάλογη σημασία των καυσίμων έναντι άλλων άμεσων λειτουργικών δαπανών ποικίλλει με βάση την αερογραμμή και το χρόνο του έτους) που μπορούν να ευνοήσουν τον έλεγχο ταχύτητας του ελέγχου τίτλων ή αντίστροφα.

Οι απαιτούμενες τεχνολογίες για να εκτελέσουν αυτήν την έρευνα αναμένονται να είναι οι ακόλουθες:

Προσομοιώσεις: Η προσομοίωση είναι και θα παραμείνει το αρχικό εργαλείο για τα σενάρια που ενδιαφέρουν αυτήν την έρευνα. Τα εργαλεία όπως τα RAMS της Eurocontrol ταιριάζουν ιδανικά για αυτήν την έρευνα.

Αριθμητική βελτιστοποίηση: Η αριθμητική βελτιστοποίηση είναι μια χρήσιμη τεχνολογία για να συγκρίνει τις προτεινόμενες έννοιες και τις αποκεντρωμένες στρατηγικές αντιμετώπισης συγκρούσεων και τροχιάς με τις "βέλτιστες" συγκεντρωμένες στρατηγικές. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που στηρίζονται επάνω στο γραμμικό προγραμματισμό ακέραιων αριθμών, ο οποίος μπορεί να συλλάβει ένα ευρύ φάσμα των περιορισμών σχετικών με την εναέρια μεταφορά καθώς παραμένει υπολογιστικά αποδοτικός, χάρη στους ισχυρούς, εμπορικούς κώδικες λογισμικού όπως το CPLEX. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των προηγμένων κωδίκων βελτιστοποίησης είναι η δυνατότητα να ληφθούν τα στοιχεία ανάλυσης ευαισθησίας μαζί με τις βέλτιστες λύσεις, δείχνοντας στα προβλήματα επίλυσης συγκρούσεων (ενδεχομένως κάτω από τους time-varying, γεωγραφικούς περιορισμούς όπως ο ειδικός εναέριος χώρος χρήσης). Αυτά τα στοιχεία ευαισθησίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απομονώσουν τους πιο δεσμευτικούς περιορισμούς στη διαδικασία επίλυσης συγκρούσεων.

Αναλυτικές προσεγγίσεις: Ενώ είναι ακόμα στα σπάργαλα, η έρευνα έχει δείξει ότι οι καθαρώς αναλυτικές - αλγεβρικές προσεγγίσεις στη μελέτη της απόδοσης των σχεδίων επίλυσης συγκρούσεων είναι δυνατές, ενδεχομένως εις βάρος της μειωμένης πρότυπης πολυπλοκότητας. Το πλεονέκτημα τέτοιων προσεγγίσεων είναι ότι τείνουν να παρέχουν τα πολύ συμπαγή επιχειρήματα που καθιερώνουν τις ιδιότητες (όπως η απόκλιση από ονομαστικό) στις τροχιές που ακολουθούνται με τα αεροσκάφη δεδομένου ότι διαχειρίζονται τις εμφανιζόμενες συγκρούσεις. Αυτά τα επιχειρήματα ισχύουν συνήθως για τις γενικές κατηγορίες συμπεριφορών αεροσκαφών, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο ένα ιδανικό συμπλήρωμα στις πρώτες δύο προσεγγίσεις.

1.6. Πολλαπλών επιπέδων προβλήματα λήψης αποφάσεων

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προκλητικών, επόμενων ερευνητικών ζητημάτων στον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας των υπαρχόντων δικτύων που φέρνουν και τα σήματα πληροφοριών και εντολής αισθητήρων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η παρουσία καθυστερήσεων (στις μεταφορές πληροφοριών και σημάτων), διοικητικής αποκέντρωσης, περιορισμών εύρους ζώνης, και αποτυχιών συνδέσεων, λαμβάνοντας υπόψη μια σταθερή δομή δικτύων εναέριας κυκλοφορίας και λαμβάνοντας υπόψη ότι η καθοδήγηση (από την πηγή στον προορισμό και πίσω στην πηγή (για την ανατροφοδότηση)) καθορίζεται από το δίκτυο. Είναι μερικές φορές δυνατό, καθώς επίσης και εφικτό, εντούτοις, για τις αρχιτεκτονικές δικτύων ή υποδικτύων που ξανασχεδιάζονται προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη προσιτή εφαρμογή, για τη δρομολόγηση που καθορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με κάποια προτεραιότητα που θέτει, και για την πρόσβαση στο δίκτυο ή τα υποδίκτυα που ελέγχεται από μια ανώτερη αρχή δικτύων, πάλι σύμφωνα με μερικές καθορισμένες προτεραιότητες. Όλα αυτά αποτελούν τα προβλήματα απόφασης *πιο υψηλού επιπέδου*, τα οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε ως *έλεγχο καθοδηγούμενης-απόδοσης* των προβλημάτων δικτύων - υποδικτύων και δρομολόγησης προβλημάτων. Αυτά θα εξεταστούν επίσης σε αυτό το προτεινόμενο ερευνητικό πρόγραμμα, με την χρησιμοποίηση εργαλείων και πλαισίων του ελέγχου και της δυναμικής θεωρίας παιγνίων. Υπάρχει σίγουρα μια οικεία σχέση μεταξύ των προσδιορισμένων ανωτέρω υψηλού επιπέδου προβλημάτων και των *χαμηλότερων* προβλημάτων αποφάσεων και ελέγχου προβλήματα που συζητήθηκαν προηγουμένως. Αναμφισβήτητα, μια ιδιαίτερη δικτυακή αρχιτεκτονική μαζί με τις προδιαγραφές δρομολόγησης έχει επιπτώσεις στην απόδοση των αλγορίθμων ελέγχου που αναπτύσσονται στο πλαίσιο της εργασίας προτεινόμενης και στη συνέχεια η φύση (και δομή) αυτών των αλγορίθμων ελέγχου έχουν επιπτώσεις στη διαδικασία σχεδίου στο πιο υψηλό επίπεδο. Σε αυτό το μέρος του προγράμματος, θα καταστήσουμε αυτήν την σχέση ακριβή (στους μαθηματικούς όρους) και θα λύσουμε το προκύπτον πρόβλημα πιο υψηλού επιπέδου που περιορίζεται από ένα σύνολο λεπτομερειών των χαμηλότερου επιπέδου σχεδίασης ελέγχου προβλημάτων. Αυτό θα απαιτήσει την εισαγωγή των μέτρων απόδοσης στο χαμηλότερο επίπεδο από την άποψη μερικών λειτουργιών χρησιμότητας για τους χρήστες, και μερικά σχέδια τιμολόγησης για τη χρήση των υπηρεσιών δικτύων, σύμφωνα με τις τοποθετήσεις προτεραιότητας και τη θέση συμφόρησης των διαφορετικών συνδέσεων του δικτύου εναέριας κυκλοφορίας.

Το πρόβλημα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας είναι εξαιρετικά σύνθετο και περιλαμβάνει διάφορους συνεργάτες, κάθε ένας που προσπαθεί ενδεχομένως να βελτιστοποιήσει τη σύγκρουση, και περιστασιακά διαφορούμενος στόχους. Ο σχεδιασμός πτήσης και η λήψη απόφασης εκτελούνται αυτήν την περίοδο σε επάρκεια, υψηλής αλληλεπίδρασης αλλά αποκεντρωμένα επίπεδα. Αυτοί περιλαμβάνουν την κεντρική διαχείριση ροής (κέντρο

εντολής συστημάτων FAA στις ΗΠΑ), τον καθοδόν έλεγχο της κυκλοφορίας, τον τοπικό έλεγχο ροής, την αναχώρηση και τον προγραμματισμό άφιξης στους αερολιμένες (εγκαταστάσεις πύργων TRACON και αερολιμένων), και τους μεμονωμένους περιορισμούς αερογραμμών και τους περιορισμούς επίγειου προσωπικού (κέντρα αερογραμμών και ελέγχου διαδικασιών σταθμών). Είναι επομένως ένα περίπλοκο σύστημα ελέγχου με τις διάφορες αλληλεπιδράσεις και τους διαφορετικούς βαθμούς σύζευξης μεταξύ των διαφορετικών συστατικών του. Οι καθυστερήσεις (π.χ., λόγω της κακοκαιρίας ή άλλων απροσδόκητων γεγονότων) μπορούν να προκαλέσουν ιδιαίτερα απρόβλεπτα αποτελέσματα λόγω της διαφορετικής σύζευξης μεταξύ αυτών των διαφορετικών συστατικών και λόγω των ισχυρών συνδέσεων μεταξύ των αερολιμένων και των καθοδόν τομέων του εναέριου χώρου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο προγραμματισμός των προχωρημένων πόρων, καθώς επίσης και η ρύθμιση στα απροσδόκητα γεγονότα που οδηγούν στις ανώμαλες διαδικασίες είναι μια σημαντική ανησυχία και για τις αερογραμμές και για το Eurocontrol. Αυτήν την περίοδο, αυτή η αποκατάσταση είναι μια πολύ αργή διαδικασία αποδίδεται συνήθως από τους ανθρώπους (κεντρικοί ελεγκτές ροής και αποστολείς αερογραμμών) που βοηθούνται από την περιορισμένη αυτοματοποίηση. Περνά από διάφορα επίπεδα ιεραρχίας, οδηγώντας συχνά στις αυξανόμενες καθυστερήσεις, τη δυσαρέσκεια πελατών αερογραμμών, και τις αυξανόμενες λειτουργικές δαπάνες για όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη. Η αυτοματοποίηση αυτού του στόχου εμφανίζεται να είναι τεχνικά εφικτή (η ανταλλαγή καιρικών πληροφοριών ή λειτουργικών στοιχείων, π.χ. καθυστερεί στους διαφορετικούς αερολιμένες, ακυρώσεις αερογραμμών, κ.λ.π. μπορεί να διαβιβαστεί αυτόματα στα διάφορα ενδιαφερόμενα συμβαλλόμενα μέρη). Το πρόβλημα είναι ότι η σύζευξη μεταξύ αυτών των διαφορετικών οντοτήτων λήψης απόφασης είναι εξαιρετικά σύνθετη και οι δυναμικές (καθυστερήσεις) που συνδέονται με καθεμία μπορεί να ποικίλει μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων ή μεταξύ των διαφορετικών ημερών. Πιστεύουμε ότι οι πολλαπλής στάθμης τεχνικές απόφασης και ελέγχου που θα αναπτυχθούν θα έχουν τις σημαντικές διακλαδώσεις για τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας και της επίγειας κυκλοφορίας δεδομένου ότι οι απαιτήσεις αυξάνονται και οι καινοτόμες προσεγγίσεις (όπως η Ελεύθερη Πτήση) υιοθετούνται για να αυξήσουν την αποδοτικότητα.

1.7. Παράγωγα

Τα παράγωγα της προτεινόμενης εργασίας θα αποτελούν:

- I. Περιγραφή των στοιχείων τίθεται για να χρησιμοποιηθεί στην πρότυπη βαθμονόμηση, και την περιγραφή του συνόλου προβλέψεων που συγκρίνονται με τα στοιχεία όσον αφορά τις παρατηρούμενες διαδικασίες

- II. Περιγραφή, η ανάλυση απόδοσης και οι λεπτομερείς αποδείξεις ακρίβειας των αλγορίθμων για τον προγραμματισμό τροχιάς, την ανίχνευση της πιθανότητας σύγκρουσης, την εκτίμηση λάθους θέσης, και την πρόβλεψη των χρόνων άφιξης και αναχώρησης
 - III. Λογισμικό για την εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων και τεχνικών ελέγχου, και λογισμικό για να υποστηρίξει τις καθοδόν και εδάφους διαδικασίες
 - IV. Συστάσεις στις ρυθμιστικές αρχές, σχετικά με τα ζητήματα και τους στόχους του ATM, τις προδιαγραφές και τους λειτουργούντες κανόνες (όπως τα μοντέλα χωρισμού, κ.λ.π...), και τις τεχνικές ικανότητες και απαιτήσεις
 - V. Παροχή στις ρυθμιστικές αρχές με τα πραγματικά και προσομοιωμένα στοιχεία τίθεται για να χρησιμοποιηθεί για παρόμοιους ή άλλους λόγους εξετάζοντας τα στοιχεία επικοινωνίας της υποδομής συστημάτων του ATM που απαιτούνται για να υποστηρίξουν τη διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας. Θα αξιολογηθούν οι επιλογές εφαρμογής για την καταλληλότητα και κερδοφορία που θα επιτύγχαναν τους στόχους του ATM για μια δεδομένη περιοχή ή / και κυκλοφοριακή ροή
 - VI. Επίδειξη των χαρακτηριστικών αποτελεσματικότητας και ασφάλειας του ενσωματωμένου λογισμικού μας με την εφαρμογή του στα πραγματικά σενάρια που θα ληφθούν από την EUROCONTROL.
-

Κεφάλαιο 2^ο

Περιγραφή υπό ανάπτυξη μοντέλων

2.1.Εισαγωγή

Ακολουθούν τρεις βιβλιογραφικές αναφορές για απλά μοντέλα αναμονής εισόδου – εξόδου σε επίγειες διαδικασίες πολυάσχολων αερολιμένων.

2.2.Μοντέλο Α

Ένα απλό μοντέλο αναμονής για τις διαδικασίες αναχώρησης ενός πολυάσχολου αερολιμένα προτείνεται. Αυτό το μοντέλο είναι βαθμονομημένο και επικυρωμένο χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες διαμορφώσεις διαδρόμων και τα στοιχεία κυκλοφοριακής κίνησης. Το μοντέλο χρησιμοποιείται έπειτα για να αξιολογήσει τα προκαταρκτικά σχέδια ελέγχου που στοχεύουν στην ανακούφιση της συμφόρησης αναχωρήσεων στην επιφάνεια του αερολιμένων. Ο βασικός αντίκτυπος αυτών των στρατηγικών ελέγχου στις άμεσες λειτουργικές δαπάνες, στις περιβαλλοντικές δαπάνες και η συνολική καθυστέρηση είναι καταμετρημένα και υπό συζήτηση. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της δυνατότητας επίτευξης και των οφελών των μηχανισμών του ελέγχου αναχώρησης που στοχεύουν στη μείωση της σειράς αναμονής αναχώρησης σε χαμηλών ικανοτήτων συνθήκες.

Παρέχεται ένα μοντέλο μιας διαδικασίας αναχώρησης αερολιμένων το οποίο επικυρώνεται λεπτομερώς κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργικών στοιχείων και ποσοτικοποιεί τα αποτελέσματα από τον έλεγχο διεργασίας αναχώρησης. Η αναφορά αυτή διαφοροποιείται από τις προηγούμενες δημοσιεύσεις από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- το στοχαστικό μοντέλο του αερολιμένα που αναπτύσσεται μέσα σε αυτό το έγγραφο εξηγεί τέτοιες επεξηγηματικές μεταβλητές όπως οι διαμορφώσεις διαδρόμων και οι τερματικές θέσεις αερογραμμών.
-

- σε κάθε διαμόρφωση διαδρόμων, οι ακόλουθες πρότυπες παράμετροι είναι βαθμονομημένες χρησιμοποιώντας ενός έτους από τα ιστορικά στοιχεία:
- κατανομή του χρόνου ταξιδιού από τα τερματικά στους διαδρόμους αναχώρησης
- ποσοστό υπηρεσιών διαδρόμων αναχώρησης
- σε κάθε διαμόρφωση διαδρόμων, τα ακόλουθα πρότυπα εξόδων επικυρώνονται χρησιμοποιώντας ενός διαφορετικού έτους στοιχεία:
- κατανομή του αριθμού αεροσκαφών στο σύστημα τροχοδρόμων,
- διανομές των taxi-out χρόνων σε ελαφρές, μέτριες και σφοδρές καιρικές συνθήκες
- κατανομή του πραγματοποιημένου ποσοστού αναχώρησης
- τα σχέδια ελέγχου αναχώρησης προτείνονται και δοκιμάζονται στο μοντέλο διαδικασίας αναχώρησης. Η μείωση των χρόνων αναμονής διαδρόμων πραγματοποιημένων από αυτά τα σχέδια ελέγχου μεταφράζονται σε μειώσεις στις άμεσες λειτουργικές δαπάνες και τις εκπομπές ρύπων.
- η απαίτηση αναχώρησης που χρησιμοποιείται για να εξετάσει τα σχέδια ελέγχου αναχωρήσεων λαμβάνεται από την ιστορικό απαίτηση εγγραφών που αντιπροσωπεύουν ακριβώς την ‘ομαδοποίηση χρονοπρογράμματος’ (π.χ. πολλές πτήσεις προγραμματίζονται σε κυκλικούς χρόνους για λόγους μάρκετινγκ).

Η αναφορά είναι δομημένη ως εξής: παρουσιάζει τα σύνολα δεδομένων ASQP και PRAS που χρησιμοποιούνται για να επικυρώσουν το μοντέλο και χρησιμεύουν ως μια βασική γραμμή για δοκιμή των νέων νόμων ελέγχου διεργασιών αναχώρησης, περιγράφει λεπτομερώς τη δομή στο μοντέλο και τη διαδικασία βαθμονόμησης και επικύρωσης και εισάγει τα απλά σχέδια ελέγχου διεργασίας αναχώρησης και αξιολογεί τα οφέλη τους μέσω των προσομοιώσεων υπολογιστών.

2.2.1.Πηγές στοιχείων

2.2.1.1.Airline Service Quality Performance (ASQP) βάση δεδομένων

Τα στοιχεία της Airline Service Quality Performance (ASQP) συλλέγονται από το Department of Transportation προκειμένου να υπολογιστούν έγκαιρα τα στατιστικά απόδοσης για τις 10 κύριες εσωτερικές αερογραμμές. Τα σύνολα των στοιχείων περιλαμβάνουν όλα τις πτήσεις που πετάνε με τις ακόλουθες δέκα αερογραμμές: Alaska, American, America West, Continental, Delta, Northwest, TWA, United, και U.S.Airways.

Για κάθε πτήση που καταγράφεται, το σύνολο στοιχείων περιέχει λειτουργικές πληροφορίες όπως:

- ✓ σχεδιασμένος και πραγματικός χρόνος αναχώρησης από τις πύλες

- ✓ πραγματικός χρόνος απογείωσης και προσγείωσης
- ✓ σχεδιασμένος και πραγματικός χρόνος άφιξης στις πύλες.

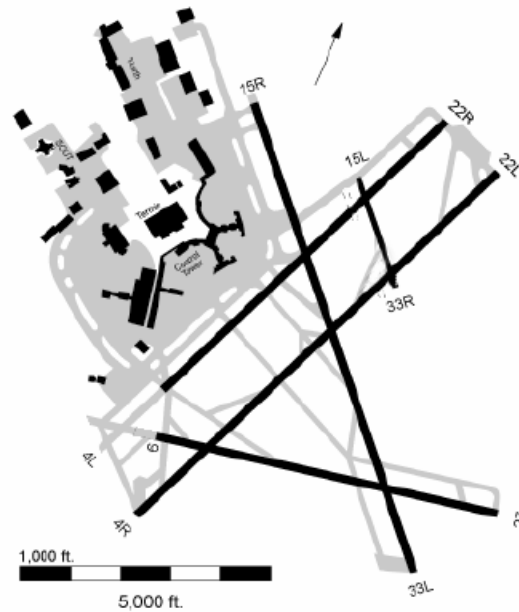
Τα σύνολα στοιχείων ASQP τίθενται στην διάθεση του κοινού μηνιαία (με μια καθυστέρηση 2 μηνών). Τα μηνιαία αρχεία περιλαμβάνουν περίπου 400.000 πτήσεις. Για όλες τις αερογραμμές εκτός της Southwest, τα ‘πραγματικά’ στοιχεία αυτόματα αναφέρονται μέσω του ACARS (Automatic Communications And Reporting System) σύστημα σύνδεσης στοιχείων. Παραδείγματος χάριν, ο χρόνος αναχώρησης από τις πύλες καταγράφεται όταν τα φρένα των αεροσκαφών απελευθερώνονται. Αυτά τα στοιχεία επικυρώθηκαν στην περίπτωση του Boston Logan Airport και διαπιστώθηκε ότι αν και το σήμα απελευθέρωσης φρένων μπορεί να διαφέρει από την πραγματική έναρξη της διαδικασίας pushback, οι εγγραφόμενοι χρόνοι ήταν πολύ κοντά στους παρατηρούμενους.

Οι πραγματικοί χρόνοι απογείωσης έχουν γίνει δημόσια διαθέσιμοι μόνο από τον Ιανουάριο του 1995. Ο taxi-out χρόνος ορίζεται εδώ ως ο χρόνος μεταξύ πραγματικού pushback και της απογείωσης. Στο Boston Logan Airport, τα αεροσκάφη είναι συνεχώς υπό τον έλεγχο του Πύργου Ελέγχου Αερολιμένων μεταξύ αυτών των δύο γεγονότων, ενώ, στην περίπτωση μερικών μεγαλύτερων αερολιμένων πλημνών, δίδονται από τους ελεγκτές κεκλιμένων ραμπών των αερογραμμών στον Πύργο Ελέγχου αερολιμένων σε έναν άγνωστο χρόνο. Η διαδικασία αναχώρησης σε έναν αερολιμένα όπως το Boston Logan αναμένεται έτσι να επιδείξει λιγότερη μεταβλητότητα. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι αφού μια ενιαία επιχείρηση, η ARINC, λαμβάνει αυτά τα στοιχεία σε πραγματικό χρόνο, είναι σχετικά εύκολο να τα τροφοδοτήσει σε πραγματικό χρόνο σε μία υπηρεσία ελέγχου.

Σημειώστε ότι τα στοιχεία ASQP λαμβάνουν υπόψη μόνο εσωτερικές αεριωθούμενες διαδικασίες των δέκα σημαντικών αερογραμμών, ακόμα και αν οι διαδικασίες ελικοφόρων αεροσκαφών των περιφερειακών αερογραμμών μπορούν να αποτελέσουν τουλάχιστον το 45% των διαδικασιών προσγείωσης και απογείωσης σε έναν αερολιμένα όπως το Boston Logan. Υποτίθεται ότι ένα χρήσιμο μοντέλο της διαδικασίας αναχώρησης αεροσκαφών αεριωθούμενων αεροπλάνων μπορεί ακόμα να αναγνωρισθεί και να επικυρωθεί, ακόμα κι αν τα ελικοφόρα αεροσκάφη ανταγωνίζονται για τους ίδιους τροχοδρόμους και διαδρόμους, ειδικά σε χαμηλής ικανότητας διαμόρφωση. Εντούτοις, οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν εδώ θα μπορούσαν εύκολα να γίνουν περισσότερο ακριβής με την εξέταση των πληρέστερων συνόλων δεδομένων όπως διατίθενται. Ειδικότερα, οι αβεβαιότητες που παρατηρήθηκαν σε όλη τη μελέτη τη διαδικασία αναχώρησης θα μπορούσαν να μειωθούν σημαντικά εάν ήταν διαθέσιμα περισσότερα στοιχεία όσον αφορά τις διαδικασίες των ελικοφόρων αεροσκαφών.

2.2.1.2. Preferential Runway Assignment System (PRAS) βάση δεδομένων

Το μίγμα των διαδρόμων που είναι σε χρήση σε έναν αερολιμένα σε οποιονδήποτε δεδομένο χρόνο καλείται ‘διαμόρφωση διαδρόμου’. Εξετάστε παραδείγματος χάριν το σχεδιάγραμμα του Boston Logan Airport που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Σχεδιάγραμμα του Boston Logan International Airport

Διαφορετικοί διάδρομοι αναχώρησης και άφιξης χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τον εναέριο χώρο ή τις διαδικασίες μείωσης θορύβου:

Σε καλό καιρό, παράλληλες οπτικές προσεγγίσεις μπορεί να χρησιμοποιούνται στους διαδρόμους 4L και 4R για να επιτύχουν ένα υψηλό ποσοστό προσγείωσης, ενώ οι αναχωρήσεις πραγματοποιούνται στο διάδρομο 4R και στον τεμνόμενο διάδρομο 9 για να επιτύχουν ένα υψηλό ποσοστό αναχώρησης.

Σε κακοκαιρία, και εάν οι άνεμοι είναι ισχυροί, μόνο ένας διάδρομος (παραδείγματος χάριν διάδρομος 33L) μπορεί να είναι διαθέσιμος για απογειώσεις και προσγειώσεις. Σε τέτοιες διαμορφώσεις, οι ικανότητες αναχώρησης και προσγείωσης του αερολιμένα μειώνονται πολύ.

Το σχήμα 2.1 σαφώς δείχνει ότι ο χρόνος ταξιδιού μιας πτήσης από την πύλη του στο κατώτατο όριο διαδρόμου θα ποικίλει σημαντικά με τη θέση της πύλης στο τερματικό και τη θέση του διαδρόμου στην επιφάνεια του αερολιμένα. Η διαμόρφωση διαδρόμων είναι επομένως σημαντικός παράγοντας διαδικασίες taxiing του αερολιμένα.

Οι διαμορφώσεις διαδρόμων επιλέγονται από τους πύργους ελέγχου του αερολιμένα κατά μήκος της ημέρας καθώς ο καιρός εξελίσσεται. Δυστυχώς, τα ιστορικά στοιχεία διαμόρφωσης διαδρόμου είναι συνήθως καταγεγραμμένα μόνο στα ημερολόγια αεροσκαφών και αρχειοθετημένα για έναν περιορισμένο χρόνο. Εντούτοις, για να παρακολουθήσει τις διαδικασίες μείωσης θορύβου, η αρχή αερολιμένα της

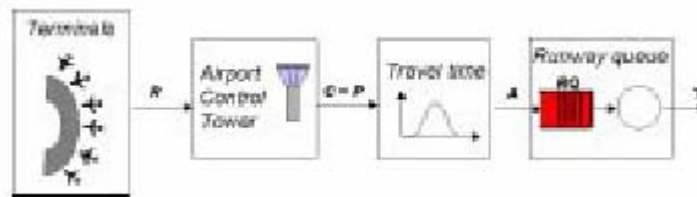
Μασαχουσέτης έχει εφαρμόσει ένα Προνομιακό Σύστημα Ανάθεσης Διαδρόμων (PRAS) το οποίο ενημερώνει ένα ψηφιακό αρχείο των διαμορφώσεων διαδρόμων μέσα στον πύργο ελέγχου του Boston Logan. Εδώ επομένως θα επικεντρωθεί στο Boston Logan Airport, αλλά η αναγνώριση και οι μέθοδοι ελέγχου που εισάγει θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε οποιουσδήποτε άλλους αερολιμένες όπου τα στοιχεία διαμορφώσεων θα ήταν διαθέσιμα.

Τα στοιχεία PRAS διαμορφώσεων διαδρόμων δείχνουν ότι ο αερολιμένας του Boston Logan λειτουργεί συνήθως μέσα σε υψηλής ικανότητας διαμορφώσεις (για το 81% της αναχώρησης διαδικασίες, η κατ' εκτίμηση ικανότητα αναχώρησης) που είναι πάνω από 44 αεροσκάφη ανά ώρα. Εντούτοις, ο αντίκτυπος των διαμορφώσεων χαμηλής ικανότητας είναι ακόμα σημαντικός δεδομένου ότι συνδέονται με καθυστερήσεις αναχώρησης και πολύ μακροχρόνιους taxi-out χρόνους.

2.2.2.Μοντέλο βαθμονόμησης και επικύρωσης

2.2.2.1.Μοντέλο της δομής

Μια σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2. Η εξέλιξη του συστήματος μοντελοποιείται από διακριτά 1-λεπτού χρονικά διαστήματα: $t = 1, 2, \dots$



Σχήμα 2.2 Δομή του μοντέλου διαδικασίας αναχώρησης για τις τρέχουσες διαδικασίες

Ορισμοί:

$R(t)$ = ο αριθμός των αιτημάτων pushback κατά τη διάρκεια της περιόδου t .

$C(t)$ = ο αριθμός αεροσκαφών που προωθούνται για να κάνουν pushback από τους ελεγκτές πύργων αερολιμένων κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος t .

$P(t)$ = ο αριθμός των pushbacks που πραγματοποιούνται πραγματικά κατά τη διάρκεια της περιόδου t .

$N(t)$ = ο αριθμός των υπό αναχώρηση αεροσκαφών στο σύστημα τροχοδρόμων στην αρχή της περιόδου t .

$A(t)$ = ο αριθμός αεροσκαφών που φθάνουν στη σειρά αναμονής διαδρόμων κατά τη διάρκεια της περιόδου t .

RQ (t) = ο αριθμός των αεροσκαφών που περιμένουν αριστερά στη σειρά αναμονής αναχώρησης στους τροχοδρόμους στο τέλος της περιόδου t (σημειώστε ότι αυτή η σειρά αναμονής μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να διαδοθεί μεταξύ διάφορων διαδρόμων αναχώρησης)

RC (t) = η ικανότητα των διαδρόμων αναχώρησης κατά τη διάρκεια της περιόδου t.

T (t) = ο αριθμός των απογειώσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου t.

Οι δυναμικές του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

Ενέργεια πύργων ελέγχου αερολιμένων:

Το **C (t)** καθορίζεται από τους πύργους ελέγχου των αερολιμένων, και μπορεί να λάβει υπόψη:

- τις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες στην επιφάνεια αεροδρομίων.
- τα τρέχοντα αιτήματα **R (t)**
- τις προβλέψεις των μελλοντικών απαιτήσεων αναχώρησης και ικανότητας.

Υποτίθεται εδώ ότι τα αεροσκάφη κάνουν pushback αμέσως μετά τη λήψη της άδειας, έτσι ώστε **P (t) = C (t)**.

Χρόνος ταξιδιού:

Οι αφίξεις στη σειρά αναμονής διαδρόμων **A (t)** σχετίζονται με τα pushbacks **P (t)** μέσω των χρόνων ταξιδιού με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\mathbf{A}(\mathbf{t}) = \sum_{\tau \geq 0} \left[\sum_{k=1}^{P(t-\tau)} U(t-\tau, k, \tau) \right] \quad (1)$$

όπου $U(t-\tau, k, \tau)$ είναι ένας δείκτης τυχαίων μεταβλητών που παίρνει την τιμή 1 εάν το k-οστό αεροπλάνο κάνει pushback σε χρόνο t-τ έχει χρόνο ταξιδιού τ για τη σειρά αναμονής διαδρόμων.

Σειρά αναμονής διαδρόμων:

Η σειρά αναμονής διαδρόμων ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας:

$$\mathbf{RQ}(t) = \mathbf{RQ}(t-1) + \mathbf{A}(t) - \mathbf{T}(t) \quad (2)$$

Απογείωση:

Το ποσοστό επιτυχημένων απογειώσεων περιορίζεται από την ικανότητα των διαδρόμων **RC (t)** και από τον αριθμό **RQ (t)** των διαθέσιμων αεροσκαφών για απογείωση:

$$\mathbf{T}(t) = \min([\mathbf{RQ}(t-1) + \mathbf{A}(t)], \mathbf{RC}(t)) \quad (3)$$

Επιπλέον, η παράμετρος ‘φόρτωσης τροχοδρόμων’ ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας:

$$N(t) = N(t-1) + P(t-1) - T(t-1) \quad (4)$$

2.2.2.2. Μοντέλο βαθμονόμησης

Ο σκοπός της βαθμονόμησης είναι να παρατηρεί τις ιστορικές εισόδους και εξόδους των συστημάτων και να συναγάγει τις ‘καλύτερες’ τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου.

2.2.2.2.1. Αιτήσεις *Pushback* και άδειες

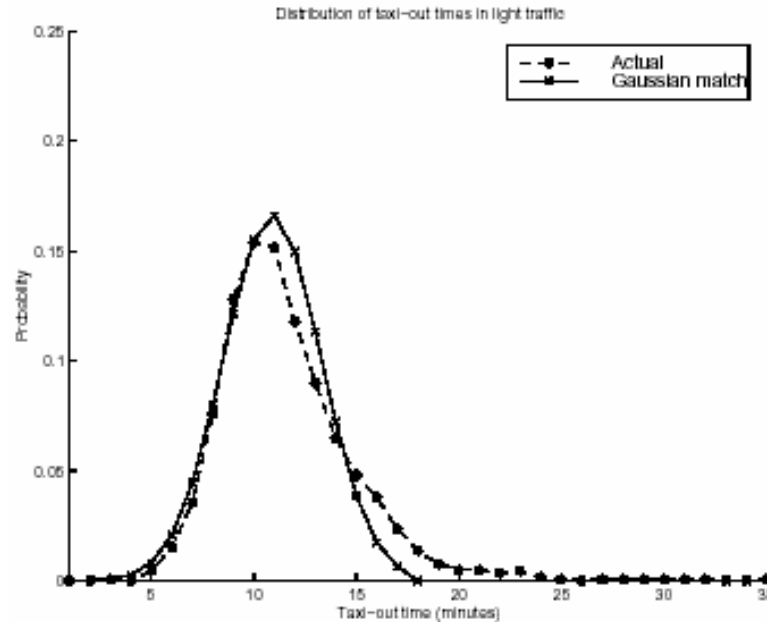
Το σχήμα 2.1 δείχνει ότι η είσοδος του μοντέλου είναι ο αριθμός των pushback αιτήσεων $R(t)$. Εντούτοις αυτή η είσοδος δεν συλλαμβάνεται στα στοιχεία ASQP. Πράγματι, ο OAG (Επίσημος Οδηγός Αερογραμμών) επηρεάζει μόνο τους προγραμματισμένους χρόνους αναχώρησης αλλά δεν υπολογίζει τα εσωτερικά γεγονότα ή αποφάσεις αερογραμμών που θα μπορούσαν να καθυστερήσουν το αίτημα για το pushback μιας πτήσης. Επιπλέον, η ενέργεια ελέγχου των πύργων ελέγχου αερολιμένων μεταξύ των αιτημάτων για pushback και τα πραγματικά pushbacks δεν παρατηρείται. Συνεπώς, η αναγνώριση μοντέλου που παρουσιάζεται εστιάζει στη φάση της κίνησης της διαδικασίας αναχώρησης, δηλ. το μέρος το μοντέλου μεταξύ του $P(t)$ και του $T(t)$. Ως εκ τούτου, η είσοδος που χρησιμοποιείται για το μοντέλο βαθμονόμησης είναι τώρα ο αριθμός pushbacks $P(t)$ κατά τη διάρκεια της περιόδου t , που είναι ο αριθμός των πραγματικών αναχωρήσεων που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της περιόδου t στα στοιχεία ASQP.

2.2.2.2.2. Χρόνος ταξιδιού από τα τερματικά στο διάδρομο

Ο χρόνος ταξιδιού από τα τερματικά στο διάδρομο δεν παρατηρείται άμεσα στα στοιχεία ASQP. Πράγματι οι χρόνοι taxi-out που απαριθμούνται στο σύνολο δεδομένων ASQP είναι μετρημένοι από το pushback στην απογείωση, και είναι επομένως το άθροισμα του χρόνου ταξιδιού στη σειρά αναμονής διαδρόμων και του χρόνου αναμονής διαδρόμων.

Παρατηρήσεις των taxi-out χρόνων του ASQP στις ώρες μη αιχμής, όταν το $N(t)$ είναι πολύ χαμηλό, δίνουν μια καλή ένδειξη του χρόνου ταξιδιού, δεδομένου ότι αυτό αντιστοιχεί συνήθως σε περιόδους με ελάχιστη ή καμία σειρά αναμονής διαδρόμων.

Για ένα αεροσκάφος k , το $N_{PB}(k)$ ορίζεται να είναι η τιμή του N όταν το αεροσκάφος k κάνει pushback (δηλ. ο αριθμός των αεροσκαφών υπό αναχώρηση στο σύστημα τροχοδρόμων όταν αεροσκάφος k κάνει pushback). Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει μία χαρακτηριστική κατανομή των taxi-out χρόνων του ASQP για τα αεροσκάφη έτσι ώστε $N_{PB}(k) \leq 2$. Σημειώστε ότι αυτός ο χρόνος ταξιδιού περιέχει τον κατάλογο απογείωσης και την αρχική αναρρίχηση μέχρι τον χρόνο όταν το μήνυμα απογείωσης ACARS σταλεί.



Σχήμα 2.3 Επιλογή μιας γκαουσιανής κατανομής για να ταιριάζει με μια ελαφριάς κυκλοφοριακής κίνησης taxi-out κατανομή

Η μεταβλητότητα σε αυτές τις διανομές προκύπτει από διάφορους παράγοντες:

- μεταβλητότητα στη διάρκεια του πραγματικού pushback και η έναρξη μηχανών
- μεταβλητότητα ελικοφόρου αεροσκάφους στην πραγματοποίηση διαδικασιών ταυτόχρονα
- διαφορετικές πτήσεις από την ίδια αερογραμμή μπορούν να είναι προσδιορισμένες σε διαφορετικούς διαδρόμους αναχώρησης ή σε διαφορετικές taxi διαδρομές στον ίδιο διάδρομο
- η taxi ταχύτητα μπορεί να επηρεαστεί από την ορατότητα και τους τύπους αεροσκαφών
- τα αεροσκάφη που περιορίζονται σε ορισμένους προορισμούς λαμβάνουν τους αριθμούς του βάρους τους και της ισορροπίας τους αργότερα από άλλους και έτσι κρατάει περισσότερο για να εισαχθούν στη σειρά αναμονής διαδρόμων

Αυτοί οι παράγοντες διαμορφώνονται ως στοχαστική αβεβαιότητα. Πιθανότητα που μοιάζει γκαουσιανή οι συνολικές συναρτήσεις ταιριάζουν στο παρατηρούμενη κατανομή για να λάβει ένα λογικό μοντέλο του χρόνου ταξιδιού για χαμηλές τιμές του N . Παραδείγματος χάριν, μία γκαουσιανή κατανομή με μέση τιμή 9 λεπτά και σταθερή απόκλιση 2.3 λεπτά επιλέχθηκαν για την αερογραμμή που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.3.

Μια απλή εκτίμηση του taxi-out χρόνου είναι έπειτα:

$$\tau = \tau_{\text{travel}} + \tau_{\text{queue}} \quad (5) \text{ όπου:}$$

τ_{travel} = χρόνος ταξιδιού που ακολουθεί τη κατανομή ελαφριάς κυκλοφοριακής κίνησης που περιγράφεται ανωτέρω.

τ_{queue} = χρόνος αναμονής στο διάδρομο.

Σημειώστε ότι αυτό το μοντέλο θα υπερεκτιμήσει ελαφρώς τους taxi-out χρόνους όταν το N είναι μεγάλο, επειδή δεν λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι όσο η σειρά αναμονής διαδρόμων αυξάνεται, ο χρόνος ταξιδιού τ_{travel} που φθάνει αυτό μειώνεται.

2.2.2.2.3. Διαδικασία υπηρεσιών διαδρόμων αναχώρησης

Η δυναμική των συστημάτων διαδρόμων είναι αντικείμενο των πολυάριθμων μελετών και των δημοσιεύσεων. Εντούτοις, μοντέλα διαδρόμων αναχώρησης διακριτού γεγονότος τα οποία εξετάζουν κάθε απογείωση χωριστά παραμένουν δύσκολα να προσδιορίσουν και να επικυρωθούν. Πράγματι, ενώ υπάρχουν μερικά στοιχεία διαθέσιμα στην έξοδο του συστήματος διαδρόμων (π.χ. χρόνοι απογείωσης ASQP), υπάρχουν λίγα ή κανένα αντικειμενικό και στατιστικά σημαντικό στοιχείο διαθέσιμο στις εισόδους του:

- χρόνοι στους οποίους τα αεροσκάφη ενώνουν μια σειρά αναμονής διαδρόμων
- διασταυρώσεις διαδρόμων με μετακίνηση taxi ή με προσγείωση των αεροσκαφών
- αποβάσεις στους διαδρόμους αναχώρησης
- αποβάσεις στη διασταυρώσεις των διαδρόμων
- απογείωση ελικοφόρων αεροσκαφών

Κατά συνέπεια μια ανάλυση των χρόνων αναχώρησης δεν μπορεί ακριβώς να διαχωρίσει εάν ένας μεγαλύτερος χρόνος από το μέσο χρόνο υπηρεσιών οφείλεται σε μία προς στιγμήν κενή ουρά αναμονής διαδρόμου ή σε μια απουσία server (όπως μια προσγείωση ή διάσχιση διαδρόμου).

Η ανάλυση των στοιχείων απογείωσης ASQP είναι περαιτέρω πολύπλοκη από τη φτωχή ανάλυση χρόνου του συνόλου δεδομένων (οι αυξήσεις ενός λεπτού είναι συγκρίσιμες με τους χαρακτηριστικούς χρόνους υπηρεσιών διαδρόμων).

Η μέθοδος που υιοθετείται σε αυτήν την μελέτη προσδιορίζει τις χρονικές περιόδους όταν η σειρά αναμονής διαδρόμων είναι απίθανο να είναι κενή, και να θεωρήσει ότι το ιστόγραμμα των ποσοστών απογείωσης κατά τη διάρκεια αυτών των χρονικών περιόδων είναι μια καλή προσέγγιση της θεωρητικής κατανομής ποσοστού υπηρεσιών διαδρόμων αναχωρήσεων. Αυτή η προσέγγιση θα ήταν εύκολο να εφαρμοστεί εάν το μήκος της σειράς αναμονής διαδρόμων $RQ(t)$ θα μπορούσε να παρατηρηθεί άμεσα. Αλλά εφόσον κανένα στοιχείο μήκους σειρών αναμονής διαδρόμων δεν είναι διαθέσιμο σήμερα, ο

αριθμός $N(t)$ αεροσκαφών αναχώρησης στο σύστημα τροχοδρόμων χρησιμοποιείται αντί αυτού. Θα παρουσιαστεί ότι αυτή η τιμή του $N(t)$ είναι πράγματι καλός προάγγελος φόρτωσης διαδρόμων αναχώρησης κατά τη διάρκεια κάποιας χρονικής περιόδου μετά από t .

2.2.2.3. Σύγκριση της μοντελοποιημένης εξόδου με ιστορικά στοιχεία

Μια προσομοίωση υπολογιστών του μοντέλου που περιγράφεται ανωτέρω χρησιμοποιήθηκε για να συγκρίνει τα βασικά μοντελοποιημένα αποτελέσματα με ASQP ιστορικά στοιχεία. Κάθε προσομοίωση υπολογιστών που οργανώνεται καλύπτει όλες τις χρονικές περιόδους στο 1996 όταν η επιλεγόμενη διαμόρφωση χρησιμοποιήθηκε. Δεδομένου ότι το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την αναμονή στις καθυστερήσεις και τις μεθόδους ελέγχου για να μειώσει αυτές τις καθυστερήσεις, πρέπει να παρέχει τις καλές εκτιμήσεις:

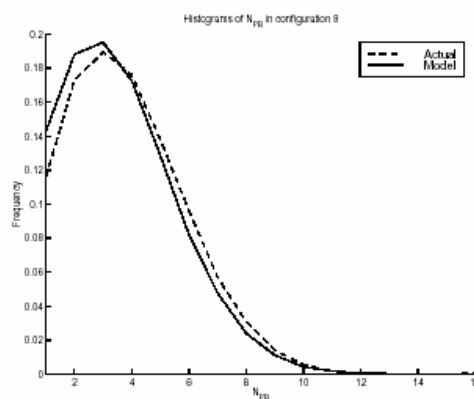
- πόσα αεροσκάφη περιμένουν στις σειρές αναμονής διαδρόμων (δηλ. $RQ(t)$)
- πόσο καιρό αυτά τα αεροσκάφη περιμένουν στη σειρά στο διάδρομο (δηλ. τ_{queue})

Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές δεν συλλαμβάνονται άμεσα στα στοιχεία ASQP, το μοντέλο αξιολογείται αντί αυτού στον τρόπο με τον οποίο καλά προβλέπει:

- πόσα αεροσκάφη είναι στο σύστημα τροχοδρόμων όταν πτήσεις κάνουν pushback (δηλ. N_{PB})
- πόσο καιρό οι μακροχρόνιοι taxi-out χρόνοι τ είναι, για τις διάφορες τιμές του N_{PB}

Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει σύγκριση αποτελεσμάτων για τη διαμόρφωση αριθμός 8 (αναχωρήσεις στους διαδρόμους 9 και 4R, αφίξεις στους διαδρόμους 4R και 4L). Αυτή η διαμόρφωση ήταν σε χρήση για περίπου 88200 λεπτά μέσα στο 1996 (δηλ. περίπου 1470 ώρες), και αντιπροσωπευόμενα 21500 pushbacks (που αντιπροσωπεύει 24,4% του συνόλου).

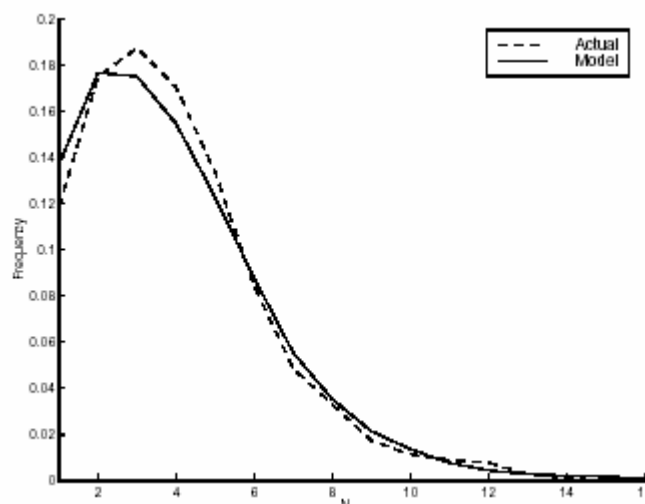
Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει ‘πραγματική’ κατανομή του N_{PB} που παρατηρήθηκε στη βάση δεδομένων ASQP το 1996, μαζί με την ‘προσομοιωμένη’ κατανομή του N_{PB} υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο πάνω από 10 τρεξίματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 2.4 Πραγματική και υπολογιστική προσομοίωση του μοντέλου κατανομών του N_{PB} στην διαμόρφωση 8

Το σχήμα 2.5 παρουσιάζει σύγκριση αποτελεσμάτων για το διαμόρφωση αριθμός 9, που είναι μία χαμηλότερης ικανότητας διαμόρφωση (αναχωρήσεις στους διαδρόμους 9 και 4R, και αφίξεις στον 4R μόνο). Η διαμόρφωση 9 ήταν σε χρήση για 21800 λεπτά το 1996 (δηλ. περίπου 360 ώρες), και αντιπροσωπευόμενα 3340 pushbacks (που αντιπροσωπεύει το 3,9% του συνόλου). Δεδομένου ότι είναι μιας χαμηλής ικανότητας διαμόρφωση, αυτό συμβάλλει σημαντικά στο αναμονή σειράς στο διάδρομο και έτσι προκαλούνται θόρυβος και μολυσματικές εκπομπές.

Το σχήμα 2.5 παρουσιάζει ‘πραγματικές’ διανομές N_{PB} κατά τη διάρκεια του 1996 μαζί με τις προσομοιωμένες διανομές (που υπολογίζονται κατά μέσο όρο πάνω από 10 τρεξίματα προσομοίωσης).



Σχήμα 2.5 Πραγματική και υπολογιστική προσομοίωση του μοντέλου κατανομών του N_{PB} στην διαμόρφωση 9

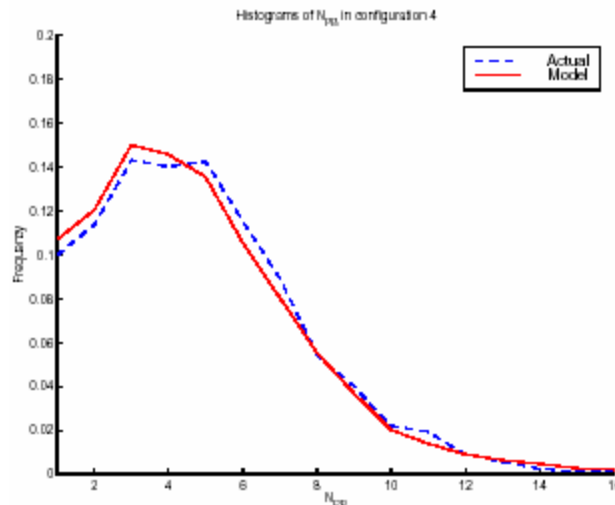
2.2.3. Επικύρωση του μοντέλου

Οι προηγούμενες ενότητες περιέγραψαν τη βαθμονόμηση του μοντέλου διαδικασίας αναχώρησης βασισμένο στα 1996 ASQP στοιχεία. Για να εξετάσει τη δυνατότητα εφαρμογής αυτού βαθμονομημένου μοντέλου σε άλλα έτη, μια επίσημη επικύρωση εκτελέστηκε. Στην προσομοίωση με υπολογιστή δόθηκαν ως είσοδοι τα στοιχεία απαίτησης αναχώρησης του 1997, και οι συνακόλουθες μοντελοποιημένες έξοδοι (η κατανομή N_{PB} , πραγματοποιημένου ποσοστού αναχώρησης, και taxi-out χρόνων) συγκρίθηκαν με αντίστοιχες πραγματικές διανομές που υπολογίζονται από τα στοιχεία ASQP.

Στις περισσότερες διαμορφώσεις διαδρόμων οι μοντελοποιημένες έξοδοι ακόμα αντιστοιχούν σε μεγάλο βαθμό στα πραγματικά στοιχεία. Για τη διαμόρφωση 4

(αναχωρήσεις και αφίξεις στους διαδρόμους 22L και 22R) το σχήμα 2.6 παρουσιάζει τη κατανομή N_{PB} λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο μαζί με την πραγματική κατανομή.

Σε μερικές διαμορφώσεις εντούτοις, το μοντέλο ελαφρώς υπερεκτίμησε την ικανότητα αναχώρησης (σε έναν παράγοντα από 5% ως 10%) και συνεπώς υποτίμησε την συμφόρηση επιφάνειας και τις καθυστερήσεις. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί κατανοητά από τις διαφορετικές καιρικές συνθήκες ή από μερικές αλλαγές στις λειτουργικές διαδικασίες μεταξύ 1996 και 1997.



Σχήμα 2.6 Σύγκριση πραγματικών και προσομοιωμένων NPB κατανομών για τη διαμόρφωση 4 το 1997

2.2.4. Έλεγχος της διαδικασίας αναχώρησης

Η ενότητα αυτή εισάγει τα δύο σημαντικά κίνητρα για τη μείωση των χρόνων αναμονής διαδρόμων:

μειώσεις των άμεσων λειτουργικών δαπανών

μειώσεις των περιβαλλοντικών δαπανών.

Ακολουθώς εξετάζονται μερικοί από τους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διατύπωση από τα σχέδια ελέγχου διεργασίας αναχώρησης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ποσοτικής αξιολόγησης σχεδίων του απλού ελέγχου διεργασίας αναχώρησης. Αυτή η αξιολόγηση ήταν καθορισμένη χρησιμοποιώντας το μοντέλο που αναπτύσσεται παραπάνω.

2.2.4.1. Κίνητρο: Κόστος του διαδρόμου αναμονή έναντι των καθυστερήσεων πυλών

2.2.4.1α. Άμεσες λειτουργικές δαπάνες

Οι αμερικάνικες αερογραμμές πρέπει για να εκθέσουν τα στοιχεία των Άμεσων Λειτουργικών Δαπανών (DOC) στο Τμήμα Μεταγωγών. Ακόμα κι αν αυτά τα στοιχεία μπορούν να επηρεάζονται από τη μεταβλητότητα στις μεθόδους λογιστικής, παρέχουν λογικές εκτιμήσεις του DOC.

Τα σημαντικότερα συστατικά του DOC είναι δαπάνες καυσίμων, δαπάνες πληρωμάτων και δαπάνες συντήρησης. Σημειώστε ότι οι ασήμαντες δαπάνες πληρωμάτων και συντήρησης είναι δύσκολο να εκτιμηθούν λόγω των σύνθετων γενικών εξόδων που συνδέονται με αυτά τα συστατικά των λειτουργιών της αερογραμμής.

2.2.4.1β. Περιβαλλοντικές δαπάνες

Οι αερολιμένες είναι ευαίσθητες περιοχές από την άποψη της μόλυνσης. Οι κάτοικοι των κοντινών γειτονιών υποφέρουν από το θόρυβο και τους ρύπους που παράγονται από τον αερολιμένα. Μεταξύ των ρύπων που εκπέμπονται με τα αεροσκάφη είναι:

-Οξείδια αζώτου (NO_x), τα οποία διαδραματίζουν έναν ρόλο στην όξινη βροχή και είναι πρόδρομοι του μοριακού θέματος (που μειώνει την ορατότητα) και του χαμηλού επιπέδου όζοντος (ιδιαίτερα αντιδραστικό αέριο που είναι ένα συστατικό της αιθαλομίχλης και επηρεάζει την ανθρώπινη πνευμονική και αναπνευστική υγεία).

-Άκαυτοι υδρογονάνθρακες (HC), μονοξείδιο άνθρακα (CO) και Μοριακό θέμα (PM), ειδικά σε χαμηλής δύναμης μηχανές όπως σε taxi-out μέθοδο.

-Οξείδια θείου (SO_x), τα οποία διαδραματίζουν έναν ρόλο στην όξινη βροχή.

Σημειώστε ότι η μηχανή αεροσκαφών συμβάλλει χαρακτηριστικά το 45% από τις εκπομπές ρύπων καύσης σε έναν αερολιμένα, ενώ τα οχήματα επίγειας πρόσβασης συμβάλλουν άλλα 45% και ο Εξοπλισμός Επίγειας Υποστήριξης (GSE) και η Εφεδρική Μονάδων Ενέργειας (APU) συμβάλλει μόνο 10%, Ως εκ τούτου, υπάρχει ένα ισχυρό κίνητρο για να μειωθούν από τα αεροσκάφη οι εκπομπές μηχανών στον αερολιμένα. Μια μελέτη για το Τμήμα Οικολογίας της Ουάσιγκτον υπολογίζει ότι ο διάδρομος αναχώρησης με αναμονή στη σειρά είναι αρμόδιος για ένα σημαντικό μέρος των μολυσματικών εκπομπών αεροσκαφών στον αερολιμένα Seattle-Tacoma, και εκείνος ειδικότερα υπολογίζεται ότι αποτελεί περίπου 20% των εκπομπών σε NO_x , 50% των εκπομπών σε SO_x και το 40% των εκπομπών σε PM.

2.2.4.2. Κατευθυντήριες αρχές για την έννοια του ελέγχου

Πολλά σχέδια ελέγχου των διαδικασιών επιφάνειας αερολιμένων έχουν οραματιστεί, αλλά λίγοι έχουν υπογραμμίσει τις θεμελιώδεις εκτιμήσεις του ανθρώπινου παράγοντα (ιδιαίτερα, σημαντικά μαθήματα προήλθαν από το πρόγραμμα του Ακολουθιακού Μηχανικού και Αναπτυξιακού Μοντέλου (DSEDM)). Διαδικασίες αερολιμένων σχεδόν εξ ολοκλήρου επιτηρούνται και ελέγχονται από ανθρώπινους χειριστές. Περιορισμοί αύξησης εργασίας και φόρτου εργασίας πρέπει να εξεταστούν όποτε η δυνατότητα πραγματοποίησης ενός νέου σχεδίου ελέγχου αερολιμένων αξιολογείται. Οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή στις διαδικασίες ελέγχου αερολιμένων είναι δύσκολη να μελετηθεί επιτόπου. Πράγματι οι ελεγκτές είναι απίθανο να δεχτούν οποιεσδήποτε νέες διαδικασίες

πριν αισθανθούν ότι έχει αποδειχθεί ότι όχι μόνο λειτουργούν καλύτερα από τους τρέχοντες σε όλες τις περιστάσεις, αλλά επίσης διατηρούν ή βελτιώνουν την ασφάλεια χωρίς να παράγουν υπερβολικό φόρτο εργασίας ή ριζοσπαστικές αλλαγές στον ρόλο και την κατάρτιση του ελεγκτή.

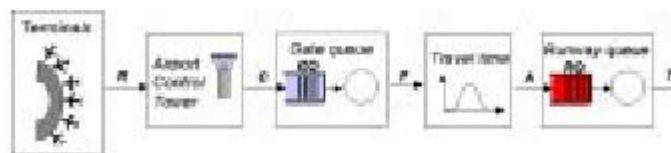
Παραδείγματος χάριν, σχέδια ελέγχου που κεντροθετούνται σε ακολουθία πρέπει να λάβουν υπόψη το γεγονός ότι η αλληλουχία αεροσκαφών μπορεί να απαιτήσει περισσότερη επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο της θέσης των αεροσκαφών στο σύστημα τροχοδρόμων από ότι απαιτείται την τρέχουσα περίοδο, και μεγαλύτερη μεσολάβηση των ελεγκτών για να εξασφαλίσουν ότι η απαιτούμενη ακολουθία είναι στο κατώτατο όριο διαδρόμων (πράγματι καθιερώνοντας την ακολουθία μέσω των εκκαθαρίσεων pushback μόνο δεν είναι αρκετό λόγω των μεγάλων αβεβαιοτήτων στο pushback και στους χρόνους taxi). Αυτές οι πρόσθετες παρατηρήσεις και οι επεμβάσεις συνεπάγονται τον πρόσθετο φόρτο εργασίας για όλους τους ελεγκτές αερολιμένων.

Κατά συνέπεια φαίνεται ότι τα μόνα σχέδια ελέγχου που μπορούν να φέρουν άμεσα οφέλη είναι αυτά που δεν απαιτούν την αλλαγή στον έλεγχο αερολιμένων εκτενώς αλλά μάλλον βοηθώντας τους ελεγκτές να παίρνουν καλύτερες αποφάσεις στη διαδικασία της τρέχουσας εργασίας τους.

2.2.4.3. Ποσοτική αξιολόγηση των σχεδίων ελέγχου των διεργασιών αναχώρησης

Μια πλήρης αξιολόγηση έννοιας ελέγχου ‘κράτησης πυλών’ πρέπει να εξετάσει πώς θα αλληλεπιδρούσε με τις τρέχουσες ενέργειες των Πύργων Ελέγχου Αερολιμένων. Εντούτοις μια συντηρητική αξιολόγηση απόδοσης ενός τέτοιου σχεδίου ελέγχου μπορεί να ληφθεί εάν υλοποιηθεί όπως μια απλή σειρά αναμονής πυλών αμέσως προς την κατεύθυνση του ρεύματος από τους Πύργους Ελέγχου Αερολιμένων (δηλ. υποτίθεται ότι οι ενέργειες των Πύργων Ελέγχου Αερολιμένων παραμένουν οι ίδιες). Το σχήμα 2.7 παρουσιάζει το προκύπτον μοντέλο.

Σημειώστε ότι αφού υποτίθεται ότι οι ενέργειες των Πύργων Ελέγχου Αερολιμένα είναι ανεπηρέαστες από την υλοποίηση της σειράς αναμονής πυλών προς την κατεύθυνση του ρεύματος, το $C(t)$ είναι ακόμα απλά ο αριθμός των πραγματικών pushbacks που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της περιόδου t στα στοιχεία ASQP.



Σχήμα 2.7 Δομή του μοντέλου διαδικασίας αναχώρησης για την αξιολόγηση σχεδίου ελέγχου

Ορισμοί:

$GQ(t)$ = ο αριθμός αεροσκαφών που έχουν προωθηθεί από τον Πύργο Ελέγχου Αερολιμένα κατά ή πριν την περίοδο t αλλά κρατιέται ακόμα στην πύλη στο τέλος της περιόδου t .

Έτσι ακολουθώντας τις εξισώσεις (1) μέσω της (3) με τις παραμέτρους που καθορίζονται σε προηγούμενη παράγραφο, το μοντέλο αξιολόγησης ακολουθεί την εξίσωση ισορροπίας σειρών αναμονής πυλών:

$$GQ(t) = GQ(t-1) + C(t) - P(t) \quad (7)$$

Ο αριθμός $P(t)$ αεροσκαφών που απελευθερώνονται από τη σειρά αναμονής πυλών και κάνουν pushback κατά τη διάρκεια της περιόδου t ελέγχεται από συγκεκριμένο αλγόριθμο κράτησης πυλών που μπορεί να αξιολογηθεί.

2.2.4.3.1. Πληροφορίες απαίτησης αναχώρησης

Στις τρέχουσες διαδικασίες, η μόνη μελλοντική πληροφόρηση απαίτησης αναχώρησης που είναι διαθέσιμη στο FAA Πύργου Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας (ATCT) είναι το Σύστημα Διαχείρισης Πληροφορίας Πτήσης (FIMS) που διατηρείται από τις αερογραμμές για να ενημερώσει τους επιβάτες τους για τους χρόνους της προγραμματισμένης αναχώρησης. Η FIMS δεν είναι πάντα ακριβής δεδομένου ότι δεν μεταδίδει αμέσως μερικές πηγές πιθανής καθυστέρησης αναχώρησης:

- πρόσφατα εισερχόμενοι πόροι (αεροσκάφη, πλήρωμα, συνοδοί πτήσεων)
- η αναχώρηση κρατιέται για να επιτρέψει τις συνδέσεις επιβατών
- καθυστερήσεις στην προετοιμασία των αεροσκαφών για την αναχώρηση (επιβίβαση επιβατών, φορτίο αποσκευών και φόρτωμα φορτίου, τροφοδότηση, κ.λ.π.)
- μηχανικά προβλήματα αεροσκαφών αυτήν την περίοδο υπό έρευνα ('πτήσεις σε απόφαση')

Είναι εντούτοις μια καλή ένδειξη της μελλοντικής απαίτησης σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα.

Μπορεί να προβλεφθεί ότι περισσότερη πληροφόρηση απαίτησης αναχώρησης θα διατεθεί στο μέλλον. Πράγματι, από την αρχή των ημερών του FAA – πρόγραμμα Ανταλλαγής Στοιχείων Αερογραμμών (FADE), σημαντική πρόοδος έχει γίνει στον καθορισμό και την υλοποίηση των Συνεργάσιμων Διαδικασιών Λήψης Αποφάσεων (CDM), που επιτρέπουν στις αερογραμμές και το FAA για να ανταλλάξουν πιο εξακριβωμένες πληροφορίες για τη μελλοντική απαίτηση αναχώρησης στα πλαίσια των Προγραμμάτων Επίγεια Καθυστέρησης (GDP). Η απαίτηση αναχώρησης θα μπορούσε έπειτα να προβλεφθεί ακριβέστερα σε πιο μακροχρόνια χρονικά διαστήματα.

2.2.4.3.2. Πληροφορίες ικανότητας διαδρόμων

Η ικανότητα αναχώρησης ενός συστήματος διαδρόμων μπορεί να επηρεάζεται άμεσα από πολλούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν:

- καιρικές συνθήκες
- περιορισμούς εναέριου χώρου αναχώρησης
- αφίξεις

Οι καιρικές συνθήκες μπορούν συνήθως να προβλεφθούν με ικανοποιητική ακρίβεια 30 λεπτά στο μέλλον (εκτός από συνθήκες μετατόπισης ομίχλης). Οι περιορισμοί εναέριου χώρου επίσης ποικίλουν αλλά είναι αρκετά προβλέψιμοι.

Σε τρέχουσες διαδικασίες, οι μελλοντικές αφίξεις στον αερολιμένα δεν είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια, λόγω αβεβαιότητες στο συγχρονισμό του προφίλ καθόδου αεροσκαφών και των πορειών προσέγγισης. Εντούτοις, το νέο Κέντρο-TRACON Σύστημα Αυτοματισμού(CTAS) παρουσιάστηκε για να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια του χρονικών προβλέψεων αφίξεων. Εμφανίζεται πιθανό να προβλέπονται οι μελλοντικές αφίξεις μέχρι 15 λεπτά εκ των προτέρων με μια ακρίβεια 30 δευτερολέπτων.

2.2.5.Συμπεράσματα

Σε αυτό την αναφορά, έχουμε εξετάσει το πρόβλημα μοντελοποίησης της διαδικασίας αναχώρησης σε έναν πολυάσχολο αερολιμένα με σκοπό ελάφρυνση της συμφόρησης επιφάνειας. Η πειραματική έρευνα μας έχει επιτρέψει να προάγουμε ένα απλό, όμως εκτενώς επικυρωμένος δυναμικό μοντέλο αναμονής της διαδικασίας αναχώρησης. Προκαταρκτικές έρευνες δείχνουν ότι ενεργές στρατηγικές ελέγχου σε αυτό το μοντέλο μπορεί να μειώσουν τη συμφόρηση στην επιφάνεια αερολιμένων που χρησιμοποιεί την κράτηση πυλών αεροσκαφών. Αυτές οι στρατηγικές επιτρέπουν μείωση των άμεσων λειτουργικών δαπανών και των περιβαλλοντικών δαπανών χωρίς να αυξάνεται η συνολική καθυστέρηση σημαντικά. Η υλοποίηση τους θα ήταν συμβατή με τις τρέχουσες διαδικασίες αερολιμένων και την ανθρώπινη δομή ελέγχου. Η περαιτέρω έρευνα θα συνδυάσει τον έλεγχο αναχώρησης αεροσκαφών με τον έλεγχο αφίξεων, με την πρόθεση να βελτιώσει τη γενική αποδοτικότητα του αερολιμένα. Περαιτέρω αποδοτικότητα θα επιτευχθεί επίσης με την μείωση των αβεβαιοτήτων του μοντέλου και με την έρευνα περισσότερων εξελιγμένων νόμων ελέγχου.

2.3.Μοντέλο B

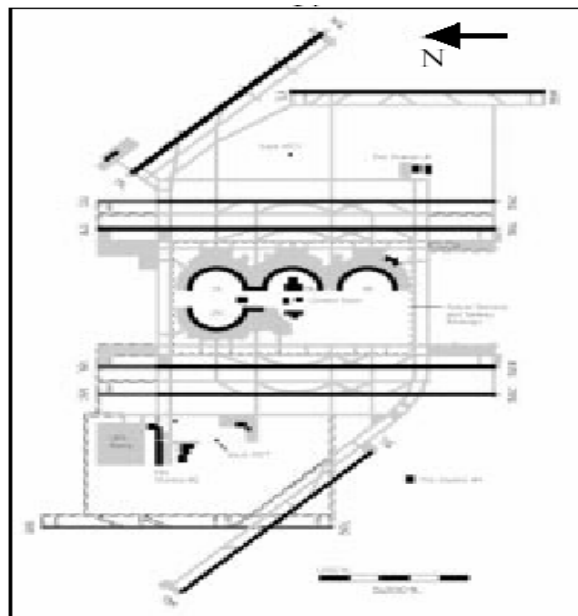
Εδώ, προτείνονται τρία μοντέλα για να συλλάβουν τις δυναμικές των διαδικασιών πολυάσχολης πλήμνης αερολιμένα. Δύο απλά μοντέλα αναμονής εισάγονται για να συλληφθούν οι taxi-out και taxi-in διαδικασίες. Ένα μοντέλο προγραμματισμού αέριων αριθμών που στοχεύει στην αντιπροσώπευση της αερογραμμής λήψης αποφάσεων προσπαθεί να συλλάβει τις δυναμικές μιας διαδικασίας αλλαγής πορείας αεροσκαφών. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν για προληπτικούς σκοπούς.

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν στρατηγικές ελέγχου για τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητα των αερολιμένων.

Αυτή η αναφορά δομείται ως εξής: Επεκτείνει αρχικά την παρατηρητική βάση του εδάφους άφιξης και αναχώρησης διαδικασίες από ένα μετρίου-μεγέθους, αερολιμένα μη-πλημνών (non-hub) όπως το Boston Logan International Airport σε μεγάλων πλημνών αερολιμένες όπως το Dallas/Fort Worth International Airport (DFW), George Bush Intercontinental Airport in Houston, Texas (IAH), και το Atlanta Hartsfield International Airport (ATL). Κατόπιν παρουσιάζει τρία μοντέλα με σκοπό να συλλάβουν τις δυναμικές των επίγειων διαδικασιών στους πολυάσχολους αερολιμένες πλημνών, συμπεριλαμβανομένου ενός μοντέλου άφιξης (taxi-in), ενός μοντέλου εδάφους (aircraft-turn), και ενός μοντέλου αναχώρησης (taxi-out). Τέλος, παρουσιάζει πιθανές εφαρμογές για τα τρία μοντέλα που είναι αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη, συμπεριλαμβανομένης (I) μιας ικανότητας πρόβλεψης για σκοπούς ελέγχου συστημάτων εναέριων μεταφορών, (II) μιας έννοιας για τις πολιτικές που στοχεύουν να αξιολογήσουν τη διαχείριση της συμφόρησης αερολιμένων μέσω της διαχείρισης καθυστέρησης σειρών αναμονής, και (III) μιας έννοιας που αξιολογεί τις πιθανές οικονομικές επιδράσεις της επέμβασης των αερογραμμών στην χρονοπρογραμματισμένη διεργασία άφιξης αεροσκαφών.

2.3.1. Διαθέσιμα στοιχεία

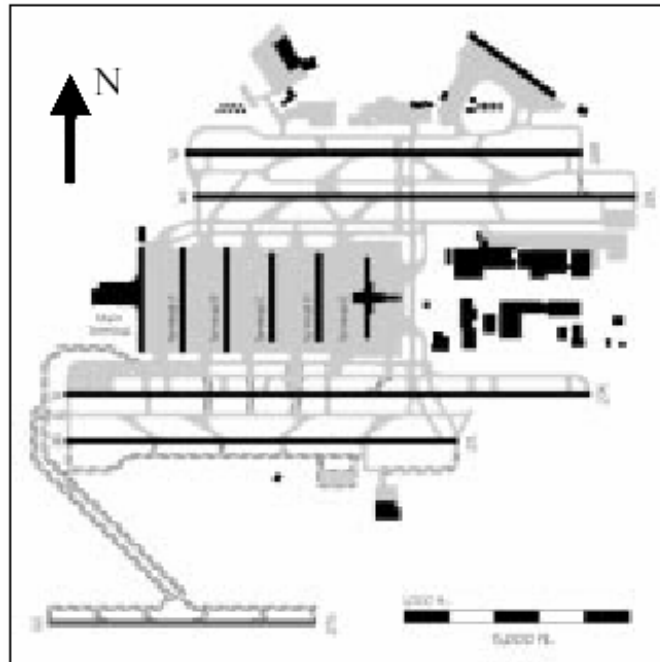
2.3.1.1. Σχεδιαγράμματα αερολιμένων



Σχήμα 2.8 Χάρτης DFW

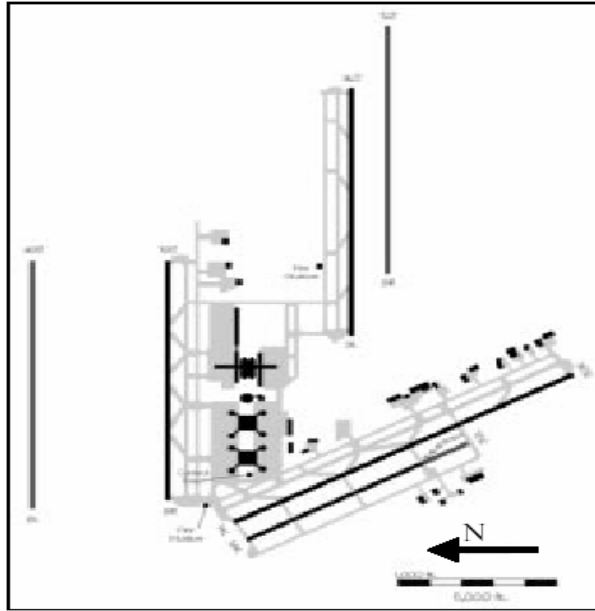
Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, το DFW είναι προσανατολισμένο σε μία βορρά-νότου διαμόρφωση με τις πλευρές ανατολής και δύσης που τρέχουν σχεδόν ανεξάρτητες διαδικασίες. Στη δύση είναι δύο παράλληλοι διάδρομοι και ένας διαγώνιος διάδρομος, και από την ανατολική πλευρά είναι τρεις παράλληλοι διάδρομοι και ένας διαγώνιος διάδρομος. Οι παράλληλοι διάδρομοι χωρίζονται κατά διαστήματα έτσι ώστε

ταυτόχρονες διαδικασίες να μπορούν να εμφανιστούν. Μια "νότια διαμόρφωση" περιλαμβάνει χρήση οποιωνδήποτε διαδρόμων στο σύνολο των 18R/L, των 13R/L, και των 17R/C/L διαδρόμων. Μια "βόρεια διαμόρφωση" περιλαμβάνει τη χρήση οποιουδήποτε διαδρόμων στο σύνολο διαδρόμων 31R/L, 36R/L, και 35R/L. Οποιαδήποτε στιγμή, διάφοροι διάδρομοι είναι ταυτόχρονα διαθέσιμοι για τις διαδικασίες αναχώρησης και άφιξης.



Σχήμα 2.9 Χάρτης ATL

Το ATL είχε τέσσερις διαδρόμους κατά την διάρκεια της συλλογής δεδομένων, προσανατολισμένους σε μια διαμόρφωση ανατολής-δύσης, όπως φαίνεται Σχήμα 2.9. Οι τέσσερις διάδρομοι αποτελούνται από δύο σύνολα παράλληλων διαδρόμων: δύο στο βορρά και δύο στο νότο. Οι διάδρομοι χωρίζονται κατά διαστήματα έτσι ώστε ταυτόχρονες διαδικασίες να μπορούν να εμφανίζονται. Μια "ανατολική διαμόρφωση" περιλαμβάνει τη χρήση οποιουδήποτε διαδρόμων στο σύνολο 8R/L και 9R/L διαδρόμων. Μια "δυτική διαμόρφωση" περιλαμβάνει τη χρήση οποιωνδήποτε διαδρόμων στο σύνολο 26R/L και 27R/L διαδρόμων. Οποιαδήποτε στιγμή, διάφοροι διάδρομοι είναι ταυτόχρονα διαθέσιμοι για διαδικασίες αναχώρησης και άφιξης.



Σχήμα 2.10 Χάρτης IAH

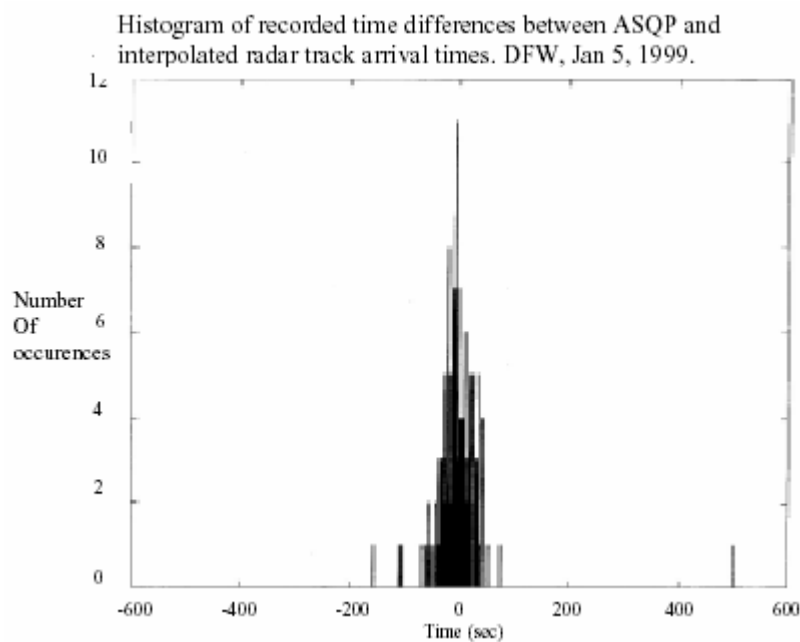
Το IAH έχει έξι διαδρόμους, προσανατολισμένους σε μια διαμόρφωση ανατολής-δύσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Οι έξι διάδρομοι είναι χωρισμένοι σε τρία ζευγάρια των παράλληλων διαδρόμων: δύο στο βορρά, δύο στο νότο και δύο διαγώνιοι διάδρομοι. Οι παράλληλοι διάδρομοι χωρίζονται κατά διαστήματα έτσι ώστε ταυτόχρονες διαδικασίες να μπορούν να εμφανιστούν. Μια "ανατολική διαμόρφωση" περιλαμβάνει χρήση οποιωνδήποτε διαδρόμων στο σύνολο 8R/L, 9R/L και 14R/L διαδρόμων. Μια "δυτική διαμόρφωση" περιλαμβάνει τη χρήση οποιοιδήποτε διαδρόμων στο σύνολο διαδρόμων 26R/L, 27R/L και 32R/L. Οποτεδήποτε, διάφοροι διάδρομοι είναι ταυτόχρονα διαθέσιμοι για διαδικασίες αναχώρησης και άφιξης.

2.3.1.2.Στοιχεία διαδικασιών πτήσης

Οι αναλύσεις που συζητούνται εδώ στηρίζονται στην βάση δεδομένων της Υπηρεσίας Αερογραμμών Ποιοτικής Απόδοσης (ASQP), η οποία παρέχει πληροφορίες για τις αεριοθούμενες διαδικασίες των πιο σημαντικών αερογραμμών. Για τις περισσότερες από τις πτήσεις αυτών των αερογραμμών, η ASQP παρέχει προγραμματισμένο και πραγματικό pushback, απογείωση, προσγείωση και πύλη ελέγχου για τους χρόνους άφιξης. Σημειώστε ότι επειδή η βάση δεδομένων ASQP περιλαμβάνει τις αεριοθούμενες διαδικασίες μόνο, δεν παρέχει μία πλήρη εικόνα της δραστηριότητας σε κάθε αερολιμένα. Παραδείγματος χάριν, συλλαμβάνει περίπου 66% των διαδικασιών στο Dallas/Fort Worth, με παρόμοια ποσοστά στους άλλους αερολιμένες εξεταζόμενους σε αυτό το έγγραφο.

Η ακρίβεια των στοιχείων ASQP έχει επιβεβαιωθεί μέσω ανεξάρτητων παρατηρήσεων. Οπτικές παρατηρήσεις στο Boston-Logan Airport επιβεβαιώνουν τους καταγεγραμμένοι push-back χρόνους της ASQP. Μια επίσημη επικύρωση των χρόνων απογείωσης και προσγείωσης καταγεγραμμένων στα στοιχεία ASQP έγινε με την επαλήθευση αυτών έναντι στις υψηλής ευκρίνειας, χρονομετρημένες διαθέσιμων διαδρομών ραντάρ στο DFW. Μια θέση κατώτατων ορίων επιλέχτηκε στην πορεία αναχώρησης ή στην τελική πορεία

προσέγγισης κατά προσέγγιση 5 ναυτικά μίλια από το κατώτατο όριο διαδρόμων, και η χρονική διαφορά μεταξύ του καταγραφωμένου wheels-off χρόνου (διαθέσιμο από την ASQP) και ο χρόνος του περάσματος κατώτατων ορίων (που λαμβάνεται από τη παρεμβολή της διαδρομής του ραντάρ) υπολογίστηκε για όλα τα αεριοθούμενα αεροσκάφη που χρησιμοποίησαν εκείνο τον ιδιαίτερο διάδρομο. Όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα 2.11, τα αρχεία ASQP ταιριάζουν πολύ με τους υπολογισμένους χρόνους απογείωσης και προσγείωσης που παρήχθησαν από υψηλής ευκρίνειας, χρονομετρημένες διαδρομές ραντάρ που παρέχονται από το CTAS στο DFW. Τα ASQP στοιχεία είναι ακριβή εντός ενός-λεπτού κύκλο λάθους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατ' εκτίμηση χρόνοι προσγείωσης και απογείωσης από τις διαδρομές ραντάρ δεν στηρίζονται επάνω σε εκτιμήσεις ή στοιχεία ETMS.



Σχήμα 2.11Η διαδρομή ASQP και ραντάρ συμφωνεί

2.3.1.3. Διαμορφώσεις καιρού και αερολιμένων

Με βάση τις παρατηρήσεις τομέων και την ανάλυση στοιχείων στο Boston Logan Airport, η διαμόρφωση διαδρόμων αερολιμένων είναι καθοριστικός παράγοντας των δυναμικών των επίγειων διαδικασιών. Ειδικότερα, η διαμόρφωση διαδρόμων είναι ένας σημαντικός παράγοντας για να καθορίσει τα ποσοστά αποδοχής άφιξης και αναχώρησης στον αερολιμένα. Δυστυχώς, τα ιστορικά στοιχεία διαμόρφωσης διαδρόμων δεν είναι εύκολα διαθέσιμα για τους αερολιμένες πλημνών που μελετώνται. Εντούτοις, τα λεπτομερή ιστορικά στοιχεία για τον αέρα και τον καιρό είναι διαθέσιμα από τη βάση δεδομένων του Consolidated Operations and Delay Analysis System (CODAS), η οποία παρέχει για τον αερολιμένα συγκεκριμένες καιρικές πληροφορίες κατά τη διάρκεια των 15-λεπτών διαστημάτων. Τα καιρικά στοιχεία CODAS περιλαμβάνουν την ταχύτητα του αέρα, την κατεύθυνση του αέρα, τη ριπή αέρα, τη θερμοκρασία, την επιτάχυνση, το ύψος νέφωσης και τη ορατότητα. Το σύνολο στοιχείων είναι εντυπωσιακά πλήρες. Παραδείγματος χάριν, στο DFW το 1997, μόνο οκτώ 15-λεπτά διαστήματα λείπουν από

τα αρχεία, και μόνο το 7% από τα στοιχεία θερμοκρασίας λείπουν, ενώ όλα τα άλλα στοιχεία στους τομείς είναι πλήρεις.

Ενώ οι καιρικές συνθήκες μόνο δεν καθορίζουν πλήρως τη διαμόρφωση διαδρόμων (π.χ., στην περίπτωση του Boston Logan Airport, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας), τα στοιχεία CODAS μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν σε σύνδεση με τις πληροφορίες σχεδιαγράμματος αερολιμένων για να χωρίσουν τα διαθέσιμα στοιχεία διαδικασιών σε ευδιάκριτα *τμήματα*. Έτσι, εξετάσαμε τα στοιχεία CODAS από το 1997 για το DFW και από το 1998 για το IAH και το ATL. Μια περίληψη της μεθοδολογίας κατάτμησης και αποτελέσματα αυτής της κατάτμησης παρέχονται εδώ για τους τρεις αερολιμένες που μελετώνται. Η ίδια μεθοδολογία κατάτμησης χρησιμοποιήθηκε για κάθε αερολιμένα, με αλλαγές για να προσαρμόσει τα διαφορετικά σχεδιαγράμματα διαδρόμων.

Με τη βοήθεια ενός πεπειραμένου αεριωθούμενου χειριστή που ανήκει σε μία σημαντική αμερικανική αερογραμμή, ένα σύνολο μοντέλων αναπτύχθηκε για τη λειτουργικότητα των διαδρόμων και την ικανότητα των αερολιμένων κάτω από διάφορες καιρικές συνθήκες. Ένας διάδρομος θεωρήθηκε λειτουργικός εάν το crosswind ήταν λιγότερο από 20 κόμβους και το headwind ήταν θετικό. Διαφορετικά, ο διάδρομος θεωρήθηκε μη επιδεχόμενος λειτουργικής παρέμβασης. Εάν τα στοιχεία του αέρα πέρα από ένα διάστημα ήταν ελλιπή, μία συντηρητική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει τη διαμόρφωση του διαδρόμου: εάν σε κάθε τέλος του διαστήματος ένας διάδρομος θεωρούνταν ως μη επιδεχόμενος λειτουργική παρέμβαση, ο διάδρομος εξετάστηκε ως μη επιδεχόμενος λειτουργική παρέμβαση κατά τη διάρκεια ολόκληρου του διαστήματος. Περαιτέρω κατάτμηση διευθύνθηκε έπειτα για να συμπεριλάβει καιρικούς παράγοντες όπως το ύψος νέφωσης, την ορατότητα και την επιτάχυνση (συμπεριλαμβανομένης της θύελλας), τα οποία είναι γνωστά ότι επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα του αερολιμένα. Κάθε ένας από αυτούς τους καιρικούς παράγοντες όρισε ένα κατώτατο όριο το οποίο θεωρήθηκε για να έχει επιπτώσεις στις διαδικασίες αερολιμένων. Η επιτάχυνση θεωρήθηκε ότι έχει επιπτώσεις στις διαδικασίες όταν υπήρξε δραστηριότητα θύελλας ή όταν η επιτάχυνση ήταν υποδειγμένη. Το ύψος νέφωσης εξετάστηκε ότι έχει επιπτώσεις στις διαδικασίες όταν έπεσε κάτω από τα 1000 πόδια. Η ορατότητα θεωρήθηκε ότι έχει επιπτώσεις στις διαδικασίες όταν αυτή μειώνεται κάτω από τα 3 μίλια.

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία κατάτμησης ήταν να υπολογιστεί η διαμόρφωση διαδρόμων για κάθε 15-λεπτού διαστήματος χρησιμοποιώντας τα στοιχεία ανέμων του CODAS. Μετά από τον καθορισμό των διαμορφώσεων του διαδρόμου, ο αριθμός διαδικασιών που εμφανίζονται από κάθε μια από τις διαμορφώσεις καθορίστηκε. Το δεύτερο βήμα στη διαδικασία κατάτμησης ήταν να εξεταστούν πρόσθετοι καιρικοί παράγοντες όπως το ύψος νέφωσης, η ορατότητα, η θερμοκρασία, και η επιτάχυνση. Χρησιμοποιώντας τα κατώτατα όρια που περιγράφονται ανωτέρω, κάθε ένας από τους τέσσερις καιρικούς παράγοντες αξιολογήθηκε ως προς το εάν είχε επιπτώσεις στις διαδικασίες αερολιμένων για κάθε ένα 15-λεπτό διάστημα. Ο αριθμός εμφάνισης διαδικασιών κάτω από κάθε μια από τις καιρικές συνθήκες καθορίστηκε.

2.3.2.Μοντέλα

2.3.2.1.Διαδικασία αναχώρησης (Pushback στην πύλη για απογείωση)

2.3.2.1.1.Παρατηρούμενες συμπεριφορές της διαδικασίας αναχώρησης

Με βάση τις εκτενείς παρατηρήσεις τομέων στο Boston Logan Airport, και την ανάλυση των ιστορικών στοιχείων από τα BOS, ATL, και DFW, υπάρχουν διάφορες σημαντικές συμπεριφορές στη διαδικασία αναχώρησης που το μοντέλο πρέπει να συλλάβει. Ο χρόνος taxi-out ενός συγκεκριμένου αεροσκάφους (από το pushback στην απογείωση) είναι πρώτιστα καθορισμένος από τη συμφόρηση αναχώρησης pushback, δηλ. ο αριθμός αεροσκαφών αναχώρησης που είναι ήδη στην επιφάνεια του αερολιμένα αλλά δεν έχουν απογειωθεί ακόμα. Όταν η συμφόρηση αναχώρησης είναι χαμηλή, μία ονομαστική (ή ανεμπόδιστη) κατανομή taxi-out χρόνων μπορεί να παρατηρηθεί για τα αεροσκάφη που κάνουν pushback από μια ιδιαίτερη πύλη. Τα αεροσκάφη συχνά παρατηρούνται για να φθάσουν στους ενεργούς διαδρόμους σε διαφορετική διάταξη από την pushback ακολουθία τους, που δείχνει ότι η κυκλοφοριακή ροή αναχώρησης μέχρι το διάδρομο είναι σχετικά αβίαστη.

Αντίθετα, μόλις φθάσει ένα αεροσκάφος στο διάδρομο, αυτό συνήθως εισάγεται σε μια σειρά αναμονής διαδρόμων, και η θέση του στη σειρά αναμονής γίνεται σταθερή. Η απόδοση των αερολιμένων είναι πρώτιστα περιορισμένη από αυτήν την επίδραση δυσχερειών στους διαδρόμους. Η διαμόρφωση των διαδρόμων και ο καιρός παρατηρούνται για να είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη συμπεριφορά της σειράς αναμονής διαδρόμων, συμπεριλαμβανομένης της μέγιστης απόδοσης διαδρόμων, και της προσέγγισης στον κορεσμό απόδοσης ως λειτουργία της αύξησης συμφόρησης αναχώρησης.

2.3.2.1.2.Προτεινόμενη δομή μοντέλου

Με βάση αυτές τις συμπεριφορές, οι απλές δομές αναμονής είναι προτεινόμενες για να αντιπροσωπεύσουν τις δυναμικές των input-output συστημάτων. Τα αεροσκάφη εισάγονται στο σύστημα αφότου έχουν κάνει αίτηση για pushback και έχει δοθεί άδεια για pushback από τον πύργο. Αφήνουν το σύστημα κατά τη στιγμή που απογειώθηκαν.

Η αρχική χωρίς περιορισμούς φάση κυκλοφοριακής ροής αναχώρησης είναι διαμορφωμένη ως τυχαία καθυστέρηση, όπου κάθε αεροσκάφος που κάνει pushback ορίζεται ένας στοχαστικός taxi-out χρόνος να φθάσει στους ενεργούς διαδρόμους. Η πιθανότητα κατανομής αυτών των taxi-out χρόνων λαμβάνεται να είναι ο ονομαστικός (ανεμπόδιστος) taxi-out χρόνος που παρατηρείται σε χαμηλά επίπεδα συμφόρησης. Ιδανικά, για να μετρηθούν οι διαφορές στο χρόνο ταξιδιού λόγω των διαφορετικών θέσεων πυλών, σε κάθε πύλη θα οριζόταν μια μεμονωμένη πιθανότητα κατανομής. Δυστυχώς, τα ιστορικά στοιχεία για την ανάθεση πύλης δεν είναι εύκολα διαθέσιμα.

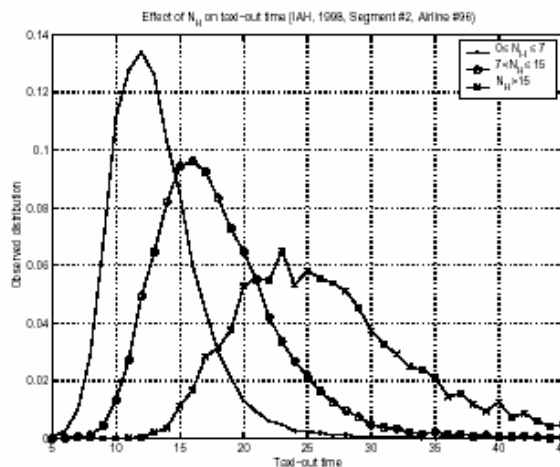
Όταν τα αεροσκάφη ολοκληρώνουν τον ονομαστικό taxi-out χρόνο τους, υποτίθεται ότι εισήχθησαν στη σειρά αναμονής διαδρόμων. Αυτή η σειρά αναμονής είναι πρώτος-εισερχόμενος πρώτος-εξυπηρετημένος, η οποία συλλαμβάνει τη συμφόρηση και τοποθετώντας διαδοχικά τα αποτελέσματα που παρατηρούνται κοντά στους ενεργούς

διαδρόμους. Κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος του χρόνου, ένας στοχαστικός αριθμός ευκαιριών απογείωσης είναι διαθέσιμος, και το αεροσκάφος στην κεφαλή της σειράς αναμονής διαδρόμων μπορεί να βγει από το σύστημα εάν ικανοποιητικές ευκαιρίες είναι διαθέσιμες. Αυτή η στοχαστική συμπεριφορά παρατηρείται υπό συνθήκες υψηλής συμφόρησης αναχώρησης, όταν το σύστημα των διαδρόμων είναι σχεδόν σίγουρα μη άδειο. Ένα παρόμοιο μοντέλο αναμονής για τη διαδικασία αναχώρησης αερολιμένων ήταν προτεινόμενο, και εκτενώς βαθμονομημένο και επικυρωμένο για το Boston Logan Airport που χρησιμοποιεί αρκετών ετών ιστορικό διαμόρφωσης διαδρόμων και στοιχεία κυκλοφορίας. Το τρέχον μοντέλο χρησιμοποιεί την ίδια δομή αναμονής αλλά προτείνει αρκετές αλλαγές στο μοντέλο αναμονής διαδρόμων, και στη βαθμονόμηση και στις τεχνικές επικύρωσης.

2.3.2.1.3. Μέθοδοι βαθμονόμησης

Με βάση τα αποτελέσματα, μια μέθοδος έχει αναπτυχθεί για να παρατηρήσει την ονομαστική (ανεμπόδιστη) κατανομή των taxi-out χρόνων. Σε κάθε πτήση υπό αναχώρηση ορίζεται ένας δείκτης (που ορίζεται " N_H ") που μετρά τον αριθμό άλλων αεροσκαφών που απογειώνονται ενώ εκείνη η πτήση εκτελεί taxi-out στην επιφάνεια αερολιμένων. Εάν μία ιδιαίτερη πτήση κρατιέται στην επιφάνεια αερολιμένων μετά από το pushback λόγω των περιορισμών ροής, μηχανικών προβλημάτων, γραφειοκρατικών καθυστερήσεων, ή άλλων αποτελεσμάτων που είναι ανεξάρτητα από την συμφόρηση επιφάνειας αναχώρησης, αυτό θα τείνει να περάσει στον τροχοδρόμο με άλλα αεροσκάφη υπό αναχώρηση, και ο δείκτης N_H θα είναι μεγάλος. Εάν μια ιδιαίτερη πτήση εκτελεί pushback και αντιμετωπίζει ουσιαστική καθυστέρηση αναμονής κοντά στο διάδρομο, έπειτα ο δείκτης N_H του καθενός θα είναι μεγάλος λόγω του μεγάλου αριθμού άλλων αεροσκαφών υπό αναχώρηση που απογειώνονται ενώ περιμένουν στη σειρά αναμονής. Επομένως, οι πτήσεις με έναν χαμηλό δείκτη N_H υποτίθεται ότι είχαν δοκιμάσει λίγη καθυστέρηση εκτελώντας taxi-out στο διάδρομο, και η ονομαστική (ανεμπόδιστη) κατανομή των taxi-out χρόνων είναι υπολογισμένη από τους taxi-out χρόνους τους. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο δείκτης N_H δεν μπορεί να υπολογιστεί στο χρόνο που ένα αεροσκάφος εκτελεί pushback από την πύλη, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα στον πραγματικό χρόνο για να προβλέψει τον taxi-out χρόνο.

Η επίδραση του N_H στην παρατηρούμενη κατανομή των taxi-out χρόνων παρουσιάζονται κατωτέρω στο σχήμα 2.12. Το διάγραμμα επιδεικνύει πώς η παρατηρούμενη κατανομή αυξάνει και σε σημασία και σε διαφορά όπως μια συνάρτηση των αυξανόμενων τιμών του δείκτη N_H . Παρόμοια αποτελέσματα βρίσκονται για τα ATL και DFW.



Σχήμα 2.12 Επίδραση του N_H στην κατανομή των taxi-out χρόνων στο IAH

Οι γκαουσιανές ή λογικές κανονικές κατανομές χρησιμοποιούνται για να προσεγγίσουν την συνεπαγόμενη κατανομή σε ανεμπόδιστους taxi-out χρόνους. Το στοχαστικό μοντέλο για τη συμπεριφορά της σειράς αναμονής διαδρόμων είναι βασισμένο στην παρατήρηση ότι, σε σταθερό επίπεδο συμφόρησης αναχώρησης, η κατανομή των απογειώσεων πέρα από κάθε ενός-λεπτού διάστημα εφαρμόζεται καλά ως κατανομή Poisson. Περαιτέρω, όσο το επίπεδο συμφόρησης αναχώρησης αυξάνεται, το ποσοστό των προσαρμοσμένων κατανομών Poisson αυξάνεται, μέχρι να επιτευχθεί το κατώτατο όριο όπου περαιτέρω αυξήσεις στα επίπεδα συμφόρησης αναχωρήσεων δεν οδηγούν σε αυξανόμενα ποσοστά. Με βάση αυτές οι παρατηρήσεις, η σειρά αναμονής διαδρόμων διαμορφώνονται ως η παροχή ενός στοχαστικού αριθμού ευκαιριών απογείωσης κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος του χρόνου, όπου η κατανομή του αριθμού ευκαιριών είναι Poisson με το μέγιστο παρατηρούμενο ποσοστό.

Ένας τύπος σχεδίου απόδοσης διαδρόμων αναπτύχθηκε να βοηθήσει στην βαθμονόμηση αυτού του μοντέλου. Σε κάθε επίπεδο συμφόρησης αναχώρησης, μια κατανομή Poisson προσαρμόζεται στην παρατηρούμενη κατανομή των απογειώσεων. Κατόπιν αυτά τα προσαρμοσμένα ποσοστά σχεδιάζονται ως μία συνάρτηση στο επίπεδο συμφόρησης αναχώρησης για να παραγάγουν ένα σχέδιο απόδοσης. Επιπλέον, ο αριθμός των διαστημάτων των χρόνων σε κάθε επίπεδο συμφόρησης αναχώρησης σχεδιάζεται για να εξασφαλίσει ότι ικανοποιητικά datapoints χρησιμοποιούνται στη διαδικασία προσαρμογής. Αρκετά από αυτά τα σχέδια παρουσιάζονται κατωτέρω για τους διάφορους αερολιμένες που μελετώνται.

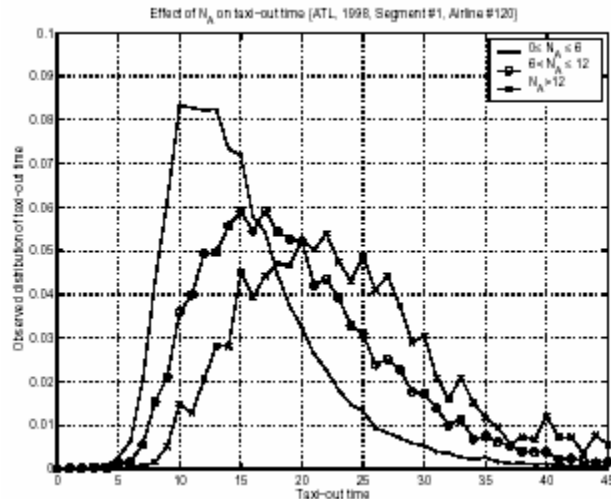
Το πρώτο ζευγάρι του σχεδίου έγινε χρησιμοποιώντας στοιχεία από το ATL κατά τη διάρκεια εκείνων των διαστημάτων το 1998 όταν ο αερολιμένας λειτουργούσε στο δευτεροβάθμιο προσανατολισμό διαδρόμων του. Η πρώτη σχεδίαση αντιστοιχεί στις καλές καιρικές συνθήκες, και η δεύτερη σχεδίαση αντιστοιχεί στις σφοδρές καιρικές συνθήκες. Σημειώστε ότι η κατανομή των απογειώσεων προσαρμόζεται πολύ καλά ως κατανομή Poisson πέρα από ένα ευρύ φάσμα των επιπέδων συμφόρησης αναχώρησης. Είναι προφανές ότι η απόδοση στις καλές καιρικές συνθήκες φτάνει σε ένα υψηλότερο

επίπεδο συμφόρησης από την απόδοση στις σφοδρές καιρικές συνθήκες. Ένα δεύτερο ζευγάρι του σχεδίου προέκυψε χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από το DFW κατά τη διάρκεια εκείνων των διαστημάτων το 1997 όταν ο αερολιμένας λειτουργούσε στο δευτεροβάθμιο προσανατολισμό διάδρομου. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα που φαίνονται στο ATL. Εντούτοις, σημειώστε ότι η απόδοση στο DFW κατά τη διάρκεια με καλές-καιρικές συνθήκες εμφανίζεται να αυξάνεται σταθερά όπως οι αυξήσεις συμφόρησης αναχώρησης. Δεν υπάρχει καμία παρατηρούμενη επίδραση κορεσμού. Αντίθετα, η απόδοση κατά τη διάρκεια με σφοδρές-καιρικές συνθήκες παρουσιάζουν σαφή επίδραση κορεσμού.

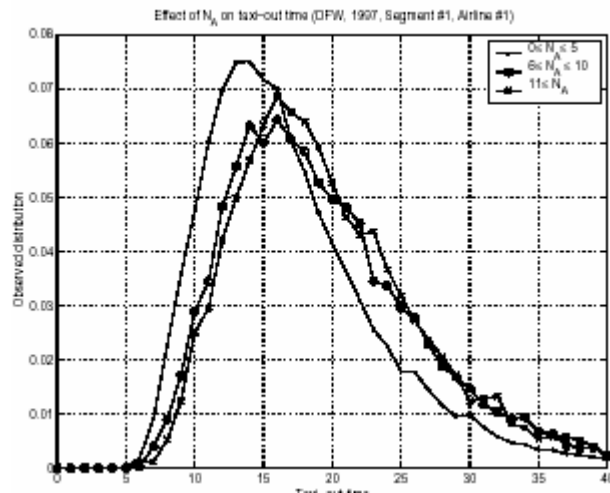
2.3.2.1.4.Εργασία υπό εξέλιξη

Μέχρι σήμερα, υπάρχουν διάφορες σημαντικές παρατηρήσεις που δεν έχουν ακόμα επιτυχώς ενσωματωθεί στο μοντέλο διαδικασίας αναχώρησης. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι σε μερικούς αερολιμένες, οι χρόνοι αναχώρησης taxi-out τείνουν να αυξηθούν όσο η συμφόρηση άφιξης αυξάνεται, όπου συμφόρηση άφιξης (δηλώνεται " N_A ") μετριέται ως ο αριθμός αεροσκαφών άφιξης που είναι να μετακινηθεί με taxi-in από τους διαδρόμους όταν ένα αεροσκάφος αναχώρησης εκτελεί push back από την πύλη.

Το σχήμα 2.13 δείχνει ότι αυξανόμενα επίπεδα συμφόρησης άφιξης συσχετίζονται σαφώς με τις αυξήσεις των taxi-out χρόνων στο ATL. Εντούτοις, το ίδιο φαινόμενο δεν είναι εύκολα προφανές στο DFW (σχήμα 2.14). Δεν είναι σαφές εάν αυτή η εξάρτηση είναι επίδραση μιας αιτιώδους σχέσης, ή εάν η συμφόρηση άφιξης και η συμφόρηση αναχώρησης έχει απλά κάποιο θετικό συσχετισμό λόγω του χρονοδιαγράμματος των αερογραμμών που συσσωρεύει και αυτών που μπλοκάρει από το χρονοδιάγραμμα σε ορισμένους αερολιμένες πλημνών. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η διακοπή λόγω καιρού και η διακοπή λόγω διαμόρφωσης δεν είναι ισοδύναμες. Οι παρατηρήσεις που ακολουθούν γίνονται μετά στο Boston Logan Airport, η ικανότητα αερολιμένων μπορεί να επηρεαστεί κάπως από τον καιρό μέσα σε μια ενιαία διαμόρφωση. Η επίδραση της υποστηριζόμενης κυκλοφορίας (που είναι ειδικότερα απύουσα από τη βάση δεδομένων ASQP) αντιμετωπίζεται αυτήν την περίοδο ως πρόσθετη πηγή από τον στοχαστικό θόρυβο στο σύστημα, αν και σε γενικές γραμμές το τρέχον μοντέλο αναμονής μπορεί να επεκταθεί κοινότοπα για να περιλάβει υποστηριζόμενη κυκλοφορία. Περιστασιακά η εμπειρία αεροσκαφών δίνει σημαντικά πιο μακροχρόνιους taxi-out χρόνους λόγω των περιορισμών ροής, και η εργασία είναι εν εξέλιξη για να προσαρμόσει αυτά τα εκτός ορίων σημεία.



Σχήμα 2.13 Η συμφόρηση άφιξης επηρεάζει τους taxi-out χρόνους στο ATL



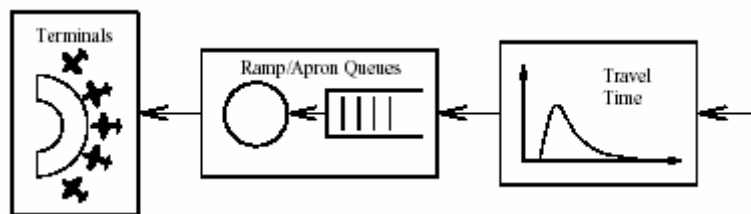
Σχήμα 2.14 Η συμφόρηση άφιξης έχει περιορίσει την επιρροή στους taxi-out χρόνους στο DFW

Τέλος, είναι διαισθητικά προφανές ότι σε ένα πολύ σύντομο χρονοδιάγραμμα πρέπει να υπάρξει κάποια ανταλλαγή μεταξύ των προσγειώσεων και απογειώσεων στον ίδιο διάδρομο. Αυτή η ανταλλαγή αυτήν την περίοδο αντιμετωπίζεται ως πρόσθετη πηγή στοχαστικού θορύβου στη συμπεριφορά διαδρόμων, αλλά η εργασία είναι αυτήν την περίοδο υπό εξέλιξη για να διαμορφώσει αυτήν την επίδραση στη συμπεριφορά της σειρά αναμονής του διαδρόμου.

2.3.2.2. Διαδικασία άφιξης (που προσγειώνεται στην πύλη αφίξεων)

Η ανάλυση στοιχείων στο BOS, DFW, και ATL δείχνουν ένα κάπως εκπληκτικό αποτέλεσμα: Η στατιστική συμπεριφορά της διαδικασίας αφίξεων μπορεί να γίνει αντιληπτή χρησιμοποιώντας τις ίδιες γενικές εισόδου - εξόδου δομές αναμονής και τεχνικές βαθμονόμησης - επικύρωσης που χρησιμοποιούνται αυτήν την περίοδο να

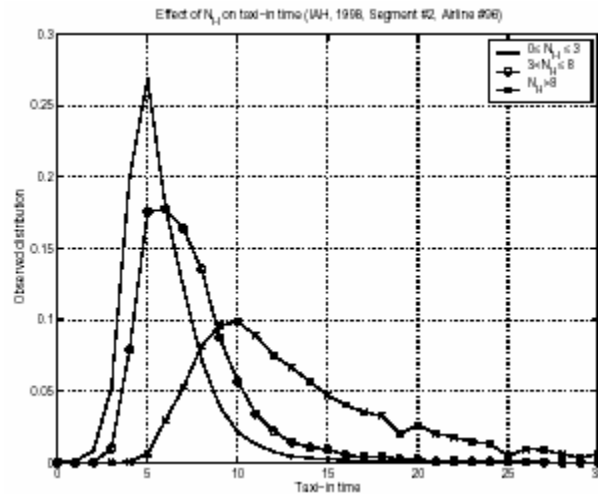
μοντελοποιήσουν στατιστικά την διαδικασία αναχώρησης. Ένα διάγραμμα του μοντέλου της προτεινόμενης άφιξης παρουσιάζεται κατωτέρω (σχήμα 2.15):



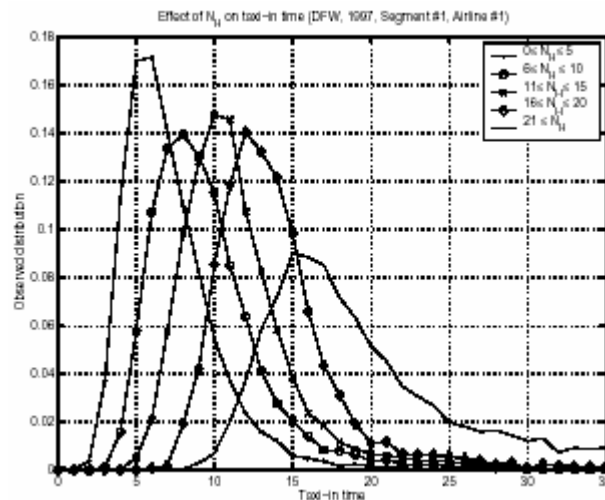
Σχήμα 2.15 Προτεινόμενο μοντέλο αναμονής για τη διαδικασία άφιξης

Πρώτα το αποτέλεσμα είναι κάπως άχαρο, από τη στιγμή που η δομή του μοντέλου αναχώρησης ήταν ρητά παρακινημένη από ένα συγκεκριμένο σύνολο παρατηρήσεων και ανάλυσης δεδομένων των αποτελεσμάτων, και δεν είναι προφανές ότι αυτές οι παρατηρήσεις και οι συμπεριφορές γενικεύουν αμέσως την διαδικασία άφιξης. Εντούτοις, είναι δυνατό να αντιμετωπισθεί το μοντέλο διαδικασίας αναχώρησης σε ένα γενικότερο πλαίσιο. Το μοντέλο διαδικασίας αναχώρησης προορίζεται να δείξει μία σχετικά αβίαστη περίοδο όταν τα αεροσκάφη μετακινούνται ανεμπόδιστα με taxi-out στις σειρές αναμονής διαδρόμων, που ακολουθούνται από μια περίοδο που εξουσιάζεται από τα αποτελέσματα δυσχερειών κοντά στις σειρές αναμονής διαδρόμων. Η διαδικασία άφιξης ακολουθεί κατά προσέγγιση το ίδιο σχέδιο, όπου τα αεροσκάφη μετακινούνται (taxi) αρχικά προς τις πύλες, και έπειτα επιβραδύνουν και μπαίνουν σε σειρά αναμονής κοντά στις πύλες. Αυτή η επίδραση είναι ειδικά προφανής στους αερολιμένες με τις φυσικές δυσχέρειες κοντά σε ορισμένα τερματικά, όπως τα τερματικά τύπου διαδρόμων στο ATL και το "πέταλο" στο Boston Logan Airport.

Οι ονομαστικές κατανομές των taxi-in χρόνων αποκτήθηκαν με τη χρησιμοποίηση της ίδιας μεθόδου που χρησιμοποιείται για να λάβει τις ονομαστικές κατανομές των taxi-out χρόνων. Για τη διαδικασία άφιξης, ο δείκτης N_H είναι ορισμένος ως ο αριθμός αεροσκαφών άφιξης που φθάνουν στις πύλες ενώ μια ιδιαίτερη πτήση μετακινείται με taxi-in από τους διαδρόμους. Υπάρχουν μερικές ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις που γίνονται εδώ. Αντιπροσωπευτικές κατανομές των taxi-in χρόνων στο IAH και στο DFW παρουσιάζονται στα σχήματα 2.16 και 2.17. Σημειώστε ότι όσο ο N_H αυξάνεται, οι κατανομές των taxi-in χρόνων δεν εμφανίζονται σημαντικά να αλλάζουν σχήμα ή πλάτος στο DFW, αλλά είναι απλά μετατοπισμένες δεξιά. Αυτή η επίδραση μπορεί να δείξει ότι το στοχαστικό συστατικό ενός taxi-in χρόνου αεροσκάφους είναι περίπου ανεξάρτητος από τη συμφόρηση άφιξης, και ως εκ τούτου ότι οι taxi-in χρόνοι μπορεί να έχουν ένα πολύ πιο υψηλό επίπεδο προβλεψιμότητας από τους taxi-out χρόνους. Περαιτέρω παρατηρήσεις τομέων είναι απαραίτητες για να επιβεβαιώσουν αυτήν την υπόθεση.



Σχήμα 2.16 Επίδραση του N_H στους taxi-in χρόνους στο IAH



Σχήμα 2.17 Επίδραση του N_H στους taxi-in χρόνους στο DFW

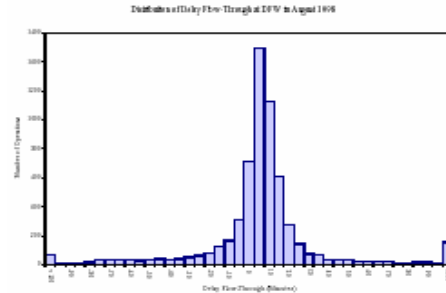
Οι καμπύλες απόδοσης πυλών παρουσιάζονται επίσης. Οι καμπύλες απόδοσης πυλών και για τους τρεις αερολιμένες είναι αρκετά παρόμοιες σε χαρακτήρα. Όπως αναμένεται, η απόδοση πυλών εμφανίζεται απρόσβλητη από τις σφοδρές καιρικές συνθήκες σε όλους τους αερολιμένες που μελετώνται. Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η απόδοση πυλών μπορεί να κορεστεί, παρόμοια με την επίδραση κορεσμού στη διαδικασία αναχώρησης. Αυτές οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι ο κορεσμός απόδοσης πυλών μπορεί να έχει επιδράσεις σε πολύ υψηλά φορτία κυκλοφορίας, παρά μια υποβάθμιση της απόδοσης συστημάτων.

2.3.2.3. Επίγειες διαδικασίες (άφιξη πυλών στην πύλη Pushback)

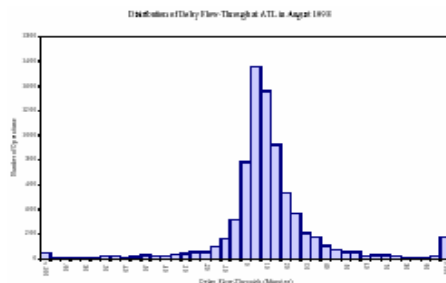
2.3.2.3.1. Παρατηρημένη συμπεριφορά των επίγειων διαδικασιών

Το μοντέλο επίγειων διαδικασιών είναι ένα μοντέλο βελτιστοποίησης σχεδιασμένο για να μιμηθεί τις λειτουργικές αποφάσεις αερογραμμών για τους pushback χρόνους των αεροσκαφών κάτω από τους περιορισμούς των πόρων. Το μοντέλο επίγειων διαδικασιών εξετάζει το πρόγραμμα αναχώρησης, την συμβατότητα αεροσκάφους και πυλών, την διαθεσιμότητα πυλών και την διαθεσιμότητα των πόρων πληρωμάτων εδάφους στον καθορισμό των pushback χρόνων που ελαχιστοποιούν τη δεδομένη καθυστέρηση άφιξης επιβατών στους χρόνους πυλών. Κατά συνέπεια, το μοντέλο μπορεί να μετρήσει πώς μια αερογραμμή μπορεί να μειώσει τις καθυστερήσεις και τη διάδοση καθυστέρησης στο έδαφος. Αυτό το τμήμα περιλαμβάνει μια περιγραφή του μοντέλου των επίγειων διαδικασιών και τα αποτελέσματα μέχρι σήμερα από το IAH, τον μόνο αερολιμένα για τον οποίο ήταν διαθέσιμα ικανοποιητικά στοιχεία επίγειων διαδικασιών.

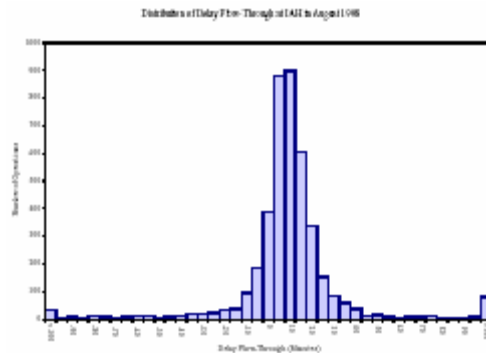
Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που συμβάλλουν στις καθυστερήσεις αναχώρησης. Αυτό περιλαμβάνει την καθυστέρηση άφιξης. Για να επεξηγήσουμε αυτό, η διαφορά μεταξύ της καθυστέρησης άφιξης και της καθυστέρησης αναχώρησης υπολογίστηκε. Αυτή η διαφορά θα αναφερθεί ως καθυστέρηση λόγω ροής. Η κατανομή της καθυστέρησης λόγω ροής για τα DFW, ATL και IAH παρουσιάζεται στα σχήματα 2.18-2.20. Παρατηρούμε ότι αυτές οι κατανομές εμφανίζονται γκαουσιανές, με τον μέσο μεγαλύτερο από το μηδέν. Στην πραγματικότητα, η μέση καθυστέρηση λόγω ροής για κάθε αερολιμένα είναι θετική και το 95% του διαστήματος εμπιστοσύνης της μέσης καθυστέρησης λόγω ροής είναι αυστηρά θετικό. Αυτή η θετική μέση καθυστέρηση λόγω ροής δείχνει ότι η καθυστέρηση άφιξης μειώθηκε κάπως ενώ το αεροσκάφος ήταν στο έδαφος.



Σχήμα 2.18 Κατανομή των flow-through στο DFW



Σχήμα 2.19 Κατανομή των flow-through στο ATL



Σχήμα 2.20 Κατανομή των flow-through στο IAH

Υπάρχουν δύο πιθανές εξηγήσεις για αυτήν την παρατήρηση. Κατ' αρχάς, η "χαλαρότητα" στην άφιξη και το πρόγραμμα αναχώρησης μπορούν να έχουν απορροφήσει την καθυστέρηση άφιξης. Παραδείγματος χάριν, υποθέστε ότι ένα αεροσκάφος προγραμματίζεται για να φθάσει στις 10:00 και να αναχωρήσει στις 10:40 και ότι ο προγραμματισμένος ελάχιστος χρόνος στροφής για τα αεροσκάφη είναι 30 λεπτά. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχουν δέκα λεπτά χαλαρότητας που φτιάχνονται στο πρόγραμμα. Επομένως, τα αεροσκάφη μπορούν να φθάσουν μέχρι δέκα λεπτά αργά χωρίς επιρροή του χρόνου αναχώρησης. Δεύτερον, η αερογραμμή μπορεί να είχε προετοιμάσει τα αεροσκάφη για αναχώρηση μπροστά από το πρόγραμμα. Συνεχίζοντας με το ίδιο παράδειγμα, εάν το αεροσκάφος έφθασε 20 λεπτά αργά, αλλά αναχώρησε εγκαίρως, η αερογραμμή γύρισε το αεροσκάφος σε 20 λεπτά, 10 λεπτά πρακτικά κάτω από το σχεδιασμένο ελάχιστο χρόνο στροφής. Σε αυτή την περίπτωση, η αερογραμμή μειώνει τον χρόνο στροφής των αεροσκαφών.

Για να καταλάβουμε το βαθμό στον οποίο η αερογραμμή είναι σε θέση να μειώσει το χρόνο στροφής των αεροσκαφών προκειμένου να μειωθούν οι καθυστερήσεις, προσδιορίζουμε τα αεροσκάφη με την καθυστέρηση αναχώρησης μεγαλύτερη από 10 λεπτά και με την καθυστέρηση άφιξης μεγαλύτερη από την καθυστέρηση αναχώρησης. Για αυτά τα αεροσκάφη, το ιστόγραμμα του πραγματικού χρόνου στροφής μείον τον ελάχιστο χρόνο προγραμματισμένης στροφής σχεδιάστηκε. Ο προγραμματισμένος ελάχιστος χρόνος στροφής είναι ο χρόνος στροφής υποτιθέμενος από την αερογραμμή στη διαδικασία προγραμματισμού. Η μέση τιμή της κατανομής της διαφοράς του χρόνου πραγματικής στροφής από τον ελάχιστο προγραμματισμένο χρόνο στροφής είναι αρνητική, δείχνοντας ότι οι αερογραμμές δίνουν προτεραιότητα στην αλλαγή θέσης(στροφή) των καθυστερημένων αφίξεων.

2.3.2.3. Μοντελοποίηση της δομής

Όπως συζητείται ανωτέρω, μια αερογραμμή μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση αναχώρησης με τη μείωση του χρόνου στροφής. Εντούτοις, τα αποτελέσματα δεν δείχνουν ακριβώς πώς μια αερογραμμή επιτυγχάνει τη χρονική μείωση στροφής. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη διαμόρφωση των επίγειων διαδικασιών είναι ο

καθορισμός ποιων πόρων και δραστηριοτήτων να περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Η διαδικασία στροφής περιλαμβάνει τα πολυάριθμα ευδιάκριτα σύνολα πληρωμάτων που διευθύνουν τις ευδιάκριτες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων της εκφόρτωσης και φόρτωσης των αποσκευών, της τροφοδότησης, του καθαρισμού, της συντήρησης, της αποβίβασης των επιβατών και επιβίβασης, και ούτω καθ' εξής. Κατά τη διάρκεια επισκέψεων στα κέντρα επίγειων διαδικασιών των αερογραμμών, το βασικό προσωπικό της αερογραμμής έδειξε ότι η διαχειριζόμενη διαδικασία αποσκευών θα μπορούσε να είναι μια δυσχέρεια στη διαδικασία στροφής. Επομένως, αποφασίσαμε να περιλάβουμε τους περιορισμούς χειριστών αποσκευών στο μοντέλο επίγειων διαδικασιών. Ο βαθμός στον οποίο αυτοί οι περιορισμοί εξηγούν τη μεταβλητότητα στην πραγματική διαδικασία στροφής συζητείται αργότερα.

Κατά τη διάρκεια των επισκέψεων που γίνονται στις επίγειες διαδικασίες αερογραμμών, οι αερογραμμές λαμβάνουν αποφάσεις της τελευταίας στιγμής για να κρατήσουν τα αεροσκάφη υπό αναχώρηση να εξυπηρετήσουν τους συνδεδεμένους επιβάτες από μια καθυστερημένης άφιξης πτήση. Προκειμένου να ενσωματωθεί αυτή η διαδικασία απόφασης στο μοντέλο, το μοντέλο επίγειων διαδικασιών εξετάζει ρητά τις ροές επιβατών. Εάν μια σύνδεση επιβατών λείπει, η συνολική καθυστέρηση σε εκείνο τον επιβάτη, η οποία είναι ο χρόνος μέχρι τον επόμενη αναχώρηση στον ίδιο προορισμό, συμπεριλαμβάνεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο των επίγειων διαδικασιών καθορίζει την ανταλλαγή της καθυστέρησης ενός αεροσκάφους για να επιτρέψει τις συνδέσεις επιβατών και τις αλλαγές δρομολογίων των επιβατών οι οποίοι χάσανε τις συνδεδεμένες πτήσεις.

Ακόμα και μετά από προσεκτικές αποφάσεις ποιους παράγοντες να εξετάσουν, μερικές απλοποιημένες υποθέσεις πρέπει να γίνουν προκειμένου διατηρήσουμε την ευκαμψία του προβλήματος. Κατ' αρχάς, οι χειριστές αποσκευών αναθέτονται στα αεροσκάφη ανεξάρτητα από τις προηγούμενες αναθέσεις αεροσκαφών. Αυτή η υπόθεση σημαίνει ότι ένας χειριστής αποσκευών μπορεί να ανατεθεί σε διαφορετικό αεροσκάφος σε κάθε χρονική μονάδα. Στους περισσότερους αερολιμένες πλημνών, εντούτοις, οι χειριστές αποσκευών αναθέτονται *σε ομάδες* σε ένα ιδιαίτερο αεροσκάφος για εκφόρτωση και φόρτωση. Επομένως, η προκύπτουσα ανάθεση από τους χειριστές αποσκευών δεν μπορεί να χαρτογραφηθεί σε μια εφικτή ανάθεση από *τις ομάδες* χειριστών αποσκευών.

Δεύτερον, το μοντέλο επίγειων διαδικασιών είναι ένα αιτιοκρατικό μοντέλο, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία στοχαστικότητα που ενσωματώνεται στο σχεδιασμό. Ειδικότερα, οι taxi-in χρόνοι των αεροσκαφών υποθέτουμε ότι είναι σταθεροί. Όπως συζητείται ανωτέρω αυτό δεν είναι αληθινό στην πράξη. Ο βαθμός στον οποίο αυτή η υπόθεση έχει επιπτώσεις στο μοντέλο παραμένει υπό εξέταση.

Τέλος, η αντικειμενική συνάρτηση μετριέται σε επιβάτες-λεπτά, η οποία δεν είναι μία μετρική που συνδέεται άμεσα με δομή δαπανών της αερογραμμής. Η μετάφραση αυτής μετρικής σε χρήματα είναι δύσκολη. Εντούτοις, η μετρική συνδέει και την απόδοση λειτουργικότητας και την εμπειρία των επιβατών, και τα δύο από τα οποία έχουν μια επίδραση στην κερδοφορία της αερογραμμής. Κάποιες αναλύσεις ευαισθησίας όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση συζητούνται.

Ο χρόνος τρεξίματος του μοντέλου επίγειων διαδικασιών έχει παρουσιαστεί να είναι αποδεκτό. Προβλήματα συμπεριλαμβανομένων περίπου 80 αεροσκαφών και της κάλυψης ενός τριώρου χρονικού ορίζοντα λύνεται σε περίπου 1 λεπτό.

2.3.2.3.3. Μοντελοποίηση της βαθμονόμησης και της επικύρωσης

Για να καθορίσουμε εάν το μοντέλο επίγειων διαδικασιών είναι αποτελεσματικό στην πρόβλεψη του χρόνου αναχώρησης, οι εκτιμήσεις του χρόνου pushback συγκρίθηκαν με εκείνες από ένα απλούστερο, "απλοϊκό" μοντέλο. Το απλοϊκό μοντέλο σχεδιάζεται με ένα σταθερό χρόνο στροφής, βασισμένο στον ελάχιστο σχεδιασμένο χρόνο στροφής. Η βασική διαφορά μεταξύ των μοντέλων, επομένως, είναι ότι το μοντέλο επίγειων διαδικασιών παρέχει περισσότερη ευελιξία και εξετάζει τους πόρους πληρωμάτων εδάφους και τις ροές επιβατών στον καθορισμό του χρόνου αναχώρησης.

Από τη στιγμή που οι χρόνοι αναχώρησης των αεροσκαφών σε ένα ιδιαίτερο σενάριο είναι αλληλοεξαρτώμενοι στο μοντέλο επίγειων διαδικασιών (τα αεροσκάφη μοιράζονται τους πεπερασμένους πόρους), πολλαπλά ανεξάρτητα σενάρια θεωρήθηκαν προκειμένου να συγκριθούν τα δύο μοντέλα. Η εξεταζόμενη μετρική είναι το λάθος στην αναχώρηση, που ορίζεται ως η πρόβλεψη του μοντέλου του χρόνου αναχώρησης μείον τον πραγματικό χρόνο αναχώρησης. Για κάθε σενάριο και για κάθε μοντέλο, το μέσο λάθος αναχώρησης και το μέσο τετραγωνισμένο λάθος αναχώρησης υπολογίστηκε. Τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στην ανάλυση είναι για δώδεκα ημέρες τον Ιανουάριο, του 1998 στις 16:00 στις 19:15.

Τα μέσα τετραγωνισμένα λάθη αναχώρησης για τα δύο τα μοντέλα είναι σημαντικά διαφορετικά. Τα λάθη των μοντέλων επίγειων διαδικασιών είναι γενικά σημαντικά μικρότερα από τα λάθη του απλοϊκού μοντέλου. Στην πραγματικότητα, μία δοκιμή αξιολόγησης υπογεγραμμένη από τον Wilcoxon επιβεβαιώνει ότι οι τιμές MSE για το μοντέλο είναι λιγότερες από εκείνες για το απλοϊκό μοντέλο με ένα επίπεδο σπουδαιότητας 0,2%. Αυτό υπονοεί ότι οι πρόσθετοι παράγοντες που εξετάζονται στο μοντέλο επίγειων διαδικασιών επηρεάζει τη διαδικασία στροφής και βελτιώνει τις χρονικές προβλέψεις αναχώρησης. Εντούτοις, το διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης καθυστέρησης αναχώρησης για το μοντέλο επίγειων διαδικασιών δεν καλύπτει το μηδέν. Στην πραγματικότητα, το διάστημα εμπιστοσύνης περιέχει μόνο τους αρνητικούς αριθμούς. Αυτό σημαίνει οι εκτιμήσεις του χρόνου αναχώρησης του μοντέλου επίγειας λειτουργίας τείνουν να προηγούνται από τον πραγματικό χρόνο αναχώρησης, υπονοώντας ότι υπάρχει κάποια στατιστική απόκλιση στις προβλέψεις.

2.3.3. Προβλέψεις

Μια άμεση πιθανή εφαρμογή για τα τρία μοντέλα αναπτυγμένα για τις διαδικασίες του αερολιμένα είναι να δημιουργηθούν εκτεταμένες ικανότητες πρόβλεψης στον παράγοντα στις καθυστερήσεις λόγω των διαδικασιών του αερολιμένα. Ο σκοπός τέτοιων ικανοτήτων πρόβλεψης είναι να προβλέψει προσδοκώμενες περιόδους συμφόρησης καλύτερα και έτσι ώστε κατάλληλα μέτρα να μπορούν να ληφθούν. Τα απαραίτητα στοιχεία για την οικοδόμηση ενός τέτοιου συστήματος περιλαμβάνουν τη δυνατότητα να

ενσωματωθούν νέες πληροφορίες καθώς γίνονται διαθέσιμες (π.χ. γνώση ενός pushback αιτήματος ή γνώση μιας απογείωσης), και τη δυνατότητα να διαδώσει την εξέλιξη του συστήματος αερολιμένων στο μέλλον. Εννοιολογικά, χτίζοντας μια τέτοια η ικανότητα πρόβλεψης καθυστέρησης δεν είναι νέα. Παραδείγματος χάριν ο Shumsky στη διατριβή του παρουσιάζει τους αλγορίθμους πρόβλεψης καθυστέρησης αναχώρησης. Η αξία ενός τέτοιου εργαλείου εξαρτάται από την ποιότητα των χρησιμοποιημένων μοντέλων. Επίσης περιορίζεται πλήρως από την ποσότητα του στοχαστικού θορύβου που παρουσιάζεται στο σύστημα, το οποίο είναι σημαντικό μέσα το πλαίσιο αυτού του εγγράφου. Κατά συνέπεια, προγραμματισμένες ικανότητες πρόβλεψης καθυστέρησης που στηρίζονται στα παρουσιασμένα μοντέλα καθώς επίσης και σε άλλα εμπειρικά μοντέλα θα είναι απαραίτητως πιθανολογικά και θα περιλάβουν τις μέσες τιμές όπως και τις σταθερές αποκλίσεις. Η οικοδόμηση ενός τέτοιου εργαλείου για τους περισσότερους σημαντικούς αμερικανικούς αερολιμένες είναι το αντικείμενο της τρέχουσας έρευνας και προσπάθειας ανάπτυξης.

2.3.3.1. Έλεγχος συμφόρησης αναχώρησης μέσω των σειρών αναμονής κρατήματος πύλης

Μια απλή στρατηγική ελέγχου προτάθηκε και ερευνήθηκε για να ελέγξει τη συμφόρηση αναχώρησης και την αναμονή διάδρομου. Είναι προφανές από το σχεδιασμό απόδοσης αναχώρησης ότι το σύστημα διαδρόμων έχει μια πεπερασμένη ικανότητα. Με βάση αυτή την παρατήρηση, προτάθηκε οι αναχωρούντες πτήσεις να μπορούν να κρατούνται στην πύλη αν η συμφόρηση αναχώρησης επιφάνειας υπερβαίνει κάποιο κατώτατο όριο ελέγχου (δηλωμένο " N_c "). Στις κρατημένες πτήσεις θα δινόταν αμέσως άδεια pushback όταν η συμφόρηση αναχώρησης επιφάνειας μειωνόταν σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Αυτή η προσέγγιση ελέγχου είναι τυπικά ίδια με τον μηχανισμό ελέγχου ροής παραθύρου που χρησιμοποιήθηκε στα δίκτυα πακέτου μεταβαλλόμενων στοιχείων όπως τα δίκτυα TCP/IP. Αυτός ο σχεδιασμός ελέγχου εμφανίστηκε για να ανταλλάξει αποτελεσματικά τις καθυστερήσεις αναμονής διαδρόμων για τις καθυστερήσεις πύλης-κρατήματος στο Boston Logan Airport. Αυτή η ανταλλαγή κρίθηκε σημαντική επειδή οι καθυστερήσεις πύλης-κρατήματος είναι σχετικά ανέξοδες και σε οικονομικές και σε περιβαλλοντικές δαπάνες, δεδομένου ότι οι μηχανές αεροσκαφών δεν τρέχουν. Η περαιτέρω έρευνα έδειξε ότι ακόμα και ακριβής εμμონή σε αυτό το σχέδιο ελέγχου θα προκαλούσε μόνο μία μικρή αύξηση στην ύπαρξη ελλείψεων πυλών, και ουσιαστικά συνολική αύξηση στις καθυστερήσεις.

Μια παρόμοια επίδραση κορεσμού απόδοσης αναχώρησης μπορεί να φανεί στους τρεις αερολιμένες που μελετώνται. Η επίδραση στο σχέδιο ελέγχου που προτάθηκε ανωτέρω ερευνήθηκε για το ATL κατά τη διάρκεια του τμήματος #3 (δευτεροβάθμιος προσανατολισμός διαδρόμων κατά τη διάρκεια σφοδρού καιρού). Οι προσομοιώσεις στο Monte Carlo προοριζόταν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του προτεινόμενου μοντέλου αναμονής στη διαδικασία αναχώρησης, με την προσθήκη της σειράς αναμονής πύλης-κρατήματος της οποίας η συμπεριφορά ελέγχθηκε από το κατώτατο όριο ελέγχου N_c και τη συμφόρηση αναχώρησης επιφάνειας. Βαθμονομημένες κατανομές των taxi-out χρόνων και της απόδοσης του διαδρόμου χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν τις taxi-out διεργασίες. Η είσοδος του συστήματος λήφθηκε να είναι η ακολουθία των πραγματικών pushback εγγραφών στη βάση δεδομένων ASQP.

Σημειώστε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προτείνουν ότι, τουλάχιστον στην περίπτωση του ATL υπό τους διευκρινισμένους όρους, μπορεί να είναι δυνατό να μειωθεί άμεσα η αναμονή διαδρόμου κατά 40% χωρίς να αυξηθεί η συνολική καθυστέρηση αναμονής, και επιπλέον μειώσεις στην αναμονή διαδρόμου είναι δυνατές εις βάρος της αυξανόμενης συνολικής καθυστέρησης. Αυτό είναι ένας σημαντικός αριθμός, ο οποίος επιβεβαιώνει προηγούμενες εκτιμήσεις για εκείνο τον αερολιμένα. Καθώς τα αποτελέσματα προσφέρουν ισχυρά στοιχεία στη σημαντική πιθανή περιβαλλοντική αποταμίευση, πιο σε βάθος έρευνα απαιτείται για να καθορίσει εάν ένας τέτοιος σχεδιασμός ελέγχου θα προκαλέσει τις ελλείψεις πυλών ή θα έχει επιπτώσεις στις αερογραμμές άδικα.

2.3.3.2.Οφέλη των εναλλασσόμενων διαδικασιών και βελτιωμένα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων

Όπως σημειώνεται στην εισαγωγή, το CTAS παράγει ακριβέστερες χρονικές εκτιμήσεις άφιξης από αυτές που οι αερογραμμές χρησιμοποιούν αυτήν την περίοδο για να διαχειριστούν τις επίγειες διαδικασίες τους. Η βελτιωμένη ακρίβεια των εκτιμήσεων των χρόνων άφιξης θα μπορούσε μεταφραστεί σε αποδοτικότερη χρήση των επίγειων πόρων. Επιπλέον, οι διαδικαστικές αλλαγές συνδυασμένες με νέα ή τροποποιημένα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων θα μπορούσαν να λάβουν τις προτιμήσεις της ακολουθίας αερογραμμών στον απολογισμό κατά συγχώνευση των αεροσκαφών υπό άφιξη. Επομένως, μια αερογραμμή θα μπορούσε ενδεχομένως να επηρεάσει τη εντολή κατά την οποία η κυκλοφορία της υπό άφιξη προσγειώθηκε.

Για να μετρήσουμε τα πιθανά οφέλη των βελτιωμένων μοιρασμένων εκτιμήσεων του χρόνου άφιξης με τις αερογραμμές και της ενσωμάτωσης των προτιμήσεων των αερογραμμών σε ακολουθία, μια ενσωματωμένη άφιξη και το μοντέλο επίγειων διαδικασιών είναι απαραίτητα. Αυτό το ενσωματωμένο μοντέλο θα καθόριζε τους χρόνους της προσγείωσης, της άφιξης στην πύλη και του pushback από την πύλη προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις υπό των περιορισμών των πόρων. Ιδανικά, το μοντέλο θα ενσωμάτωνε πρότυπες δομές του μοντέλου άφιξης και του μοντέλου επίγειων διαδικασιών που συζητείται ανωτέρω. Στην πραγματικότητα, ένα μοντέλο αναμονής καθορίζει τους taxi-in χρόνους και τους χρόνους άφιξης πυλών, ενώ το μοντέλο βελτιστοποίησης θα καθόριζε τους χρόνους μετακίνησης κάθε αεροσκάφους συμπεριλαμβανομένης της προσγείωσης, της άφιξης στην πύλη, και pushback από την πύλη. Εντούτοις, η εφαρμογή αυτού είναι μη εφικτή σε αυτό το σημείο. Το μοντέλο αναμονής απαιτεί ως είσοδο τα επίπεδα συμφόρησης αεροσκαφών άφιξης, που σημαίνει ότι οι χρόνοι προσγείωσης θα έπρεπε να δοθούν. Η βελτιστοποίηση του μοντέλου, αφ' ετέρου, δίνει λύσεις για την προσγείωση, την άφιξη στην πύλη και τους pushback χρόνους, δίνοντας το χρόνο taxi-in ως είσοδο. Είναι αδύνατον να λύσει αυτά τα προβλήματα ταυτόχρονα. Μία ευρετική προσέγγιση όπου τα μοντέλα λύνονται επαναληπτικά έως ότου συγκλίνουν σε μια βέλτιστη λύση είναι υπό ανάπτυξη.

Για τώρα, έχει σχεδιάσει το Airline Sequencing Model (ASM), ένα μοντέλο βελτιστοποίησης βασισμένο στο μοντέλο στροφή αεροσκαφών που παρουσιάζεται νωρίτερα, που εξετάζει το πρόγραμμα αναχώρησης, τους φυσικούς πόρους πυλών και τους περιορισμούς των πόρων πληρωμάτων εδάφους στον καθορισμό μιας ακολουθίας άφιξης

που ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση του επιβάτη. Σε αυτό το μοντέλο, ο taxi-in χρόνος υποτίθεται ότι ήταν σταθερός. Όλοι οι περιορισμοί που εξετάζονται στο μοντέλο επίγειων διαδικασιών που συζητείται στο προηγούμενο τμήμα είναι συμπεριλαμβανόμενοι στο ASM. Διάφοροι πρόσθετοι περιορισμοί είναι συμπεριλαμβανόμενοι στο ASM για να περιορίσουν τους χρόνους προσγείωσης και άφιξης στην πύλη. Κατ' αρχάς, το μοντέλο αποτρέπει ένα αεροσκάφος από την άφιξη στην πύλη έως ότου έχει προσγειωθεί και έχει εκτελέσει taxi στην πύλη. Άλλη σημαντική εκτίμηση στο μοντέλο είναι η δικαιοσύνη των αερογραμμών, που σημαίνει ότι το ASM εγγυάται ότι μιας αερογραμμής δεν βελτιώνεται η λειτουργική απόδοσή της εις βάρος άλλης αερογραμμής. Ο καθορισμός των χρόνων προσγείωσης της αερογραμμής στο μοντέλο επιβάλλει τη δικαιοσύνη των αερογραμμών. Μία αερογραμμή έχει την άδεια για να μεταθέσει τους χρόνους προσγείωσης των αεροσκαφών μόνο μέσα στο σύνολό των χρόνων εισαγωγής προσγείωσης. Τέλος, το ASM εξετάζει τη συμβατότητα των πυλών και την διαθεσιμότητα τους. Ένα αεροσκάφος υπό άφιξη μπορεί μόνο να έρθει στις πύλες εάν μια πύλη συμβατή με τον τύπο του αεροσκάφους είναι διαθέσιμη.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το ASM μπορεί τελικά να χρησιμοποιηθεί από μια αερογραμμή για να διαχειριστεί τα αεροσκάφη υπό άφιξη. Με την υπόθεση αυτή οι νέες διαδικασίες ενσωμάτωσαν την ικανότητα για προνομιακή τοποθέτηση στη σειρά αναμονής αφίξεων, μια αερογραμμή θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει το ASM για να καθορίζει τη βέλτιστη ακολουθία του. Από το ASM οι λύσεις παράγονται γρήγορα, οι λύσεις του μπορούν να ενσωματωθούν σε μοντέλα που χρησιμοποιούνται αυτήν την περίοδο από τις αερογραμμές για να βοηθήσει να διαχειριστεί την πύλη και τους πόρους πληρωμάτων εδάφους.

2.3.4.Συμπεράσματα

Εδώ έχει μελετηθεί η μοντελοποίηση των διαδικασιών στην πολυάσχολη πλήμνη του αερολιμένα. Μοντέλα άφιξης αεροσκαφών, στροφής και διαδικασιών αναχώρησης έχουν προταθεί που αποτελούν την κυρίαρχη δυναμική αερολιμένων σε κάθε στάδιο. Αυτά τα μοντέλα έχουν βαθμονομηθεί. Επιδείχθηκε πώς αυτά τα μοντέλα μπορούν να είναι συνδεδεμένα για να δημιουργήσουν μια ικανότητα πρόβλεψης συμφόρησης αερολιμένων, και πώς αυτά τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν μερικές βελτιώσεις σε διαδικασίες αερολιμένων.

2.4.Μοντέλο Γ

Οι παρατηρήσεις στο πεδίο με ελεγκτές στο BOS και EWR έχουν προσδιορίσει την περάτωση των τοπικών διορθώσεων αναχώρησης ως την αυστηρότερη κατηγορία των περιορισμών αναχώρησης αερολιμένων. Ένα σύνολο δυναμικών αναμονής και "κανόνων κυκλοφορίας" αναπτύσσεται για να διαμορφώσει την κυκλοφορία αναχώρησης υπαγόμενη σε τέτοιους περιορισμούς. Η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου εξετάζεται μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo έναντι σε 10 ώρες των στοιχείων

πραγματικών διαδικασιών που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μιας περίπτωσης υπό εξέταση στο EWR στις 29 Ιουνίου, το 2000. Μια ανάλυση των μέσων σφαλμάτων προσομοίωσης δείχνει ότι οι περιορισμοί διαστήματος επηρεάζουν επίσης σημαντικά την κυκλοφορία αναχώρησης. Η εργασία είναι εν εξελίξει για να ενσωματώσει αυτήν την κατηγορία των περιορισμών στις δυναμικές του μοντέλου. Διάφορες εφαρμογές και υποθετικά σενάρια συζητούνται που θα μπορούσαν να αξιολογηθούν χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο μοντέλο.

2.4.1. Περιγραφή μοντέλου

Ένα ουσιαστικό μέρος των καθυστερήσεων και των αβεβαιοτήτων στους gate-to-gate χρόνους μπλοκαρίσματος εμφανίζεται κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των taxi-out χρόνων, μεταξύ των πυλών και των διαδρόμων αναχώρησης. Αν και οι επιβραδύνσεις στην taxi-out διαδικασία μπορούν συχνά να επισημανθούν στους τοπικούς όρους κυκλοφορίας όπως η υπερβολική ζήτηση αναχώρησης, η προηγούμενη έρευνα στον αερολιμένα Boston-Logan (BOS) έχει δείξει ότι οι περιορισμοί επιβάλλονται από την κατεύθυνση ροής στον εναέριο χώρο και οι αερολιμένες μπορούν επίσης να δημιουργήσουν τις τεχνητές τοπικές δυσχέρειες, οδηγώντας σε τοπική συμφόρηση κυκλοφορίας και καθυστερήσεις. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα των περιορισμών της κατεύθυνσης ροής κατά την προσπάθεια να αναλυθούν, να μοντελοποιηθούν, και να βελτιστοποιηθούν οι ροές κυκλοφορίας αναχώρησης στην επιφάνεια των αερολιμένων. Έτσι, επεκτείνεται η προηγούμενη έρευνα για τη διαμόρφωση και τον έλεγχο της διαδικασίας αναχώρησης αερολιμένων για να ενσωματωθούν τα αποτελέσματα των περιορισμών κυκλοφορίας από την κατεύθυνση ροής.

Οι περιορισμοί μπορούν γενικά να διαχωριστούν μεταξύ των περιορισμών ροής εναέριου χώρου (π.χ. περιορισμοί Miles-In-Trail (MIT) ή MINutes-In-Trail (MINIT) σε ένα καθορισμό αναχώρησης) έναντι του time-windowing για τα συγκεκριμένα αεροσκάφη (π.χ. Αναμενόμενοι Χρόνοι Εκκαθάρισης Αναχώρησης για τα συγκεκριμένα αεροσκάφη ή Προγράμματα Επίγειας Καθυστερήσης στους κορεσμένους αερολιμένες). Σημειώστε ότι καθένας τύπος περιορισμού έχει ένα κατώφλι αυστηρότητας, επάνω από το οποίο η επηρεαζόμενη κυκλοφορία σταματά εντελώς. Οι περιορισμοί μπορούν επίσης να ταξινομηθούν από το πεδίο του χώρου:

- Τοπικός εναέριος χώρος όπως οι καθορισμοί αναχωρήσεων
- Κατεύθυνση ροής εναέριου χώρου όπως οι γειτονικοί τομείς
- Κατεύθυνση ροής αερολιμένων

και επίσης από το πεδίο του χρόνου:

- Χρονική ανοχή στην οποία οι αλλαγές στους περιορισμούς μπορούν να προβλεφθούν ακριβώς
- Αναμενόμενη "διάρκεια" ενός συγκεκριμένου περιορισμού.

Προκειμένου να εξεταστεί το πλήρες εύρος των πιθανών αποτελεσμάτων στην κυκλοφορία αναχώρησης αερολιμένων, εδώ αποτυπώνονται οι αυστηρότεροι περιορισμοί κατεύθυνση ροής, όπου η αυστηρότητα μετριέται από την άποψη του γενικού αντίκτυπου στον αερολιμένα στην απόδοση και στις taxi-out καθυστερήσεις.

Οι παρατηρήσεις στο πεδίο του BOS και του αερολιμένα του Newark (EWR) χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την περάτωση των τοπικών καθορισμών αναχώρησης ως η αυστηρότερη κατηγορία περιορισμών. Σε συνεργασία με μια περίπτωση υπό εξέταση που διεξάχθηκε στο EWR στις 29 και 30 Ιουνίου του 2000, ένα σύνολο δυναμικών αναμονής και "κανόνες κυκλοφορίας" αναπτύχθηκαν για να διαμορφώσουν την κυκλοφορία αναχώρησης υπαγόμενη στις περατώσεις των τοπικών καθορισμών αναχώρησης. Η ισχύς αυτού του μοντέλου εξετάζεται μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo έναντι σε 10 ώρες των πραγματικών στοιχείων διαδικασιών που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της περίπτωσης υπό εξέταση. Τελικά, διάφορες εφαρμογές και υποθετικά σενάρια συζητούνται που θα μπορούσαν να αξιολογηθούν χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο μοντέλο.

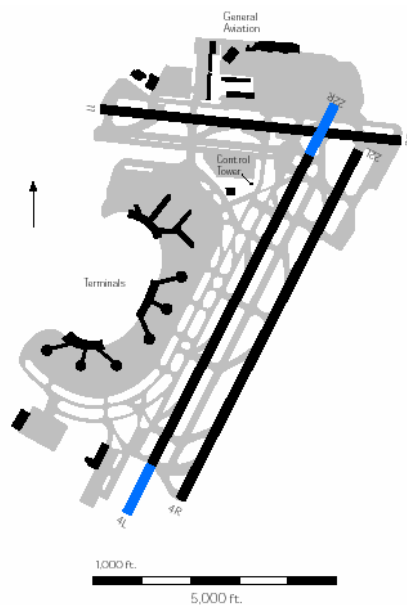
2.4.2. Παρατηρήσεις πεδίων και πηγές στοιχείων

Παρατηρήθηκαν ότι οι περιορισμοί ροής που προκλήθηκαν από τον τοπικό καιρό στον καθορισμό αναχωρήσεων του αερολιμένα έτειναν να παραγάγουν τις μέγιστες αποκλίσεις από τη μέση απόδοση και έτσι τη μέγιστη καθυστέρηση. Οι συνεντεύξεις με τους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας στον πύργο του BOS και του Έλεγχου Προσέγγισης Τερματικού Ραντάρ (TRACON) υποστηρίζουν αυτήν την παρατήρηση:

1. Οι μη-τοπικοί περιορισμοί επηρεάζουν φυσικά ένα μικρότερο μέρος της κυκλοφορίας από τους τοπικούς περιορισμούς. Παραδείγματος χάριν, οι περιορισμοί άφιξης σε έναν αερολιμένα δεδομένης κατεύθυνσης ροής μπορούν να επηρεάσουν τις πτήσεις για να ακυρωθούν εντελώς (επιτυχάνοντας το μέγιστο αντίκτυπο στη απόδοση και τις καθυστερήσεις για εκείνη την συγκεκριμένη πτήση), αλλά σχετικά λίγες πτήσεις προορίζονται για οποιοδήποτε συγκεκριμένο αερολιμένα.
2. Ο time-windowing έχει έναν μικρότερο αντίκτυπο από τους περιορισμούς ροής. Πάλι, ο time-windowing επιβάλλεται χαρακτηριστικά για να συγχωνεύσει μια πτήση σε ένα διαθέσιμο slot κυκλοφορίας (είτε enroute είτε στον αερολιμένα προορισμού), και έχει επιπτώσεις έτσι σε ένα μικρότερο μέρος της συνολικής κυκλοφορίας αναχώρησης.
3. Μέχρι ένα ορισμένο κατώφλι αυστηρότητας, οι ελεγκτές μπορούν συνήθως να προσαρμόσουν τους περιορισμούς διαστήματος σε ένα καθορισμό αναχώρησης (είτε MIT είτε MINIT) μέσω της κατάλληλης αλληλουχίας των σειρών αναμονής διαδρόμων και της καθοδήγησης στον εναέριο χώρο TRACON πριν από το handoff στο Κέντρο. Αυτή η ευκαμψία περιορίζεται πρώτιστα από το φόρτο εργασίας που περιλαμβάνεται στην αλληλουχία και τη συμμετέχουσα κυκλοφορία μεταξύ των διάφορων καθορισμών αναχώρησης. Όλοι οι ελεγκτές που πέρασαν από συνέντευξη είπαν ότι το κλείσιμο του καθορισμού μιας αναχώρησης είχε πολύ μεγαλύτερη επίδραση από τους περιορισμούς διαστήματος που αντιμετωπίστηκαν κανονικά.

4. Οι μικρές απαιτήσεις διαστήματος σε ένα καθορισμό αναχώρησης (π.χ. μεγαλώνοντας το ελάχιστο διάστημα απογείωσης 3-μιλίων στο ελάχιστο 5-μιλίων enroute που χωρίζει τα διαστήματα) μπορούν να ολοκληρωθούν στον εναέριο χώρο του TRACON. Εντούτοις, υπάρχουν ζητήματα φόρτου εργασίας που περιλαμβάνονται με την απαραίτητη καθοδήγηση αεροσκάφους. Οι μεγάλες απαιτήσεις διαστήματος (ειδικά οι περιορισμοί MINIT) μπορούν και πρέπει να επιβληθούν στο διάδρομο.

Βασισμένοι σε αυτές τις παρατηρήσεις, επικεντρωνόμαστε πρώτιστα στα αποτελέσματα των περατώσεων των τοπικών καθορισμών αναχώρησης. Σημειώστε ότι οι συνεντεύξεις διευθύνθηκαν πρώτιστα σε BOS και EWR, και είναι πιθανό ότι σημαντικές διαφορές θα βρίσκονταν με το να πάρουν συνέντευξη από τους ελεγκτές από άλλους σταθμούς. Η εργασία είναι εν εξελίξει για να επεκτείνει αυτές τις συνεντεύξεις και παρατηρήσεις ελεγκτών στις διαδικασίες στους δύο μεγάλους αερολιμένες πλημνών, Washington-Dulles (IAD) και San Francisco (SFO).



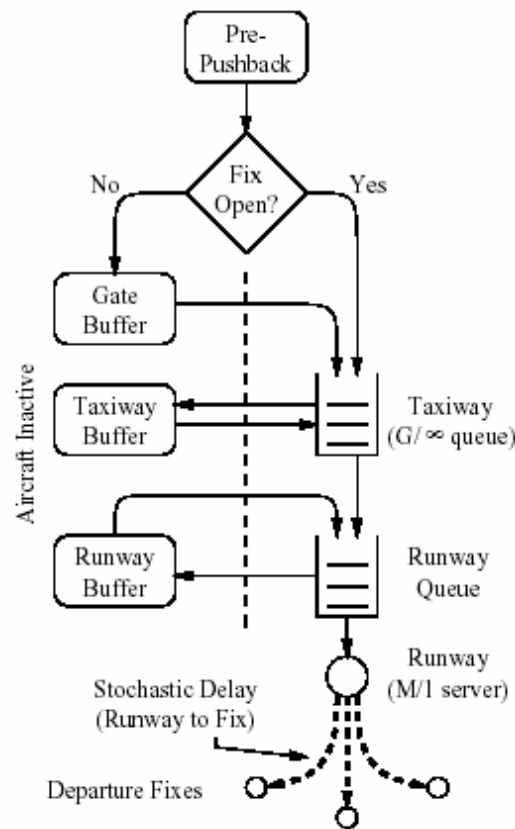
Σχήμα 2.21 Διάγραμμα διαδρόμων του EWR

Ένα πλούσιο σύνολο δεδομένων είναι διαθέσιμο από την υπό εξέταση περίπτωση του EWR για να προσδιορίσει περαιτέρω τα αποτελέσματα των περιορισμών κατεύθυνσης ροής. Τα στοιχεία διαδικασιών από το σύστημα CATER στο EWR παρέχουν μια πολύ πλήρη εικόνα της ζήτησης κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένων των διαμορφώσεων διαδρόμων και των εποχών για το αίτημα και την απογείωση των pushback εκκαθαρίσεων. Οι καταχωρήσεις περιορισμού από τον πύργο του EWR και οι φωτοαντίγραφες λουρίδες πτήσεων είναι επίσης διαθέσιμα, και παρέχουν μια αξιόπιστη καταγραφή της κατάστασης κυκλοφορίας που αντιμετωπίζεται από τους ελεγκτές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21, το EWR έχει ένα κύριο ζευγάρι των εξαρτώμενων διαδρόμων που προσανατολίζεται σε μια διαμόρφωση NE/SW (4/22 R/L), και έναν δευτερεύον διάδρομο ανατολής / δύσης (11/29). Σύμφωνα με μια συνέντευξη με τον επόπτη του

πύργου ελέγχου, το 11/29 χρησιμοποιείται μόνο σπάνια. Η ανάλυση των CATER στοιχείων εμφανίζει λιγότερο από 4% της καταγραμμένης χρησιμοποίησης κυκλοφορίας του 11/29. Χαρακτηριστικά, οι αφίξεις μετακινούνται στον εξωτερικό διάδρομο του ζευγαριού, ενώ οι αναχωρήσεις απογειώνονται τον εσωτερικό διάδρομο. Αυτό είναι πρώτιστα οφειλόμενο στο περιορισμένο διάστημα τροχοδρόμων, και για τις σειρές αναμονής αναχώρησης μεταξύ των διαδρόμων, και για τις σειρές αναμονής άφιξης μεταξύ του εσωτερικού διαδρόμου και των τερματικών κτιρίων. Σύμφωνα αυτά τα γεγονότα, η κυκλοφορία αναχώρησης στο EWR έχει μια σχετικά απλή δομή, με μόνο μια ενιαία πιθανή σειρά αναμονής διαδρόμων σε κάθε μια από τις δύο πιθανές διαμορφώσεις διαδρόμων. Ένας χάρτης του εναέριου χώρου που περιβάλλει το EWR είναι συμπεριλαμβανόμενος ως προσθήκη.

2.4.3.Μοντελοποίηση των δυναμικών

Ένας πολύ μεγάλος αριθμός παραγόντων μπορεί να επηρεάσει τον taxi-out χρόνο οποιασδήποτε δεδομένης πτήσης. Λόγω σπανιότητας των λεπτομερών στοιχείων των διαδικασιών, πολύ λίγοι από αυτούς τους παράγοντες είναι διαθέσιμοι για να εξηγήσουν τους παρατηρούμενες taxi-out χρόνους. Για αυτόν τον λόγο, η δυναμική κυκλοφορίας που προτείνεται είναι προορισμένη να συλλάβει τη μέση συμπεριφορά εισόδου-εξόδου της διαδικασίας αναχώρησης αερολιμένων παρά τη λεπτομερή κίνηση των μεμονωμένων αεροσκαφών στην επιφάνεια αερολιμένων. Οι παράγοντες που δεν καταγράφονται αυτήν την περίοδο στα διαθέσιμα στοιχεία διαδικασιών συσσωρεύονται μαζί, και αντιπροσωπεύονται στο μοντέλο ως πιθανολογικά αποτελέσματα.



Σχήμα 2.22 Δυναμικές μοντέλου αναμονής

Τα αεροσκάφη υποθέτουμε ότι εισάγονται στο σύστημα όταν ο πιλότος αιτείται άδειας στον τροchoδρόμο. Υποθέτοντας ότι ένα δεδομένο αεροσκάφος δεν είναι υπαγόμενο στους περιορισμούς ροής, οι ακόλουθες δυναμικές χρησιμοποιούνται (βλέπε τη δεξιά πλευρά του Σχήματος 2.22). Η άδεια στον τροchoδρόμο υποθέτουμε ότι δίδεται αμέσως. Αφού λάβει την εκκαθάριση, το αεροσκάφος υποβάλλεται σε έναν στοχαστικό ονομαστικό taxi-out χρόνο που βασίζεται στην αρχή συντεταγμένων του στην επιφάνεια του αερολιμένα. Οι παράγοντες όπως η καθυστέρηση επικοινωνιών με τον πύργο ελέγχου, η έλλειψη κατάλληλων αριθμών βάρους και ισορροπίας, οι διαδικασίες επανεκκίνησης και οι αλληλεπιδράσεις με άλλα μετακινούμενα στον τροchoδρόμο αεροσκάφη δεν παρατηρούνται στα τρέχοντα στοιχεία διαδικασιών και πρέπει έτσι να συσσωρευτούν στον στοχαστικό ονομαστικό taxi-out χρόνο. Για λόγους βαθμονόμησης του μοντέλου, οι κατανομές πιθανοτήτων για αυτούς τους taxi-out χρόνους υπολογίζονται από τους σχετικά ανεμπόδιστους taxi-out χρόνους που παρατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα συμφόρησης αναχώρησης.

Μόλις ολοκληρώσει το αεροσκάφος τον στοχαστικό ονομαστικό taxi-out χρόνο του, εισάγει μια first-come first-served σειρά αναμονής, η οποία αντιπροσωπεύει τις σειρές

αναμονής αναχώρησης που παρατηρούνται συχνά κοντά στους διαδρόμους του αερολιμένα. Στο αεροσκάφος ανατίθεται ένας στοχαστικός χρόνος εξυπηρέτησης διαδρόμου. Για λόγους πρότυπης βαθμονόμησης, το ποσοστό εξυπηρέτησης διαδρόμου υπολογίζεται κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλής συμφόρησης αναχώρησης όταν λειτουργεί ο διάδρομος στη μέγιστη απόδοση με υψηλή πιθανότητα. Αφού εργαστεί με δικό του τρόπο μέσω της σειράς αναμονής και εξυπηρετηθεί στο διάδρομο, το αεροσκάφος φεύγει από το σύστημα.

Μια πτήση της οποίας ο καθορισμός αναχώρησης έχει μόνο μια πεπερασμένη απαίτηση διαστήματος είναι υπαγόμενη στις δυναμικές αναμονής που περιγράφονται προηγουμένως. Υποτίθεται ότι ο πύργος και οι ελεγκτές TRACON έχουν τον ικανοποιητικό έλεγχο του "εύρους ζώνης" για να αντιμετωπίσουν την απαίτηση διαστήματος μέσω είτε της αλληλουχίας στο διάδρομο ή της καθοδήγησης στον εναέριο χώρο αναχώρησης. Όταν ένας καθορισμός είναι εντελώς κλειστός, οι επηρεασμένες πτήσεις είναι υπαγόμενες σε ένα τροποποιημένο σύνολο κανόνων:

1. Οι επηρεασμένες πτήσεις που δεν έχουν λάβει ακόμα την άδεια για να μετακινηθούν στον τροχοδρόμο κρατιούνται έως ότου άρεται η περάτωση καθορισμών.
2. Οι επηρεασμένες πτήσεις που μετακινούνται έξω από τον τροχοδρόμο προς τον διάδρομο τραβιούνται στις "θέσεις κυρώσεων" ή στις προσωρινές περιοχές χώρων στάθμευσης στην επιφάνεια αερολιμένων. Η διάρκεια της περάτωσης αποτυπώσεων προστίθεται στον στοχαστικό ονομαστικό taxi-out χρόνο τους. Ουσιαστικά, τα επηρεασμένα αεροσκάφη δεν μπορούν να προχωρήσουν προς το διάδρομο, αλλά και "δεν χάνουν έδαφος" όταν στέλνονται πίσω στις πύλες.
3. Οι επηρεασμένες πτήσεις στη σειρά αναμονής διαδρόμων εξάγονται ομοίως της σειράς αναμονής και κρατιούνται σε μια περιοχή οργάνωσης. Εντούτοις, όταν άρεται η περάτωση καθορισμών, τα επηρεασμένα αεροσκάφη συναντώνται στο τέλος της σειράς αναμονής διαδρόμων. Η προηγούμενη θέση τους στη σειρά αναμονής δεν είναι διατηρημένη ή σωζόμενη.

Αυτοί οι κανόνες έχουν αναπτυχθεί από τις παρατηρήσεις που γίνονται μελετώντας το EWR, και είναι προοριζόμενοι να μιμηθούν τις πραγματικές στρατηγικές ελέγχου αερογραμμών και αέρα (ATC) που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια δύο ημερών των πολύ υψηλών καθυστερήσεων και των βαριών περιορισμών καθορισμών αναχώρησης.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι δυναμικές του τρέχοντος μοντέλου δεν περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του πεπερασμένου διαστήματος χώρων στάθμευσης στην επιφάνεια αερολιμένων. Η έλλειψη ικανοποιητικού αποθηκευτικού διαστήματος μπορεί σοβαρά να περιορίσει την κυκλοφορία στην επιφάνεια αερολιμένων. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια της περίπτωσης υπό εξέταση παρατηρήθηκε ότι κάτω από όρους ακραίας συμφόρησης, μεγάλο μέρος του EWR αεροδρομίου μπορεί να μετατραπεί σε διάστημα χώρων στάθμευσης για τις καθυστερημένες πτήσεις, και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα του πεπερασμένου αποθηκευτικού διαστήματος δεν είναι ρητά συμπεριλαμβανόμενα στις δυναμικές του τρέχοντος μοντέλου.

2.4.4. Σύγκριση των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων διαδικασιών

2.4.4.1. Είσοδοι προσομοίωσης

Οι δυναμικές αναμονής που περιγράφονται ανωτέρω έχουν κωδικοποιηθεί σε μια Matlab-based προσομοίωση Monte Carlo. Οι περιορισμοί κατεύθυνσης ροής που έχουν επιπτώσεις στο EWR λήφθηκαν από τις ενημερώσεις του TRACON από τις 11:00 έως τις 19:00 (EDT) στις 29 Ιουνίου 2000, και τα αποτελέσματα προσομοίωσης που αναλύονται παρακάτω εστιάζονται σε αυτήν την περίοδο. Η θέση κάθε καθορισμού (ανοικτού ή κλειστού) εισάγεται στην προσομοίωση ως μεταβλητή Boolean. Οι πραγματικές αναθέσεις καθορισμών λαμβάνονται από τα δεδομένα των λουρίδων των πτήσεων. Η πραγματική ζήτηση αναχώρησης που παρατηρείται από τα στοιχεία λουρίδων των πτήσεων χρησιμοποιείται για να οδηγήσει την προσομοίωση ως εξωγενή είσοδο, και 40 τρεξίματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούν αυτήν την είσοδο υπολογίζονται κατά μέσο όρο για να λάβουν τις αναφερόμενες παρακάτω στατιστικές.

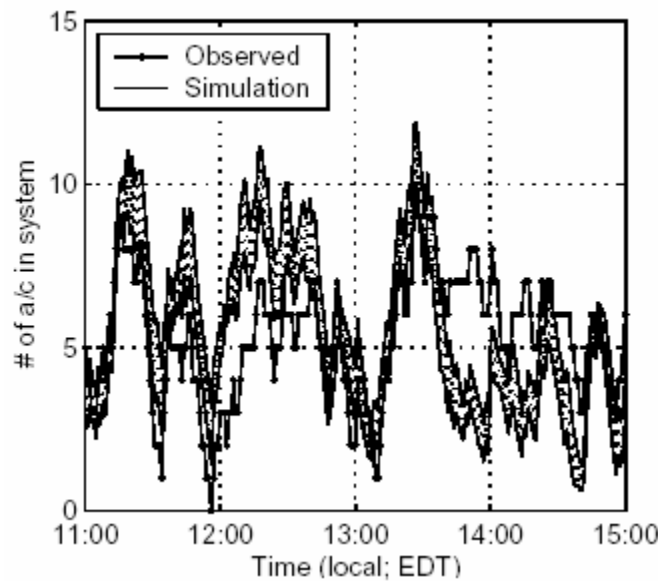
Το ποσοστό υπηρεσιών διαδρόμων προσεγγίζεται με μια τριγωνική πυκνότητα για να ταιριάζει με το ποσοστό υπηρεσιών που παρατηρείται κατά τη διάρκεια των πρώτων 2 ωρών της ελαφριά-περιορισμένης κυκλοφορίας στις 29 Ιουνίου, το 2000:

$$f(x \text{ λεπτά}) = \begin{cases} x, & 0 < x < 1 \\ 2 - x, & 1 < x < 2 \end{cases}$$

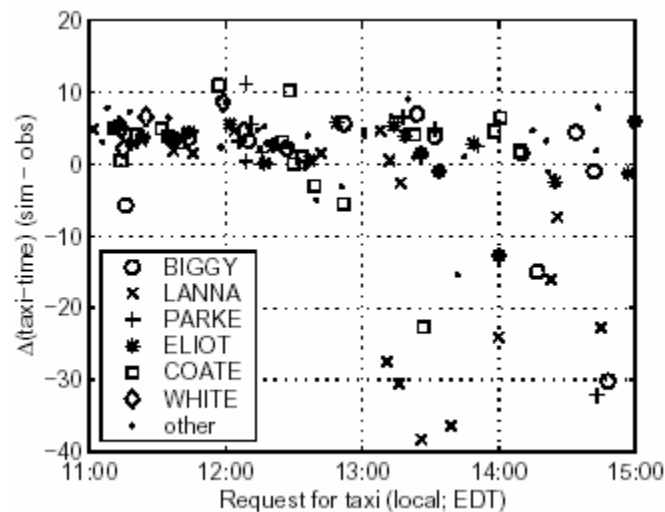
Κατανομές πιθανότητας για τους ονομαστικούς στοχαστικούς taxi-out χρόνους μπορεί να βαθμονομηθεί χρησιμοποιώντας τις δύο ημέρες που καλύπτονται από την περίπτωση υπό εξέταση οφειλόμενη στις ανώμαλες καθυστερήσεις. Άντ' αυτού, οι ονομαστικοί taxi-out χρόνοι για τις σημαντικές αερογραμμές επιβατών του EWR έχουν βαθμονομηθεί από τη βάση δεδομένων Ποιοτικής Απόδοσης Υπηρεσίας Αερογραμμών του 1998 (ASQP) χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Οι χρόνοι εξυπηρέτησης για τους μεταφορείς αέρα που δεν αντιπροσωπεύονται σε ASQP έχουν προσεγγιστεί ως κανονικά κατανομημένοι (9.75 ± 2.75 λεπτά), με μέση τιμή και διαφορά που ταιριάζει με τις αντιπροσωπευόμενες στατιστικές των αερογραμμών.

2.4.4.2. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23, οι δυναμικές του μοντέλου αναπαράγουν ακριβώς τον πραγματικό αριθμό αεροσκαφών αναχώρησης στο σύστημα κατά τη διάρκεια της (σχετικά απεριόριστης) περιόδου από τις 11:00 έως τις 15:00.



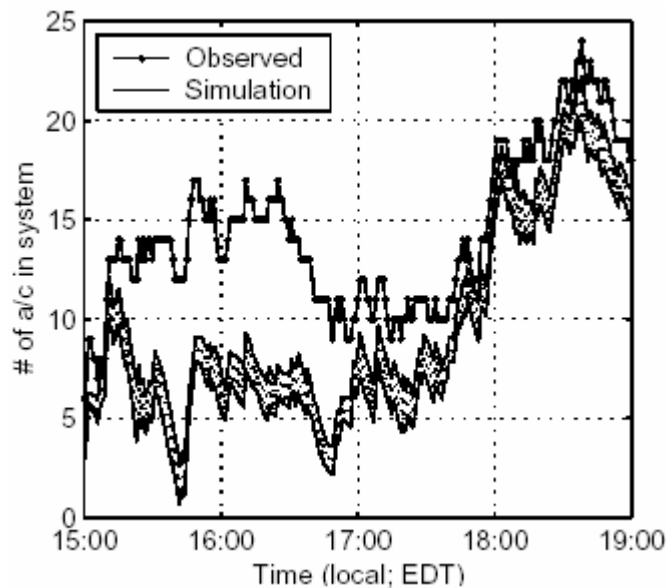
Σχήμα 2.23 Αριθμός αναχωρήσεων a/c(νωρίς)



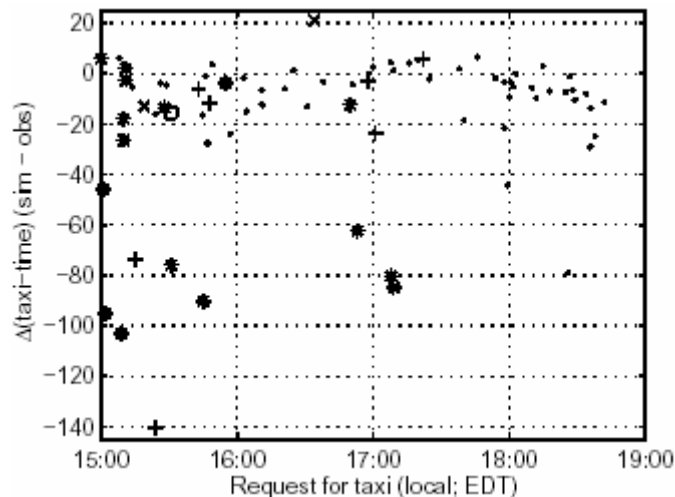
Σχήμα 2.24 Σφάλμα προσομοίωσης(νωρίς)

Στο Σχήμα 2.24 σχεδιάζεται το σφάλμα προσομοίωσης για κάθε πτήση κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου, όπου το σφάλμα μετριέται ως η διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των προσομοιωμένων και των πραγματικών χρόνων απογείωσης. 107 από τις 122 πτήσεις που έκαναν pushback κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου έχουν ένα σφάλμα 10 λεπτών ή λιγότερο (88%), και 8 από αυτά χρησιμοποιούν τον καθορισμό LANNA. Υποτίθεται ότι τα εκτός σχεδιασμού LANNA μπορούν να εξηγηθούν μερικώς από τον περιορισμό 40MIT σε LANNA από τις 13:05 έως τις 15:50. Περισσότερη εργασία είναι απαραίτητη να καθορίσει τις δυναμικές του μοντέλου και να περιλάβει τους περιορισμούς εκτός από τις ολοκληρωτικές περατώσεις καθορισμών.

Το Σχήμα 2.25 επικεντρώνεται στην περίοδο από τις 15:00 έως τις 19:00, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πολλών περισσότερων περιορισμών. Η προσομοίωση δεν ακολουθεί ακριβώς τις πραγματικές διαδικασίες κατά προσέγγιση από τις 15:00 έως τις 17:00, αλλά επανέρχεται αργότερα το βράδυ.



Σχήμα 2.25Αριθμός αναχωρήσεων α/σ(αργά)



Σχήμα 2.26Σφάλμα προσομοίωσης(αργά)

Τα σφάλματα προσομοίωσης κατά τη διάρκεια της πιο πρόσφατης περιόδου εμφανίζονται στο Σχήμα 2.26. Το εύρος των σφαλμάτων είναι πολύ μεγαλύτερο, με τις πτήσεις μέσω της λογιστικής ELIOT και PARKE για τις περισσότερες από τις ακραίες περιπτώσεις. Και οι δύο καθορισμοί έκλεισαν από τις 16:00 έως τις 16:30, και πάλι από τις 18:10 έως τις 19:00, αλλά είχαν μόνο έναν περιορισμό των 20MIT για την υπόλοιπη

περίοδο. Εδώ υποτίθεται ότι το υπερβολικό φόρτο κυκλοφορίας συνδυασμένο με τους περιορισμούς καθορισμών προκάλεσε τις διάφορες παρατηρούμενες καθυστερήσεις. Ένα κατώφλι επιδράσεων μπορεί να έχει εμφανιστεί, όπου η καθυστερημένη κυκλοφορία καθυστέρησε ελαφρώς από τις απαιτήσεις διαστήματος, για να πιαστεί μόνο από τις διακοπτόμενες περατώσεις.

2.4.5.Συμπεράσματα

2.4.5.1.Εφαρμογές και υποθετικά σενάρια

Η παρουσίαση του τρέχοντος μοντέλου βασισμένο σε Monte-Carlo χρησιμοποιείται για να εξετάσει διάφορες ανοικτές ερωτήσεις που προκύπτουν από την περίπτωση υπό εξέταση του EWR. Αυτές οι ερωτήσεις περιλαμβάνουν τα εξής:

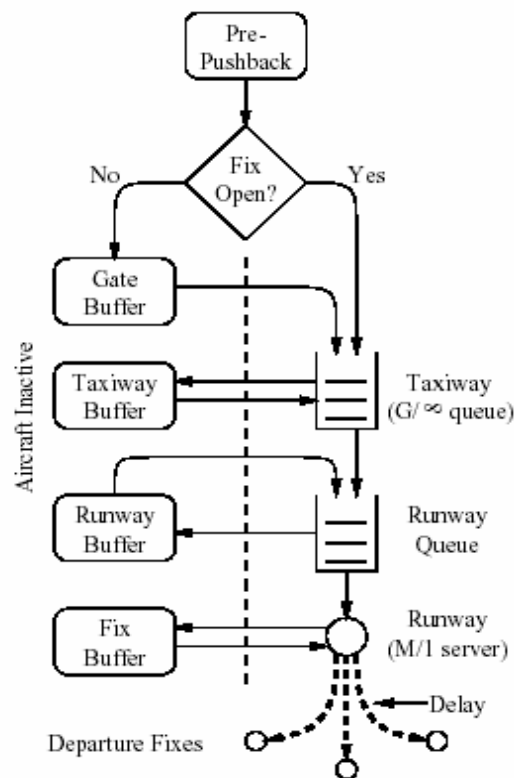
Ερώτηση: Μετά από την άρση του κλεισίματος ενός καθορισμού (ή ένας περιορισμός διαστήματος είναι χαλαρωμένος), ποιος είναι ο αναμενόμενος χρόνος αντίδρασης για την πραγματική απόδοση καθορισμών στην κορεσμένη περιοχή; Μπορεί αυτός ο χρόνος αντίδρασης να μειωθεί με κατάλληλη αποθήκευση αεροσκαφών σε διαφορετικά σημεία στο σύστημα;

Ερώτηση: Σε πολλούς αερολιμένες, οι καθορισμοί αναχώρησης είναι συγκεντρωμένοι, π.χ. οι Δυτικοί καθορισμοί στο EWR. Ποια είναι τα πιθανά οφέλη και τα προβλήματα μιας απλής διαδικασίας μετακίνησης που σχεδιάζεται για να μεταστρέψει τους καθορισμούς και να αποφύγει έτσι τις περατώσεις καθορισμών που οφείλονται στα καλά-εντοπισμένα καιρικά προβλήματα;

Ερώτηση: Υποθέστε ότι κάποια μικρή χρονική ανοχή είναι διαθέσιμη στις επερχόμενες αλλαγές στους περιορισμούς καθορισμών, π.χ. οι ελεγκτές πύργων μαθαίνουν 10 λεπτά εκ των προτέρων ότι μια περάτωση καθορισμού θα αρθεί. Ποια είναι τα πιθανά οφέλη των στρατηγικών ελέγχου που συνυπολογίζονται για αυτές τις πληροφορίες χρονικής ανοχής;

2.4.5.2.Οι περαιτέρω βελτιώσεις μοντέλου

Όπως φαίνονται από τα αποτελέσματα προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της συμφόρησης κυκλοφορίας στην επιφάνεια και οι περατώσεις διαμορφώσεων μπορούν να μοντελοποιηθούν ικανοποιητικά με τη σχετικά απλή δυναμική αναμονής. Εντούτοις, οι καθυστερήσεις αναχώρησης που μπορούν να εξηγηθούν απλώς από αυτά τα αποτελέσματα είναι επίσης προφανείς. Οι αυστηροί περιορισμοί διαστήματος μπορούν να συνδυαστούν με τα υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας, που υπερφορτώνουν την ευκαμψία για να συναντήσουν τέτοιους περιορισμούς μέσω της επαν-αλληλουχίας πριν από την απογείωση ή την καθοδήγηση μετά από την απογείωση.



Σχήμα 2.27 Αποθήκευση αναχωρήσεων εναέριου χώρου

Για να ενσωματώσει τέτοια αποτελέσματα, η λογική αλληλουχίας των ελεγκτών πύργων πρέπει να προσεγγιστεί και να συλληφθεί ακριβώς στις δυναμικές του μοντέλου. Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα είναι να χαρακτηριστεί η δυσκολία της αποδοτικής επαν-αλληλουχίας ως άνοδο επιπέδων κυκλοφορίας και οι περιορισμοί διαστήματος να γίνονται αυστηρότεροι. Ιδιαίτερα, ένα αιχμηρό κατώφλι επιδράσεων θα είχε σημαντικές συνέπειες για τη στρατηγική διαχείριση κυκλοφορίας. Πρόσθετα, υπάρχει μερικός μικρός βαθμός ευκαμνίας στην κατεύθυνση και αποθήκευση αεροσκαφών μετά από την απογείωση στον εναέριο χώρο αναχώρησης TRACON. Αυτή η επίδραση μπορεί να αντιπροσωπευθεί ως πολύ μικρό αποθηκευτικό διάστημα που συνδέεται με το σύστημα διαδρόμων (βλ. Σχήμα 2.27). Η εργασία είναι εν εξελίξει για να χαρακτηρίσει αυτήν την επίδραση μέσω των συνεντεύξεων με τους ελεγκτές αναχώρησης στο TRACON και την ανάλυση των τροχιών των πτήσεων του ραντάρ TRACON.

Μια ενδιαφέρουσα ερώτηση έχει σχέση την απαίτηση του διαστήματος MIT ή MINIT που κλείνει αποτελεσματικά ένα καθορισμό αναχώρησης. Είναι προφανές ότι κάποιο κατώφλι επιδράσεων πρέπει να εμφανιστεί μεταξύ του ελάχιστου διαστήματος 3 miles-in-trail που απαιτείται από όλα τα αεροσκάφη αναχώρησης, και του αποτελεσματικά άπειρου διαστήματος μιας περάτωσης καθορισμού. Είναι πιθανό ότι οι πολύ μεγάλες απαιτήσεις καθορισμού διαστήματος (επάνω από 40MIT που αντιμετωπίζεται μερικές

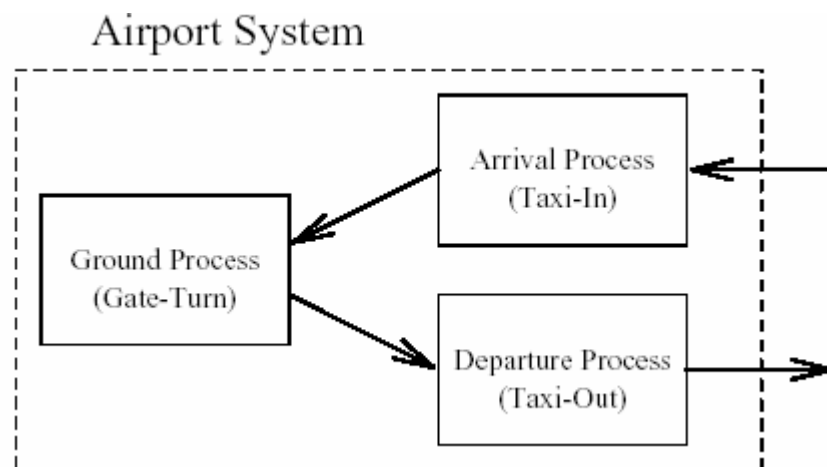
Κεφάλαιο 3^ο

Δυναμικό Μοντέλο Αερολιμένα

3.1.Περιγραφή μεθόδου

Τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έχουν περιγραφεί στη βιβλιογραφία. Με σκοπό την παρούσα έρευνα προτείνουμε ένα γενικό μοντέλο που θα ενσωματώσει τις αφίξεις, τις αναχωρήσεις και τους επίγειους χειρισμούς αεροσκαφών ταυτόχρονα. Κατά συνέπεια θα είναι ένα μοντέλο γενικής φύσης. Δεδομένου ότι οι διαδικασίες αεροσκαφών μπορούν να διαμορφωθούν ως ιδιαίτερα γεγονότα, έτσι ένα τέτοιο μοντέλο θα έχει ομοιότητες στα ήδη υπάρχοντα που αναπτύσσονται για τα διακριτού γεγονότος συστήματα. Εδώ θα προσπαθήσουμε να διαμορφώσουμε τις διαδικασίες αεροσκαφών με ένα μη γραμμικό δυναμικό μοντέλο όπως αυτό που αναπτύσσεται για την κατασκευή των συστημάτων, για τα οποία είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε δυναμικά τους νόμους ελέγχου και να σχεδιάσουμε προσαρμοστικά τις διαδικασίες μηχανών (machine) – υπομηχανών (submachine) όπως για να επιτύχουμε τους προκαθορισμένους βέλτιστους στόχους βασισμένους στα επιλεγμένα εκ των προτέρων κριτήρια.

Ο σκοπός τέτοιων ικανοτήτων πρόβλεψης (βλ. σχήμα 3.1) είναι να προβλέψει προσδοκώμενες περιόδους συμφόρησης καλύτερα και έτσι ώστε κατάλληλα μέτρα να μπορούν να ληφθούν.



Σχήμα 3.1. Ανάπτυγμα ενός ολοκληρωμένου μοντέλου επίγειων διεργασιών

3.2.Εισαγωγή για τον ελεγκτή

Δύο από τα πιο σημαντικά κίνητρα που συνεπάγονται τη δομή της βασικής ιδέας της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρονοπρογραμματισμού ακολουθούν: 1) η αναγκαιότητα να παρουσιαστεί χρονοπρογραμματισμός σε πραγματικό χρόνο π.χ. η επιθυμία για αποδοτική υπολογιστική μέθοδο και 2) η ικανότητα της επικάλυψης με ένα περιβάλλον αερολιμένα που υφίσταται πολλές αλλαγές όπως διαφοροποιήσεις στις απαιτήσεις για τον αερολιμένα και διακυμάνσεις στις καταστάσεις των υπομηχανών του μοντέλου όπως ανεπάρκεια του τμημάτων του αερολιμένα π.χ. η απαίτηση για ένα σύστημα ανοιχτής αρχιτεκτονικής επιτρέποντας προσαρμογές στο προτεινόμενο χρονοδιάγραμμα. Έτσι, για τους λόγους που αναφέρθηκαν ανωτέρω, η προτεινόμενη προσέγγιση του χρονοπρογραμματισμού αποτρέπει την άποψη για έλεγχο του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε κύτταρα. Από το μεγάλο πλήθος των διαθέσιμων ελεγκτών, η θεωρία και οι μέθοδοι του προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive control) εμφανίζονται ως η πιο ελκυστική επιλογή και έχουν επιλεγεί για την παρούσα περίπτωση. Λόγω των προηγούμενων ο χρονοπρογραμματισμός σε κύτταρα κατορθώθηκε με την αξιοποίηση της μεθοδολογίας του άμεσου προσαρμοστικού ελέγχου (direct adaptive control).

Αρχικά παρουσιάζεται ένας πιο τυπικός ορισμός της τοπολογίας κυττάρων που μπορεί να εκτελεστεί ο χρονοπρογραμματισμός. Προβλέπεται ότι καθορίζεται ένα συγκεκριμένο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού από τις ακριβείς διαδρομές (routes) των διάφορων τύπων τμημάτων (part types) που παράγονται σε ένα συγκεκριμένο κύτταρο, κάθε μηχανή (machine) του μοντέλου υποδιαιρείται σε έναν αριθμό υπομηχανών (submachines) ίσο με τον αριθμό των τύπων τμημάτων που μπορεί να διεκπεραιώσει. Μετά, ένας buffer εξόδου προσδιορίζεται σε κάθε υπομηχανή και το αρχικό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού αποσυνθέτεται σε ένα ισοδύναμο σύνολο αποκεντρωμένων προβλημάτων έξυπνου ελέγχου της κατάστασης του κάθε buffer ξεχωριστά.

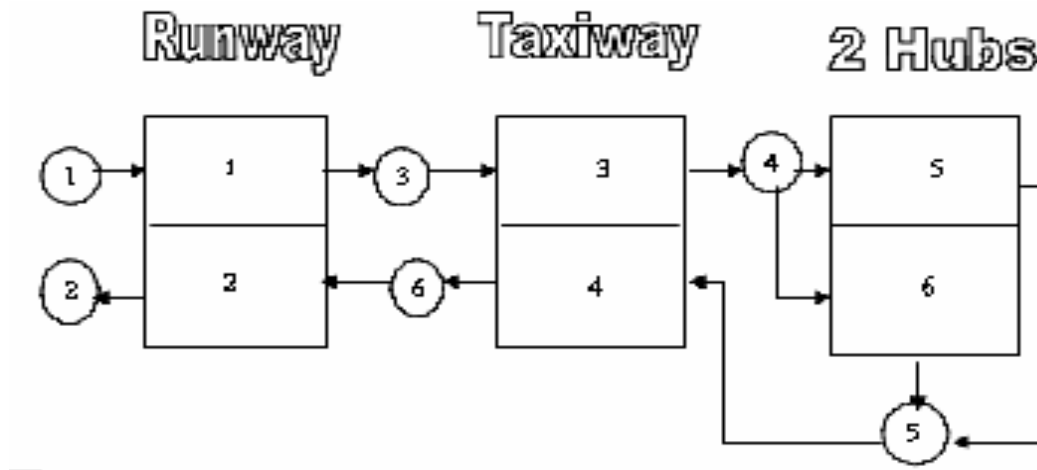
3.3.Κανονικοποίηση του προβλήματος

Ένα θεωρούμενο σύστημα περιλαμβάνει M μηχανές (machines) και παράγει ένα πολλαπλάσιο των P τύπων τμήματος (part type). Κάθε τύπος τμήματος απαιτεί έναν αριθμό λειτουργιών που πρέπει να εκτελεστούν με μια δεδομένη σειρά καθορισμένη από την διαδρομή τους. Πολλαπλές δρομολογήσεις είναι πιθανές και κάποια τμήματα μπορεί να μεταβούν σε μερικές μηχανές αρκετές φορές. Κάθε μηχανή m υποθέτουμε ότι περιλαμβάνει έναν αριθμό $N(m)$ υπομηχανών (submachines) ίσο με τον αριθμό των διαφορετικών part types που μπορεί να διεκπεραιώσει. Κάθε υπομηχανή στην πραγματικότητα αναπαριστά μία κατάσταση λειτουργίας (operating mode) της μηχανής m . Το $O(m)$ είναι ένα σύνολο τέτοιο ώστε $s \in O(m)$ που σημαίνει ότι η υπομηχανή s είναι μία υπομηχανή της πραγματικής μηχανής m . Ο αριθμός στοιχείων του $O(m)$ είναι ίσος με $N(m)$. Ακόμα
$$N_M = \sum_{i=1}^M N(m_i) \cdot$$

Μόνο μία υπομηχανή επιτρέπεται να δουλεύει τη φορά, διεκπεραιωμένα μέρη ενός απλού τύπου. Οι χρόνοι λειτουργίας των μηχανών θεωρούνται σταθεροί, για παράδειγμα ντετερμινιστικοί, όπου διαφορετικοί χρόνοι λειτουργίας για κάθε υπομηχανή επιτρέπονται. Οι χρόνοι εγκατάστασης θεωρούνται ασήμαντοι. Ακόμα θεωρούμε B buffers, ένας για κάθε λειτουργία ενός τύπου τμήματος σε μία μηχανή που εμφανίζει αυτή την λειτουργία. Το $B_+(s)$ είναι ένα σύνολο τέτοιο ώστε $b \in B_+(s)$ που σημαίνει ότι ο buffer b είναι buffer εισόδου για την υπομηχανή s . Το ισοδύναμο του buffer $b \in B_+(s)$ θα δηλώνεται x_{0b} . Όμοια $b \in B_-(s)$ σημαίνει ότι ο buffer b είναι ο buffer εξόδου της υπομηχανής s . Ένας buffer εισόδου ορίζεται ως ο buffer b για τον οποίο $b \cap \{B_-(s_1)\} \cup \{B_-(s_2)\} \cup \dots \cup \{B_-(s_{N_M})\} = \{\emptyset\}$. Όμοια ένας buffer εξόδου b είναι για τον οποίο $b \cap \{B_+(s_1)\} \cup \{B_+(s_2)\} \cup \dots \cup \{B_+(s_{N_M})\} = \{\emptyset\}$. Υποθέτουμε ότι οι buffers εισόδου είναι άπειρης χωρητικότητας. Το $M_-(b)$ επίσης ορίζεται, όπου $s \in M_-(b)$ δηλώνει ότι η υπομηχανή s τροφοδοτείται από τον buffer b . Οι αριθμοί στοιχείων των συνόλων $B_+(s)$ και $M_-(b)$ είναι $N_B(s)$ και $N_M(b)$ αντίστοιχα, ενώ ο αριθμός στοιχείων του συνόλου $B_-(s)$ είναι πάντα ίσος με 1 καθώς δεν επιτρέπουμε αποσυναρμολογημένες λειτουργίες. Συμπερασματικά συναρμολογημένες (αλληλένδετες) διαδικασίες μπορούν να περιγραφούν αν για κάποια υπομηχανή s ο αριθμός στοιχείων του συνόλου $B_+(s)$ είναι μεγαλύτερος του 1. Τα σύνολα $O(m)$, $B_+(s)$ και $B_-(s)$ μπορούν ολοκληρωτικά να περιγράψουν την αλληλοσυνδετικότητα του συστήματος. Μία μηχανή θα αποκαλείται ‘αδρανής με αντιστοιχία στον τύπο τμήματος’ αν είναι αδρανής (idle) ή διεκπεραιώνει κάποιους τύπους τμήματος διαφορετικούς από τον καθορισμένο.

Καθώς το σύστημα έχει περιγραφεί λεπτομερώς πρέπει να αναφέρουμε και την κύρια ιδέα της προτεινόμενης προσέγγισης στο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού. Ο σκοπός είναι να κατευθυνθούμε στον κατάλληλο χρονοπρογραμματισμό (ακολουθία από διεκπεραιωμένες εντολές), με τους buffers εξόδου του συστήματος να επιτύχουν μία μικρή γειτονιά των προκαθορισμένων αποτελεσμάτων κρατώντας όλους τους ενδιάμεσους buffers εντός των αποδεκτών τιμών τους. Ειδικότερα οι τιμές που στοχεύουμε καθορίζονται για όλους τους buffers που υπάρχουν στο σύστημα, τους buffers εξόδου που αποθηκεύουν τα τελικά επεξεργασμένα αποτελέσματα και τους ενδιάμεσους buffers που συλλέγουν τα μισοτελειωμένα τμήματα σε όλα τα ενδιάμεσα στάδια παραγωγής. Θέτοντας ως καταστάσεις που στοχεύουμε για κάθε buffer εξόδου στο σύστημα, η πραγματική απαίτηση για τα τελειωμένα παραγόμενα για τον αντίστοιχο τύπο τμήματος, ο σκοπός της παραγωγής επιτυγχάνεται όταν τα περιεχόμενα αυτών των buffers οδηγούνται στους επιθυμητούς αριθμούς τμημάτων. Όμοια, καθορίζοντας τις καταστάσεις που στοχεύουμε για τους ενδιάμεσους buffers ως τους κατάλληλους αριθμούς τμημάτων χωρίς να υπερβαίνουμε τις καθορισμένες χωρητικότητες τους, ολοκληρωτικά η διεργασία παραγωγής των καταστάσεων των ενδιάμεσων buffers παραμένουν κοντά στις επιθυμητές τιμές και συνεπώς αποδεκτά επίπεδα των ενδιάμεσων buffers κατορθώνονται κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διεργασίας. Η τελευταία επίτευξη μπορεί εύκολα να περιγραφεί ως διπλό κέρδος: αντιστοιχία σε όλους τους περιορισμούς της χωρητικότητας του συστήματος και χαμηλό κόστος απογραφής των εισαγόμενων διεργασιών.

Ακολουθεί τεχνική διαμόρφωσης αερολιμένα για έναν πολύ μικρό απλό αερολιμένα όπως το σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Διαμόρφωση αερολιμένα

Buffer	Προηγούμενος Buffer	Submachine Εισόδου	Submachine Εξόδου
1	-	-	1
2	6	2	-
3	1	1	3
4	3	3	5,6
5	4	5,6	4
6	5	4	2

Πίνακας 3.1: Αλληλοσυνδετικότητα κυττάρων

Υποθέτουμε ότι ο αερολιμένας έχει μόνο έναν διάδρομο (runway) που χρησιμοποιείται και για την απογείωση και για προσγείωση, έναν τροχοδρόμο (taxiway) που χρησιμοποιείται για εισερχόμενα (taxi-in) στα hubs και εξερχόμενα (taxi-out) στους διαδρόμους αεροσκάφη και μόνο δύο hub αεροσκαφών. Εδώ αντιπροσωπεύουμε με μικρούς κύκλους τους διάφορους buffers. Ο αριθμός 1 είναι ο buffer των εισερχόμενων αεροπλάνων στον αερολιμένα ενώ είναι ακόμα στον αέρα, 3 είναι ο taxi-in buffer στο τέλος του διαδρόμου πριν εισαχθούν στον taxiway. Ο 4 είναι ο hub buffer που μπορεί να παρέχει τα αεροπλάνα σε καθένα από τα hubs, 5 είναι taxi-out buffer, που παίρνει τα αεροπλάνα και από τα δύο hubs, τα καθοδηγεί στον taxiway, 6 δείχνει τον buffer αεροσκαφών πριν από το διάδρομο απογείωσης (runway) και 2 είναι ο buffer των

αναχωρούντων αεροσκαφών στον αέρα. Εδώ μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο buffer 1 και ειδικά ο 2 είναι άπειρης χωρητικότητας, ενώ όλοι οι άλλοι στο έδαφος είναι πεπερασμένης χωρητικότητας.

Μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάδρομο (runway) παρόμοια με μια μηχανή παραγωγής που αποτελείται από δύο υπομηχανές (sub-machines), runway-out και runway-in στον αερολιμένα, που ονομάζονται 1 και 2, με τον πρόσθετο περιορισμό ότι όταν ένα submachine είναι σε λειτουργία, το άλλο είναι αδρανές.

Επίσης αντιπροσωπεύουμε τον taxiway ως μηχανή με δύο υπομηχανές, και επειδή είναι αρκετά μικρό, με τον περιορισμό όπως ανωτέρω για το runway.

Τα δύο hubs αποτελούνται από δύο διαφορετικές μηχανές που μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα, με άλλα λόγια δύο διαφορετικά αεροσκάφη μπορούν να συντηρηθούν συγχρόνως στους δύο διαφορετικούς σταθμούς χειρισμών εδάφους.

Η συγκεκριμένη διαμόρφωση του αερολιμένα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Αποτελείται από:

- 4 μηχανές (machines), δηλαδή $M=4$,
- 1 τύπο τμήματος (part type), δηλαδή $P=1$
- 6 συνολικά buffers, δηλαδή $B=6$
- 2 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας (operating modes) προσδιορίζονται στις μηχανές A,B που σημαίνει
- 4 συνολικά υπομηχανές (submachines) 1,2 και 3,4 αντίστοιχα, δηλαδή ο αριθμός των υπομηχανών για κάθε μηχανή είναι $N(A)=2$ και $N(B)=2$
- 1 διαδρομή (route) που χρησιμοποιεί την σειρά των buffers 1,3,4,5,6,2
- buffer 1 είναι ο buffer εισόδου με άπειρη χωρητικότητα
- buffer 2 είναι ο buffer εξόδου με άπειρη χωρητικότητα

Τα σύνολα που δηλώνουν τις υποδιαιρέσεις για κάθε μηχανή είναι: $O(A)=\{1,2\}$ και $O(B)=\{3,4\}$.

Τα αλληλένδετα σύνολα $B_+(s)$ και $B_-(s)$ είναι (όπου s : υπομηχανή):

$B_+(1)=\{1\}$, $B_+(2)=\{6\}$, $B_+(3)=\{3\}$, $B_+(4)=\{5\}$, $B_+(5)=\{4\}$, $B_+(6)=\{4\}$

Και $B_-(1)=\{3\}$, $B_-(2)=\{2\}$, $B_-(3)=\{4\}$, $B_-(4)=\{6\}$, $B_-(5)=\{5\}$, $B_-(6)=\{5\}$

Επομένως ο αριθμός στοιχείων για κάθε σύνολο είναι ίσος με 1 όταν συμβαίνει μία αλληλένδετη λειτουργία.

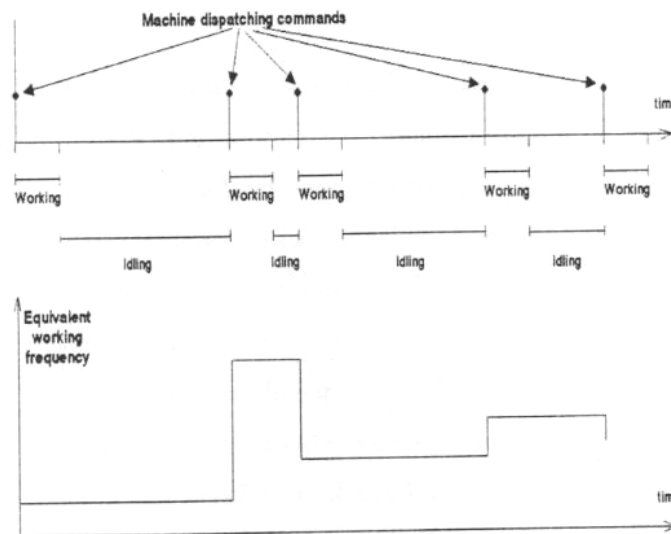
Για τα σύνολα $M(b)$ έχουμε (όπου b : buffer):

$M_-(1)=\{1\}$, $M_-(2)=\{\emptyset\}$, $M_-(3)=\{3\}$, $M_-(4)=\{5,6\}$, $M_-(5)=\{4\}$, $M_-(6)=\{2\}$

Επομένως ο αριθμός των στοιχείων για όλα τα σύνολα $M_-(b)$ είναι $N_{M_-}(1)=1$ εκτός από τα $N_{M_-}(2)=0$ και $N_{M_-}(4)=2$ (όπου N_{M_-} : ο αριθμός υπομηχανών).

3.4.Ορισμός Εισόδου Συνεχούς Ελέγχου (Continuous Control Input)

Μία συχνότητα ισοδύναμης λειτουργίας μηχανής που χρησιμοποιείται σαν είσοδος ελέγχου στο σύστημα ορίζεται ως το αντίστροφο του χρόνου μεταξύ δύο πετυχημένων ξεκινήματων της μηχανής.



Σχήμα 3.3. Ορισμός ισοδύναμης συχνότητας

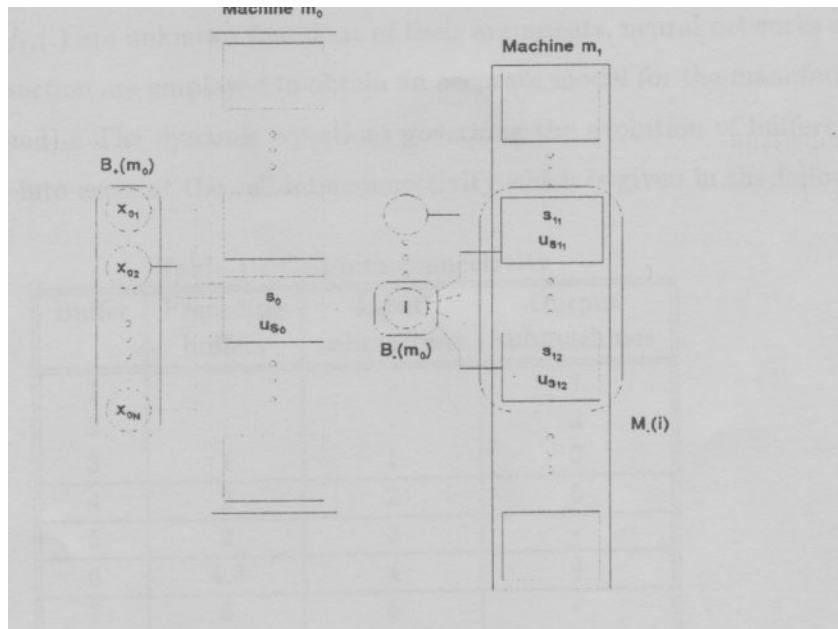
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3 ο αυθεντικός προγραμματισμός διεκπεραίωσης μιας υπομηχανής μετατρέπεται σε μία συνάρτηση σημείων σταθερής συχνότητας αμετάβλητη για ένα χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο λειτουργίας της υπομηχανής (όπου φαίνεται από τον όρο working) συν τον χρόνο που παραμένει ανενεργή (idle) με σεβασμό στο διεκπεραιωμένο part type (όπου φαίνεται από τον όρο idling). Χρησιμοποιώντας αυτόν τον ορισμό, οι συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και μιας σταθερής πεπερασμένης τιμής. Το κατώτατο όριο που ισούται με το μηδέν αντιστοιχεί σε ένα μη πεπερασμένο χρόνο που παραμένει ανενεργή (infinite idling time). Το ανώτατο όριο u_{\max} , αντιστοιχεί σε ένα ελάχιστο (μηδενικό) χρόνο που παραμένει ανενεργή, και ισούται με το αντίστροφο κλάσμα του χρόνου λειτουργίας της μηχανής. Αυτός ο ορισμός είναι σημαντικός γιατί κάνει δυνατή τη μετάβαση από ένα σύστημα διακριτής κατάστασης σε ένα σύστημα συνεχούς χρόνου.

3.5.Το Δυναμικό Μοντέλο Κυττάρων (Cell Dynamic Model)

Για να επιτευχθεί ο στόχος του ελέγχου των καταστάσεων των buffer, εφαρμόζεται η θεωρία του προσαρμοστικού ελέγχου. Έτσι, πρέπει η δυναμική συμπεριφορά των

καταστάσεων των buffer να μοντελοποιηθεί μέσω πιθανόν μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Καθώς η γενική μορφή ενός δυναμικού συστήματος είναι $\dot{x} = f(x, u)$, όπου u είναι η είσοδος ελέγχου, είναι απαραίτητο να παραχθεί όσο πιο ολοκληρωμένη περιγραφή της συμπεριφοράς του buffer στο κύτταρο. Ένα τέτοιο δυναμικό σύστημα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες: το σήμα του ελεγκτή της υπομηχανής στην έξοδο όπου ο buffer προσαρτάται, τα σήματα του ελεγκτή των μηχανών που τον επιτυγχάνουν, η κατάσταση των buffer κατά την οποία κάθε υπομηχανή τροφοδοτείται, περιορισμοί χωρητικότητας κ.τ.λ. Κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις που μοντελοποιούν το δυναμικό σύστημα κυττάρων δίνονται παρακάτω.

Θεωρείται ο buffer i , ο οποίος συλλέγει εξαγόμενα από την υπομηχανή s_{0i} και τροφοδοτεί υπομηχανές s_{1j} , $j \in M_-(i)$. Η μηχανή s_{0i} τροφοδοτείται από τους buffer x_{0b} , $b \in B_+(s_{0i})$. Αυτή η τοπολογία αναπαριστάται στο σχήμα 3. Ο δείκτης i θα απαλειφθεί για χάρη της απλοποίησης. Υποθέτοντας ότι οι υπομηχανές s_{1j} είναι ανενεργές ο αυξανόμενος ρυθμός του buffer i είναι μία συνάρτηση της συχνότητας τροφοδοτούμενης υπομηχανής u_{s_0} και χρόνου λειτουργίας T_{s_0} .



Σχήμα 3.4. Ορισμός ισοδύναμης συχνότητας

Έτσι, η εξέλιξη του buffer i μπορεί να περιγραφεί από διαφορικές εξισώσεις της μορφής $\dot{x}_i = f_i(u_{s_0}, T_{s_0})$ όπου $f_i()$ είναι κάποια άγνωστη μη γραμμική συνάρτηση ως προς τα ορίσματα της. Όσο ο χρόνος λειτουργίας T_{s_0} είναι γνωστός και σταθερός η παραπάνω αναφερόμενη εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί στη $\dot{x}_i = f_i(u_{s_0})$. Χωρίς απώλεια της γενικότητας ο γραμμικός παράγοντας $u(s_0)$ μπορεί να αποσπαστεί για να εξασφαλίσει $\dot{x}_i = g_i(u_{s_0})u_{s_0}$. Πρέπει να παρατηρηθεί ότι οι $f_i()$ και $g_i()$ είναι γενικά διαφορετικές συναρτήσεις. Επιπλέον, προσθέτονται περιορισμοί στον αυξανόμενο ρυθμό του buffer i μέσω του starvation της υπομηχανής s_0 . Αυτό μπορεί να ολοκληρωθεί πολλαπλασιάζοντας $g_i()$ με κατάλληλες συναρτήσεις $f_{ij}(x_{0j})$ για όλα $x_{0j} \in B_+(s_0)$, με

κοινή ιδιότητα $f_{ij}(x_{0j})|_{x_{0j}=0} = 0$. Έτσι, υπό αυτή την τροποποίηση, ο buffer i δεν θα τροφοδοτείται αν κάποιος από τους προηγούμενους buffer x_{ij} είναι άδειος ανεξάρτητα από την τιμή του u_{s_0} . Επομένως, το \dot{x}_i γίνεται $\dot{x} = f_{i1}(x_{01})f_{i2}(x_{02})\dots f_{iNB(s_0)}(x_{0NB(s_0)})g_i(u_{s_0})u_{s_0}$. Ένας άλλος περιορισμός αφορά την ανικανότητα του buffer i να αυξήσει τα περιεχόμενα του όταν έχει φτάσει στο όριο της χωρητικότητας του. Για να εμπεδωθεί ένας τέτοιος περιορισμός υποθέτεται ότι η $g_i(u_{s_0})$ επεκτείνεται περιέχοντας το x_i ως όρισμα και γίνεται μία νέα συνάρτηση $h_i(x_i, u_{s_0}, c_i)$ όπου το c_i αναπαριστά τη χωρητικότητα του buffer i , που υποθέτουμε ότι είναι γνωστή και σταθερή. Προφανώς το h_i πρέπει να ικανοποιεί $h_i(c_i, u_{s_0}, c_i) = 0$. Εμπεδώνοντας το c_i στο x_i συλλέγουμε όλα τα x_{0j} για όλα τα $j \in B_+(s_0)$, μαζί με τα x_i σε ένα απλό διάνυσμα \bar{x}_i και προσθέτοντας το $f_{ij}(x_{0j})$ μαζί με το $h_i(x_i, u_{s_0})$ στο $f_{0i}(x)$, έχουμε $\dot{x}_i = f_{0i}(\bar{x}_i, u_i)u_i$. Για να προχωρήσουμε υποθέτουμε ότι η υπομηχανή s_0 είναι ανενεργή, καθώς κάποιες ή όλες εξαρτημένες υπομηχανές s_{1j} , $j \in M_-(i)$, $j = 1, 2, \dots, N_M(i)$ δουλεύουν. Ο μειωμένος ρυθμός του επιπέδου του buffer i είναι μία μη-γραμμική συνάρτηση των συχνοτήτων λειτουργίας των υπομηχανών s_{1j} που είναι $\dot{x}_i = f_{1i}(u_{s_{11}}, u_{s_{12}}, \dots, u_{s_{1N_M(i)}})$. Συλλέγοντας όλα τα ορίσματα των συχνοτήτων λειτουργίας σε ένα νέο διάνυσμα \bar{u}_i , λαμβάνουμε $\dot{x}_i = f_{1i}(\bar{u}_i)$. Συνολικά το δυναμικό μοντέλο της εξέλιξης του buffer i παράγεται από τον παρακάτω τύπο

$$\dot{x}_i = f_{0i}(\bar{x}_i, u_i)u_i + f_{1i}(\bar{u}_i) \quad (1)$$

Καθώς και οι δύο $f_{0i}()$ και $f_{1i}()$ είναι άγνωστες συναρτήσεις ως προς τα ορίσματα τους, τα νευρωνικά δίκτυα της μορφής που περιγράφεται παρακάτω είναι υπευθyna να εξασφαλίσουν ένα ακριβές μοντέλο για τα κύτταρα του αερολιμένα.

3.5.1. Το δυναμικό μοντέλο αερολιμένα

Οι δυναμικές εξισώσεις που ελέγχουν την εξέλιξη των buffers 1 έως 6 κατασκευάζονται με το να λάβουν υπόψη την αλληλοσυνδετικότητα κυττάρων (cell interconnectivity), η οποία δίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Οι δυναμικές εξισώσεις που προκύπτουν από τη

σχέση που περιγράφει την μορφή του δυναμικού μοντέλου $\dot{x}_i = f_{0i}(\bar{x}_i, u_i)u_i + f_{1i}(\bar{u}_i)$ δίνονται κατωτέρω:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= f_{11}(u_1), \\
 \dot{x}_3 &= f_{03}(x_1, x_3, u_1)u_1 + f_{13}(u_3), \\
 \dot{x}_4 &= f_{04}(x_3, x_4, u_3)u_3 + f_{14}(u_5, u_6), \\
 \dot{x}_5 &= f_{05}^T(x_4, x_5, u_5, u_6) \begin{bmatrix} u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} + f_{15}(u_5, u_6), \\
 \dot{x}_6 &= f_{06}(x_5, x_6, u_4)u_4 + f_{16}(u_2), \\
 \dot{x}_2 &= f_{02}(x_2, x_6, u_2)u_2
 \end{aligned} \tag{Eq. 1}$$

Εδώ υποθέτουμε όπου x_i δείχνουν τις καταστάσεις των buffers κάθε φορά στιγμιαία για $i = 1, 2, \dots, 6$. Επίσης υποθέτουμε ότι με u_i δείχνουμε τις "συχνότητες της λειτουργίας" των ιδιαίτερων γεγονότων που πραγματοποιούνται στις διάφορες "υπομηχανές" όπως καθορίζονται για τους σκοπούς μας. Αργότερα παρουσιάζουμε μια μέθοδο για μετατροπή μιας συνεχούς συχνότητας λειτουργίας σε μια διακριτή εντολή εκτέλεσης γεγονότος και αντίστροφα. Χάριν της πληρότητας θα εξηγήσουμε την παραγωγή της εξίσωσης 4. Το ποσοστό μεταβολής του περιεχομένου του buffer 4 όσον αφορά το χρόνο, είναι ίσο με μια άγνωστη μη γραμμική σχεδίαση, προσθέτοντας "τα συστατικά" ή τη συνάρτηση αεροσκαφών f_{04} της τιμής της τρέχουσας κατάστασης x_4 , της τιμής της κατάστασης x_3 του προηγούμενου buffer της τροφοδοτούμενης "submachine" 3, και της συχνότητας λειτουργίας u_3 της "submachine" 3 από όπου τροφοδοτείται αυτός ο buffer. Ακόμα κι αν αυτή η συνάρτηση μπορεί να είναι συνολικά μη γραμμική, μπορούμε πάντα να εξαγάγουμε ένα γραμμικό μέρος της συχνότητας της λειτουργίας. Πρέπει επίσης να προσθέσουμε μια μεταφορά "συστατικών" ή μία άγνωστη μη γραμμική συνάρτηση αεροσκαφών f_{15} που εξαρτάται από τη συχνότητα της λειτουργίας των δύο "υπομηχανών" που επακολουθούν τον παρόντα buffer.

Είναι γνωστό ότι ένα τέτοιο μη γραμμικό μοντέλο με τις άγνωστες σχεδιάσεις (άγνωστη δομή) όπως ανωτέρω μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τα στοιχεία μέτρησης μέσω των τεχνικών των recurrent high-order neural networks. Επιπλέον οι προσαρμοστικοί νόμοι ελέγχου (adaptive control laws) καθιερώνονται για την ανίχνευση των επιθυμητών τιμών για τους buffers, την ελαχιστοποίηση της λειτουργίας του taxiway ή άλλους δείκτες απόδοσης. Οι περισσότεροι από τους αλγορίθμους ελέγχου, βασισμένοι σε ορισμένες ήπιες υποθέσεις για τις μη γραμμικές άγνωστες σχεδιάσεις, παρέχουν αποτελέσματα αποδεικνύοντας τη σύγκλιση λάθους στο μηδέν, ή σε περίπτωση μη μοντελοποιημένης δυναμικής, το ομοιόμορφο τελικό καθορισμένο εύρος (boundedness). Το boundedness όλων των σημάτων κλειστών βρόχων και επιπλέον η σύγκλιση λάθους στο μηδέν είναι εκθετικά γρήγορη, το οποίο σημαίνει ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε τους

προσαρμοστικούς ελεγκτές που μπορούν να επιλύσουν τη συμφόρηση και άλλα προβλήματα στους αερολιμένες σε πραγματικό χρόνο.

3.6.Χρονοπρογραμματισμός Πραγματικού Χρόνου (Real Time Scheduling)

3.6.1.Καθορίζοντας την Πραγματική Διακριτή Απόφαση Διεκπεραίωσης (Actual Discrete Dispatching Decision)

Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια πολιτική διεκπεραίωσης για να καθορίσει τα πραγματικά τμήματα χρόνων διεκπεραίωσης. Ο αλγόριθμος διεκπεραίωσης που χρησιμοποιείται ακολουθεί:

Αλγόριθμος 1 (Discrete Dispatching Decision-Single Part Case).

Βήμα 1. Η έξοδος του ελεγκτή δειγματίζεται σε συγκεκριμένο χρονικό στιγμιότυπο, και η συχνότητα εισόδου ελέγχου μετασχηματίζεται σε ένα διάστημα χρόνου παίρνοντας το αντίστροφο κλάσμα.

Βήμα 2. Στο ίδιο χρονικό στιγμιότυπο μία νέα εντολή στέλνεται στη συγκεκριμένη υπομηχανή.

Βήμα 3. Όταν ολοκληρωθεί το διάστημα του χρόνου, λαμβάνεται ένα νέο δείγμα της εισόδου ελέγχου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

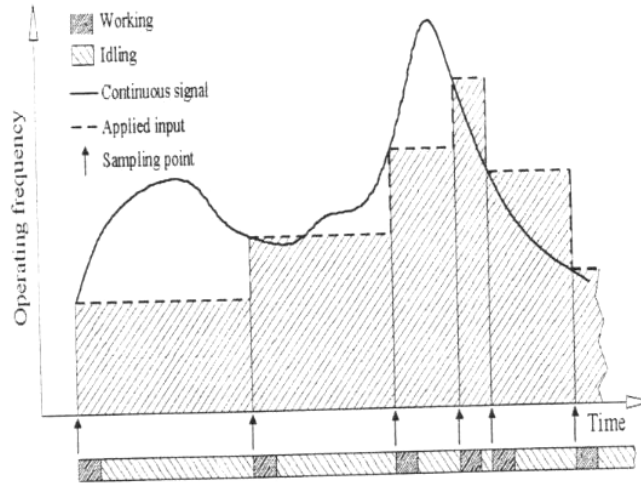
Σημείωση . Ο έλεγχος εξελίσσεται στο χρόνο, καθώς η κατάσταση της υπομηχανής είναι απείραχτη αριστερά μέχρι το ήδη υπολογισμένο χρονικό διάστημα ολοκληρωθεί. Αυτό το διάστημα είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το χρόνο λειτουργίας της μηχανής, καθώς η συχνότητα της εισόδου ελέγχου είναι μικρότερη ή ίση με την u_{\max} .

Στην περίπτωση των FMS συστημάτων που περιέχουν μηχανές πολλών παραγωγών, για να καθορίσουμε ποιος buffer θα εξυπηρετηθεί, προτείνεται η χρήση κάποιων κριτηρίων που αναπαριστούν τη μέτρηση προτεραιότητας που δίνεται. Για μία συγκεκριμένη μηχανή m που περιέχει $N(m)$ υπομηχανές, το κριτήριο υπολογίζεται σε κάθε πορεία που απασχολεί κάθε υπομηχανή $s \in O(m)$. Η παραγωγή της τιμής του κριτηρίου βασίζεται στη διαθεσιμότητα μισοτελειωμένων παραγώγων, (work-in-process, WIP), καθώς επίσης και στο λάθος ελέγχου του buffer πορείας εξόδου. Σύμφωνα με την προτεινόμενη πολιτική, η πορεία που εξυπηρετείται είναι αυτή με τη μεγαλύτερη τιμή κριτηρίου. Η προτεινόμενη τιμή κριτηρίου για κάθε υπομηχανή s μιας συγκεκριμένης μηχανής πολλών παραγώγων m με $s \in O(m)$ δίνεται από

$$J_s = \lambda_1^- f(x_1^-) + \lambda_2^- f(x_2^-) + \dots + \lambda_{N_B(s)}^- f(x_{N_B(s)}^-) + \lambda_1^+ g(x_1^+) + \lambda_2^+ g(x_2^+) + \dots + \lambda_N^+ \frac{e^2}{1+e^2} \quad (2)$$

όπου x_i^- , $i = 1, 2, \dots, N_B(s)$ είναι τα επίπεδα των προηγούμενων buffers της υπομηχανής s και x_i^+ , $i = 1, 2, \dots, N$ είναι τα επίπεδα των buffers που ακολουθούν την ίδια πορεία,

καθώς το N δηλώνει τον αριθμό των υπομηχανών που ακολουθούν την υπομηχανή s κατά μήκος της πορείας της περιλαμβάνοντας τον buffer εξόδου. Το επίπεδο του τελευταίου δηλώνεται με e . Οι παράμετροι λ_i^- και λ_i^+ είναι όροι βαρών που πρέπει να καθοριστούν. Η εξάρτηση κάθε όρου από το s έχει παραληφθεί για χάρη απλότητας.



Σχήμα 3.5. Διακριτοποίηση συνεχούς εισόδου ελέγχου

Στον παραπάνω ορισμό, η $f()$ είναι θετική μονotonικά αυξανόμενη μη-γραμμική συνάρτηση, με $f(0) = 0$ και $f(c) = 1$, όπου c φέρει την χωρητικότητα του αντίστοιχου buffer. Προφανώς αυτή η συνάρτηση εξάγει τη μεγαλύτερη τιμή για την περίπτωση μεγάλης συσσώρευσης αεροσκαφών στον τροφοδοτούμενο buffer. Όμοια, η $g()$ είναι ένα καθρέφτισμα της $f()$, με $g(0) = 1$ και $g(c) = 0$. Αυτή η συνάρτηση εξάγει τη μέγιστη τιμή αν οι buffers που ακολουθούν είναι σχεδόν άδεια. Με αυτές τις συνθήκες όπως ο τροφοδοτούμενος buffer είναι σχεδόν άδειος και / ή οι buffers που ακολουθούν είναι γύρω από την μέγιστη χωρητικότητάς τους, οδηγούμαστε σε μικρό J_s , το οποίο με τη σειρά του δείχνει ότι η αντίστοιχη πορεία δεν θα εξυπηρετηθεί. Οι συναρτήσεις $f()$ και $g()$ μπορούν να προσεγγιστούν από μετατοπισμένες σιγμοειδής συναρτήσεις, που

είναι $f(y) = \frac{1}{1 + e^{-\mu_1(y+\nu_1)}}$ και $g(y) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-\mu_2(y+\nu_2)}}$, όπου οι σταθερές μ_i και ν_i είναι

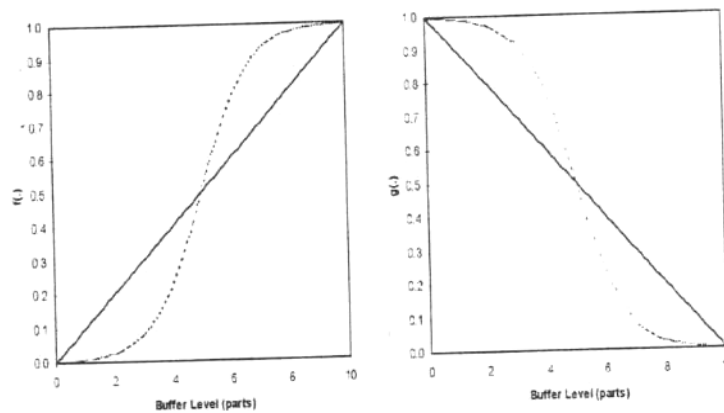
επιλεγμένες έτσι ώστε $f(c/2) = g(c/2) = 0.5$.

Το κριτήριο J_s δίνει μία μέτρηση της αναγκαιότητας της τρέχουσας πορείας για προτεραιότητα που πρέπει να δοθεί. Τα βάρη λ_i^- και λ_i^+ μπορούν να επιλεγθούν να είναι ίσα με τη μονάδα, συνεπώς επιτρέπονται όλες οι ημιτελής απογραφές να λαμβάνονται εξ' ίσου υπόψη. Μία σειρά από μειωμένα βάρη, οδηγεί σε ένα κριτήριο με τοπική εμβέλεια, λαμβάνοντας υπόψη τους buffers σε μία μικρή περιοχή κοντά στην υπομηχανή s .

Επιπλέον, ένας εναλλακτικός ορισμός του J_s μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας $f(y)\frac{y}{c}$,

$g(y) = 1 - \frac{y}{c}$ παίρνοντας $\lambda_N = 0$ και λ_i^- , λ_i^+ ίσα με το συνολικό WIP κόστος όταν ο

αντίστοιχος buffer έχει φτάσει τη χωρητικότητά του. Σε αυτή την περίπτωση, δίνοντας προτεραιότητα στην πορεία που κατέχει την μεγαλύτερη τιμή J_s προκαλεί τη μείωση του WIP κόστους της πιο επιβαρυνμένης πορείας.



Σχήμα 3.6. Εναλλακτικοί ορισμοί των $f()$ και $g()$

Για ανακεφαλαίωση ακολουθεί ο αλγόριθμος διακριτής απόφασης διεκπεραίωσης στην περίπτωση των πολλών παραγώγων.

Αλγόριθμος 2 (Discrete Dispatching Decision-Multi Part Case).

Είσοδος $u \in \mathfrak{R}^B$, $x \in \mathfrak{R}^B$, $e_c \in \mathfrak{R}^B$

αν η μηχανή δεν είναι FMS τότε

εκτέλεσε τον Αλγόριθμο 1

αλλιώς

για όλες τις μηχανές που συγκρούονται

υπολόγισε το J_s από την (2)

επέλεξε την υπομηχανή με το μεγαλύτερο J_s

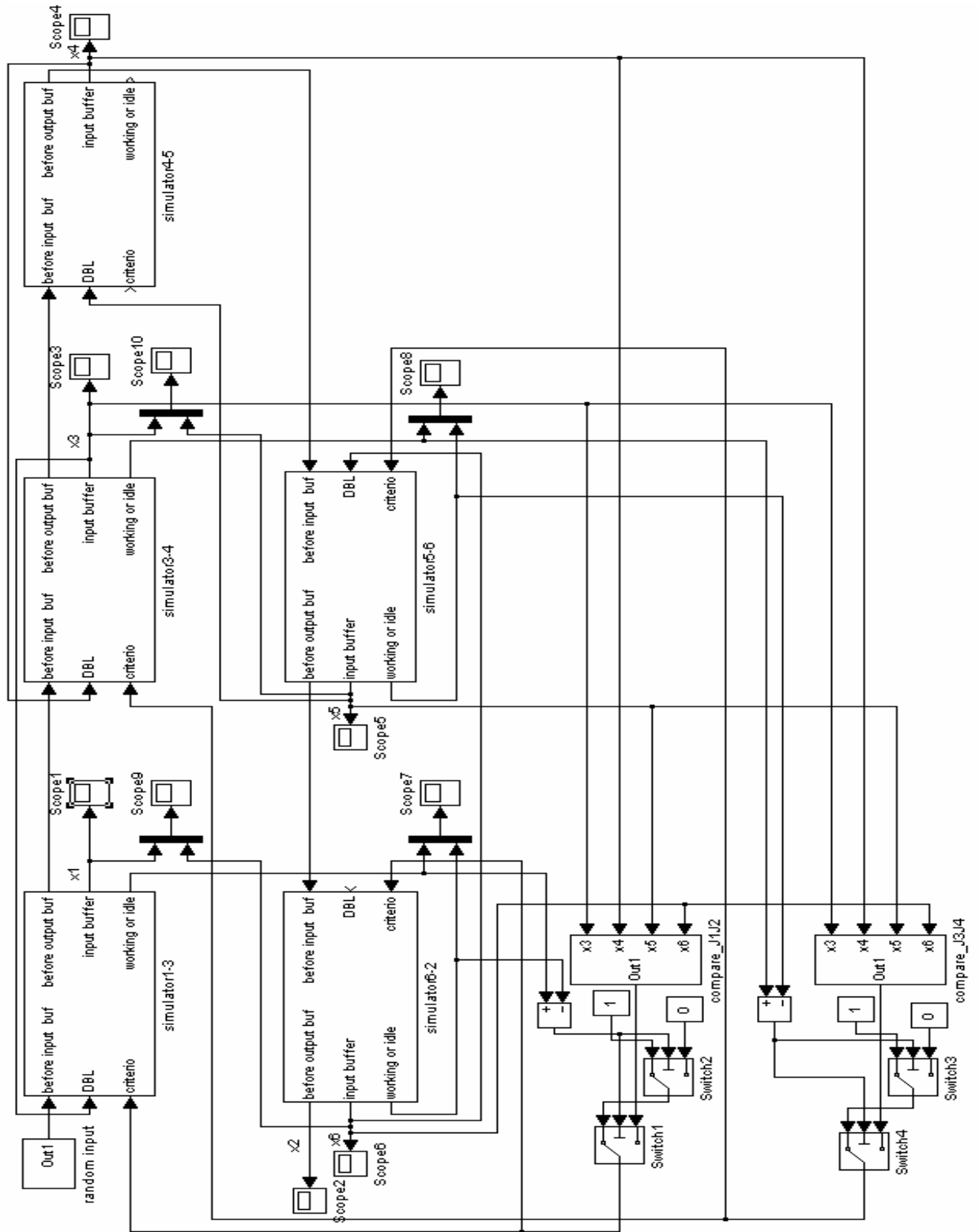
εκτέλεσε τα βήματα 1,2 του Αλγόριθμου 1

όταν ολοκληρωθεί το χρονικό διάστημα

επανάλαβε

3.7 Περιγραφή Μοντέλου Simulink.

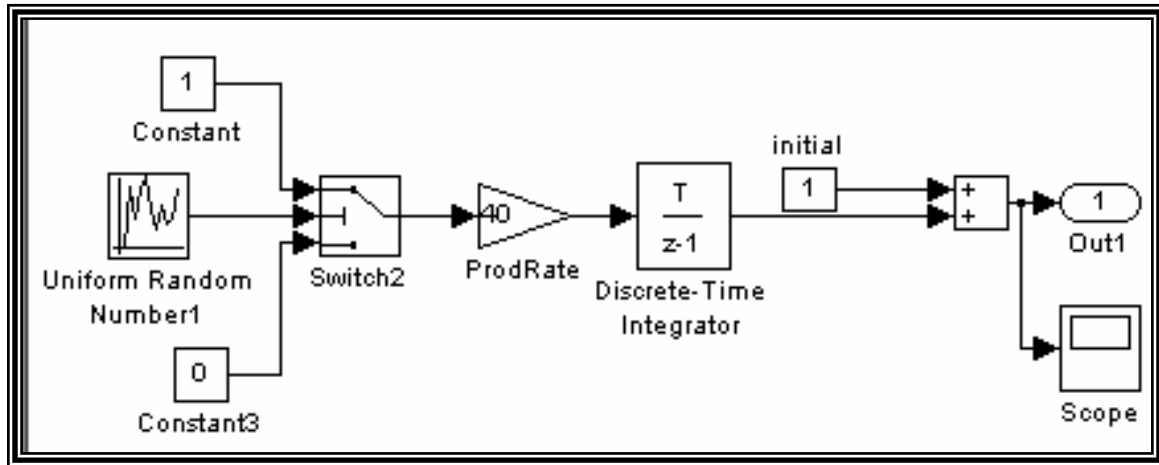
Στο μοντέλο που υλοποιήθηκε στο εργαλείο του Matlab το Simulink προσομοιώνουμε τις λειτουργίες του απλού αερολιμένα που αναφέραμε παραπάνω (βλ. σχήμα 3.2). Ο προσομοιωτής αποτελείται από πολλά επίπεδα στα οποία προγραμματίζονται όλες οι λειτουργίες, οι περιορισμοί και τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αερολιμένα. Αποτελείται από ένα subsystem που ονομάζεται 'random input' όπου η έξοδος του παρέχει τυχαίες αφίξεις των αεροσκαφών στον αεροδιάδρομο προσγείωσης του αερολιμένα. Ακόμα περιέχει 5 subsystems με τα ονόματα 'simulator 1-3', 'simulator 3-4', 'simulator 4-5', 'simulator 5-6', 'simulator 6-2'. Πιο συγκεκριμένα, το subsystem με το όνομα 'simulator 1-3' προσομοιώνει την λειτουργία της submachine 1 (αεροδιάδρομος προσγείωσης) και του buffer 1. Το subsystem με το όνομα 'simulator 3-4' προσομοιώνει την λειτουργία της submachine 3 (τροχοδρόμος εισαγωγής) και του buffer 3. Το subsystem με το όνομα 'simulator 4-5' προσομοιώνει την λειτουργία των machines 5 και 6 (hubs) και του buffer 4. Το subsystem με το όνομα 'simulator 5-6' προσομοιώνει την λειτουργία της submachine 4 (τροχοδρόμος εξαγωγής) και του buffer 5. Το subsystem με το όνομα 'simulator 6-2' προσομοιώνει την λειτουργία της submachine 2 (αεροδιάδρομος απογείωσης) και των buffer 6 και 2 (buffer εξόδου). Τέλος, υπάρχουν 2 subsystems με τα ονόματα 'compare_J1J2' και 'compare_J3J4' όπου εκτελείται το κριτήριο από τον αλγόριθμο 2 και δίδεται προτεραιότητα με βάση την τιμή J που υπολογίζεται από τον τύπο (2) σε περίπτωση σύγκρουσης των submachines 1 ή 2 και των submachines 3 ή 4 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.7. Απεικόνιση Μοντέλου σε Simulink

‘random input’

Εδώ περιέχεται το block uniform random number το οποίο αποτελεί τη γεννήτρια που δίνει στην έξοδο ομοιόμορφα κατανομημένο τυχαίο σήμα που επαναλαμβάνεται για μία δεδομένη τιμή του σπόρου (seed). Ακολουθεί ένα switch όπου υπάρχει το κατώφλι (threshold) με το οποίο καθορίζουμε τη μέση τιμή αφίξεων ανά χρονική μονάδα από τη γεννήτρια παραγωγής αεροσκαφών με τη μέθοδο της γεωμετρικής προόδου. Κατόπιν ολοκληρώνουμε αυτό το σήμα με ένα ολοκληρωτή διακριτού χρόνου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο forward Euler για να εξάγεται το σήμα προσθετικά στη διάρκεια του χρόνου.



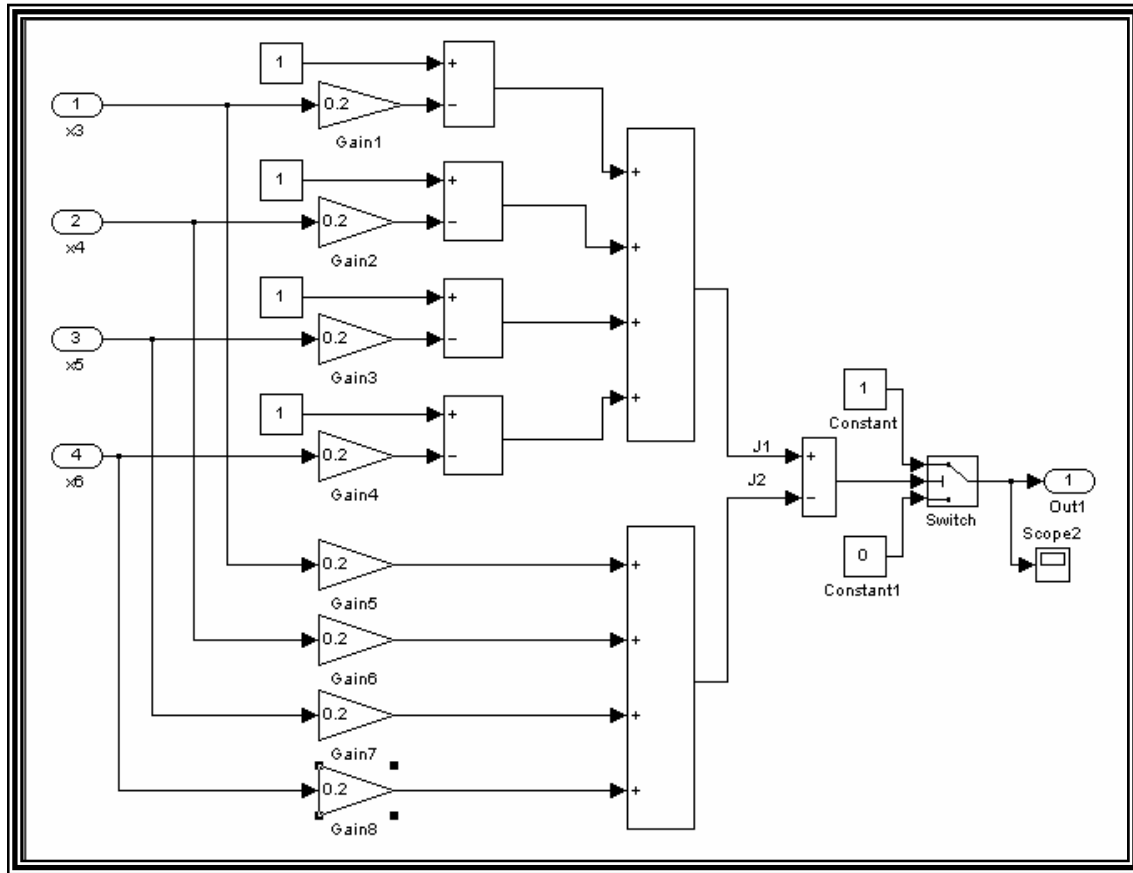
Σχήμα 3.8. Απεικόνιση του subsystem ‘random input’

‘compare_J1J2’

Στο subsystem αυτό εκτελείται η σύγκριση των δύο τιμών J1 και J2 για τις δύο submachines 1 και 2 αντίστοιχα για να δοθεί προτεραιότητα σε αυτήν την submachine που έχει την μεγαλύτερη τιμή J. Παίρνει ως εισόδους τις τρέχουσες τιμές των buffers 3,4,5 και 6 ενώ θεωρούμε τους buffers 1 και 2 αδιάφορους για το σύστημα μας με άπειρη χωρητικότητα καθώς αποτελούν τους buffers εισόδου και εξόδου του αερολιμένα. Στην έξοδο δίνει την τιμή 1 αν $J1 \geq J2$ και την τιμή 0 αν $J1 < J2$ (η ισότητα δίδεται υπέρ της submachine 1 δηλαδή υπέρ του αεροσκάφους που προσγειώνεται στον αεροδιάδρομο έναντι αυτού που προσπαθεί να εξαχθεί αυτού προς απογείωση) και οδηγείται στις εισόδους των subsystems ‘simulator 1-3’ και ‘simulator 6-2’ με το όνομα ‘criterio’. Ο υπολογισμός των τιμών J1 και J2 γίνεται από τον τύπο 3.2 όπου τους όρους των βαρών λ_i τους θεωρούμε ίσους με τη μονάδα (καθώς μία σειρά από μειωμένα βάρη οδηγεί σε κριτήριο με τοπική εμβέλεια λαμβάνοντας κυρίως υπ’ όψιν τους buffers κοντά στην αντίστοιχη submachine) και κάνουμε χρήση ενός εναλλακτικού ορισμού κατά τον οποίο θέτουμε $f(y) = \frac{y}{c}$, $g(y) = 1 - \frac{y}{c}$ όπου c η χωρητικότητα του αντίστοιχου buffer. Έτσι οι δύο τύποι που προκύπτουν είναι:

$$J_1 = \lambda_1^+ g(x_3) + \lambda_2^+ g(x_4) + \lambda_3^+ g(x_5) + \lambda_4^+ g(x_6) = g(x_3) + g(x_4) + g(x_5) + g(x_6) \text{ και}$$

$$J_2 = \lambda_1^- f(x_3) + \lambda_2^- f(x_4) + \lambda_3^- f(x_5) + \lambda_4^- f(x_6) = f(x_3) + f(x_4) + f(x_5) + f(x_6)$$



Σχήμα 3.9. Απεικόνιση του subsystem ‘compare_J1J2’

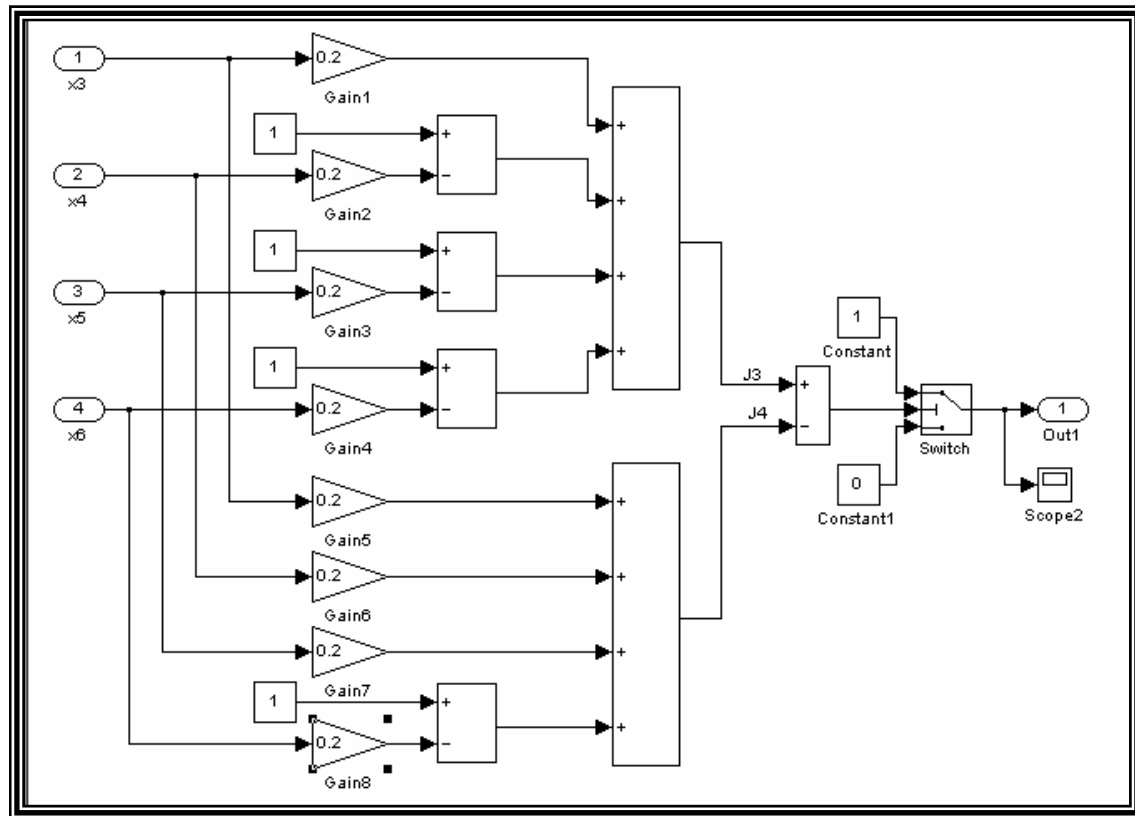
‘compare_J3J4’

Στο subsystem αυτό εκτελείται η σύγκριση των δύο τιμών $J3$ και $J4$ για τις δύο submachines 3 και 4 αντίστοιχα για να δοθεί προτεραιότητα σε αυτήν την submachine που έχει την μεγαλύτερη τιμή J . Παίρνει ως εισόδους τις τρέχουσες τιμές των buffers 3,4,5 και 6 ενώ θεωρούμε τους buffers 1 και 2 αδιάφορους για το σύστημα μας με άπειρη χωρητικότητα καθώς αποτελούν τους buffers εισόδου και εξόδου του αερολιμένα. Στην έξοδο δίνει την τιμή 1 αν $J3 \geq J4$ και την τιμή 0 αν $J3 < J4$ (η ισότητα δίδεται υπέρ της submachine 3 δηλαδή υπέρ του αεροσκάφους που εισάγεται στον τροχοδρόμο έναντι αυτού που προσπαθεί να εξαχθεί αυτού) και οδηγείται στις εισόδους των subsystems ‘simulator 3-4’ και ‘simulator 5-6’ με το όνομα ‘criterio’. Ο υπολογισμός των τιμών $J3$ και $J4$ γίνεται από τον τύπο 3.2 όπου τους όρους των βαρών λ_i τους θεωρούμε ίσους με τη μονάδα (καθώς μία σειρά από μειωμένα βάρη οδηγεί σε κριτήριο με τοπική εμβέλεια λαμβάνοντας κυρίως υπ’ όψιν τους buffers κοντά στην αντίστοιχη submachine) και κάνουμε χρήση ενός εναλλακτικού ορισμού κατά τον οποίο θέτουμε

$f(y) = \frac{y}{c}$, $g(y) = 1 - \frac{y}{c}$ όπου c η χωρητικότητα του αντίστοιχου buffer. Έτσι οι δύο τύποι ποδ προκύπτουν είναι:

$$J_3 = \lambda_1^- f(x_3) + \lambda_1^+ g(x_4) + \lambda_2^+ g(x_5) + \lambda_3^+ g(x_6) = f(x_3) + g(x_4) + g(x_5) + g(x_6) \text{ και}$$

$$J_4 = \lambda_1^- f(x_3) + \lambda_2^- f(x_4) + \lambda_3^- f(x_5) + \lambda_1^+ g(x_6) = f(x_3) + f(x_4) + f(x_5) + g(x_6)$$

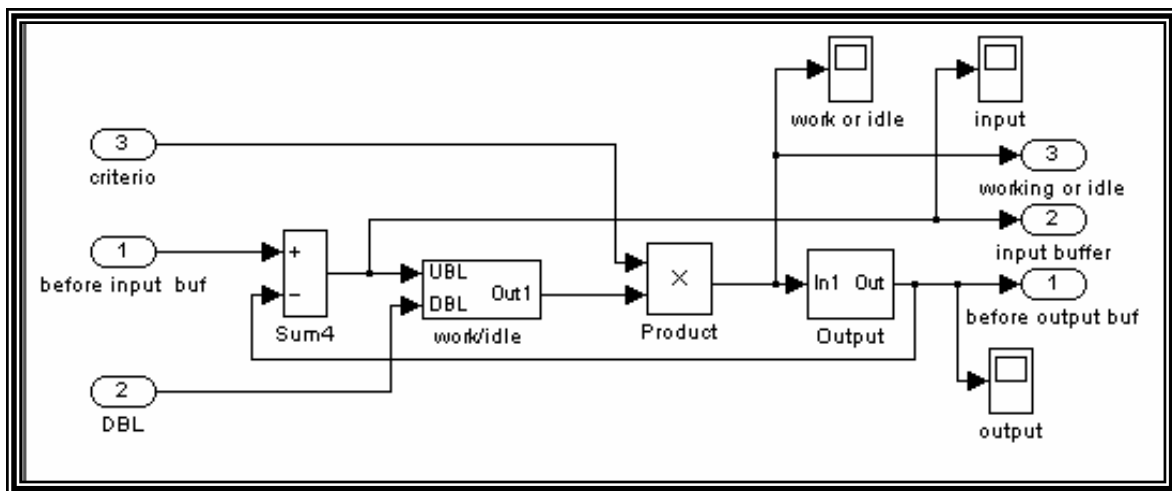


Σχήμα 3.10. Απεικόνιση του subsystem ‘compare_J3J4’

‘simulator 1-3’

Αυτό το subsystem προσομοιώνει την λειτουργία του σημείου εκείνου που περιέχει τον buffer 1, την submachine 1 και την κατάσταση πριν τον buffer 3 (είσοδος του buffer 3). Έχει τρεις εισόδους: ‘before input buf’, ‘DBL’ και ‘criterio’ και τρεις εξόδους: ‘before output buf’, ‘input buffer’ και ‘working or idle’. Η είσοδος ‘before input buf’ λαμβάνει το σήμα που παράγεται από το subsystem ‘random input’ και αποτελεί την κατάσταση πριν τον buffer 1 δηλαδή τα αεροσκάφη που βρίσκονται στον αέρα και κάνουν αιτήσεις για προσγείωση. Η είσοδος ‘DBL’ λαμβάνει το σήμα από την κατάσταση του buffer 3 και έχει δύο δυνατότητες: α) αν η κατάσταση του buffer 3 έχει πιάσει την χωρητικότητα του τότε δίδεται εντολή να μην δουλέψει η submachine 1 καθώς δεν μπορεί να προωθήσει τα αεροσκάφη στον γεμάτο buffer που ακολουθεί και β) αν ο buffer 3 δεν

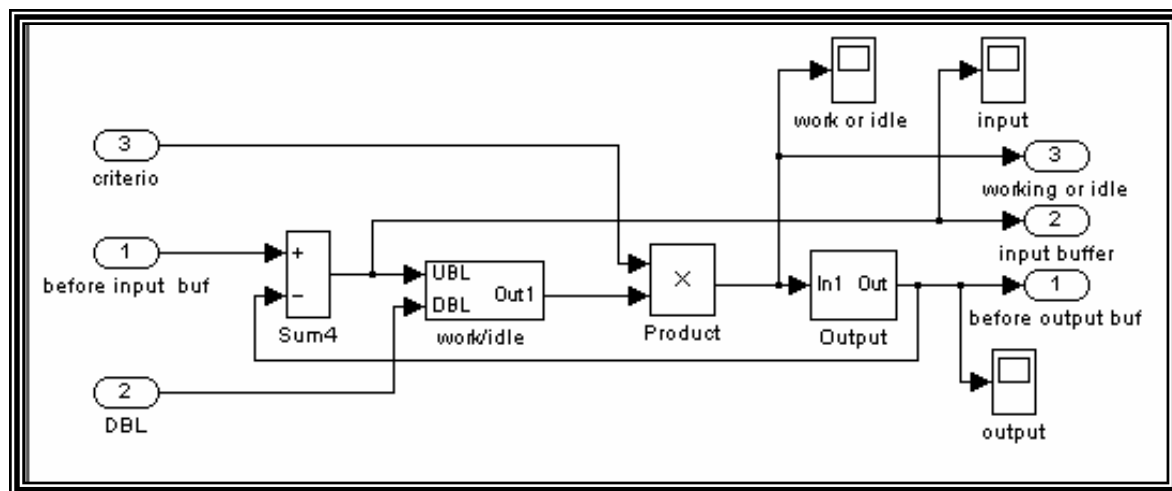
έχει πιάσει την χωρητικότητα που του ορίσαμε τότε η submachine 1 παίρνει εντολή να δουλέψει. Η είσοδος 'criterio' λαμβάνει ως είσοδο το αποτέλεσμα της σύγκρισης των τιμών J1 και J2 από το subsystem 'compare_J1J2' για την περίπτωση σύγκρουσης των submachines 1 και 2 και τότε έχει δύο δυνατότητες: a) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μονάδα δηλαδή ότι η submachine 1 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 2 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να δουλέψει και b) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μηδέν δηλαδή ότι η submachine 2 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 1 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να μην δουλέψει. Η έξοδος 'before output buf' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση πριν από τον buffer 3 δηλαδή τα αεροσκάφη που έχουν δρομολογηθεί από την submachine 1 στην submachine 3 (από τον αεροδιάδρομο στον τροχοδρόμο κατά την διαδικασία προσγείωσης). Η έξοδος 'input buffer' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση του buffer 1 καθώς αποτελείται από το σήμα που λαμβάνει από την είσοδο 'before input buf' αφαιρούμενο από το σήμα που λαμβάνεται από την έξοδο 'before output buf', το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η κατάσταση κάθε buffer αποτελείται από τα αεροσκάφη που εισάγονται σε αυτόν από την έξοδο της προηγούμενης submachine χωρίς αυτά που δρομολογούνται από τις διαδικασίες της τρέχουσας submachine. Η έξοδος 'working or idle' παράγει το σήμα που καταδεικνύει τους χρόνους που η submachine 1 λειτουργεί και δρομολογεί αεροσκάφη στην έξοδο της και τους χρόνους που αυτή παραμένει ανενεργή είτε λόγω σύγκρουσης με την submachine 2 που έχει πάρει προτεραιότητα είτε λόγω του γεγονότος ότι ο buffer 3 που ακολουθεί έχει γεμίσει σε χωρητικότητα είτε ακόμα λόγω έλλειψης αφίξεων αεροσκαφών προς προσγείωση.



Σχήμα 3.11. Απεικόνιση του subsystem 'simulator 1-3'

‘simulator 3-4’

Αυτό το subsystem προσομοιώνει την λειτουργία του σημείου εκείνου που περιέχει τον buffer 3, την submachine 3 και την κατάσταση πριν τον buffer 4 (είσοδος του buffer 4). Έχει τρεις εισόδους: ‘before input buf’, ‘DBL’ και ‘criterio’ και τρεις εξόδους: ‘before output buf’, ‘input buffer’ και ‘working or idle’. Η είσοδος ‘before input buf’ λαμβάνει το σήμα που παράγεται από την έξοδο ‘before output buf’ του subsystem ‘simulator 1-3’ (προηγούμενη submachine) και αποτελεί την κατάσταση πριν τον buffer 3 δηλαδή τα αεροσκάφη που βρίσκονται στον αεροδιάδρομο και ζητούν να εισέλθουν στον τροχοδρόμο (taxi-in). Η είσοδος ‘DBL’ λαμβάνει το σήμα από την κατάσταση του buffer 4 και έχει δύο δυνατότητες: a) αν η κατάσταση του buffer 4 έχει πιάσει την χωρητικότητα του τότε δίδεται εντολή να μην δουλέψει η submachine 3 καθώς δεν μπορεί να προωθήσει τα αεροσκάφη στον γεμάτο buffer που ακολουθεί και b) αν ο buffer 4 δεν έχει πιάσει την χωρητικότητα που του ορίσαμε τότε η submachine 3 παίρνει εντολή να δουλέψει. Η είσοδος ‘criterio’ λαμβάνει ως είσοδο το αποτέλεσμα της σύγκρισης των τιμών J3 και J4 από το subsystem ‘compare_J3J4’ για την περίπτωση σύγκρουσης των submachines 3 και 4 και τότε έχει δύο δυνατότητες: a) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μονάδα δηλαδή ότι η submachine 3 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 4 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να δουλέψει και b) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μηδέν δηλαδή ότι η submachine 4 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 3 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να μην δουλέψει. Η έξοδος ‘before output buf’ παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση πριν από τον buffer 4 δηλαδή τα αεροσκάφη που έχουν δρομολογηθεί από την submachine 3 στις machines 5 ή 6 (από τον τροχοδρόμο στα hubs κατά την διαδικασία προσγείωσης και ανεφοδιασμού).

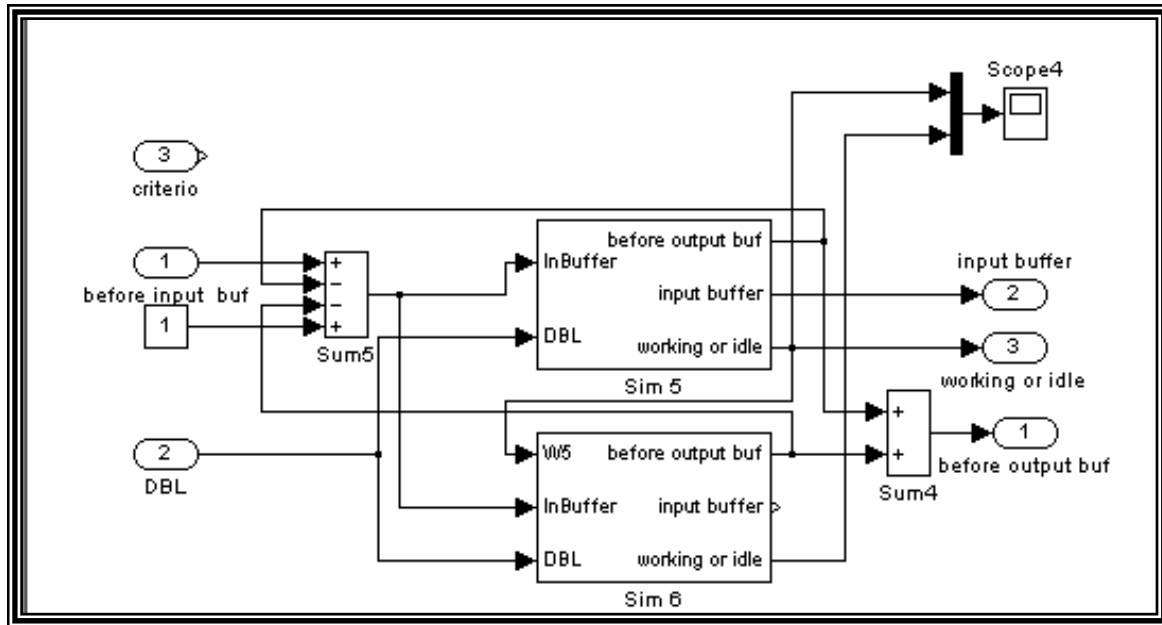


Σχήμα 3.12. Απεικόνιση του subsystem ‘simulator 3-4’

Η έξοδος 'input buffer' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση του buffer 3 καθώς αποτελείται από το σήμα που λαμβάνει από την είσοδο 'before input buf' αφαιρούμενο από το σήμα που λαμβάνεται από την έξοδο 'before output buf', το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η κατάσταση κάθε buffer αποτελείται από τα αεροσκάφη που εισάγονται σε αυτόν από την έξοδο της προηγούμενης submachine χωρίς αυτά που δρομολογούνται από τις διαδικασίες της τρέχουσας submachine. Η έξοδος 'working or idle' παράγει το σήμα που καταδεικνύει τους χρόνους που η submachine 3 λειτουργεί και δρομολογεί αεροσκάφη στην έξοδο της και τους χρόνους που αυτή παραμένει ανενεργή είτε λόγω σύγκρουσης με την submachine 4 που έχει πάρει προτεραιότητα είτε λόγω του γεγονότος ότι ο buffer 4 που ακολουθεί έχει γεμίσει σε χωρητικότητα είτε ακόμα λόγω έλλειψης αεροσκαφών από τον αεροδιάδρομο.

'simulator 4-5'

Αυτό το subsystem προσομοιώνει την λειτουργία του σημείου εκείνου που περιέχει τον buffer 4, τις machines 5 και 6 και την κατάσταση πριν τον buffer 5 (είσοδος του buffer 5). Έχει τρεις εισόδους: 'before input buf', 'DBL' και 'criterio' και τρεις εξόδους: 'before output buf', 'input buffer' και 'working or idle'. Η είσοδος 'before input buf' λαμβάνει το σήμα που παράγεται από την έξοδο 'before output buf' του subsystem 'simulator 3-4' (προηγούμενη submachine) και αποτελεί την κατάσταση πριν τον buffer 4 δηλαδή τα αεροσκάφη που βρίσκονται στον τροχοδρόμο και ζητούν να εισέλθουν στα hubs για ανεφοδιασμό. Η είσοδος 'DBL' λαμβάνει το σήμα από την κατάσταση του buffer 5 και έχει δύο δυνατότητες: a) αν η κατάσταση του buffer 5 έχει πιάσει την χωρητικότητα του τότε δίδεται εντολή να μην δουλέψουν οι machines 5 και 6 καθώς δεν μπορεί να προωθήσει τα αεροσκάφη στον γεμάτο buffer που ακολουθεί και b) αν ο buffer 5 δεν έχει πιάσει την χωρητικότητα που του ορίσαμε τότε οι machines 5 και 6 παίρνουν εντολή να δουλέψουν. Η είσοδος 'criterio' δεν λαμβάνει κάποιο σήμα γιατί δεν υπάρχει σύγκρουση μεταξύ των hubs καθώς μπορούν και δουλεύουν παράλληλα. Δηλαδή ο buffer 4 ελέγχει αρχικά a) αν δεν δουλεύει η machine 5 τότε προωθεί το αεροσκάφος που περιμένει να εισαχθεί στο πρώτο hub b) αν δουλεύει η machine 5 και δεν δουλεύει η machine 6 τότε προωθεί το αεροσκάφος στο δεύτερο hub και c) αν δουλεύουν και οι δύο machines 5 και 6 τότε δεν προωθεί το επόμενο αεροσκάφος σε κανένα από τα δύο hubs. Η έξοδος 'before output buf' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση πριν από τον buffer 5 δηλαδή προσθετικά τα αεροσκάφη που έχουν δρομολογηθεί από τις machines 5 και 6 (από τα hubs στον τροχοδρόμο κατά την διαδικασία απογείωσης). Η έξοδος 'input buffer' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση του buffer 4 καθώς αποτελείται από το σήμα που λαμβάνει από την είσοδο 'before input buf' αφαιρούμενο από το σήμα που λαμβάνεται από την έξοδο 'before output buf', το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η κατάσταση κάθε buffer αποτελείται από τα αεροσκάφη που εισάγονται σε αυτόν από την έξοδο της προηγούμενης submachine χωρίς αυτά που δρομολογούνται από τις διαδικασίες της τρέχουσας submachine. Η έξοδος 'working or idle' παράγει το σήμα που καταδεικνύει τους χρόνους που η machines 5 και 6 λειτουργούν και δρομολογούν αεροσκάφη στην έξοδο τους και τους χρόνους που αυτές παραμένουν ανενεργές είτε λόγω του γεγονότος ότι ο buffer 5 που ακολουθεί έχει γεμίσει σε χωρητικότητα είτε ακόμα λόγω έλλειψης αφίξεων αεροσκαφών από τον τροχοδρόμο.

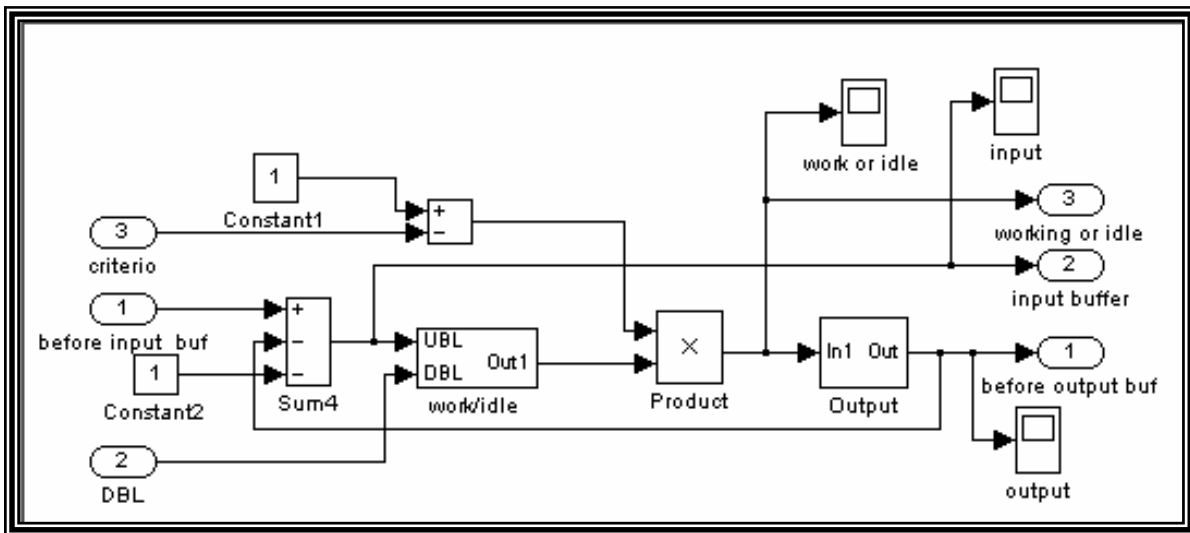


Σχήμα 3.13. Απεικόνιση του subsystem ‘simulator 4-5’

‘simulator 5-6’

Αυτό το subsystem προσομοιώνει την λειτουργία του σημείου εκείνου που περιέχει τον buffer 5, την submachine 4 και την κατάσταση πριν τον buffer 6 (είσοδος του buffer 6). Έχει τρεις εισόδους: ‘before input buf’, ‘DBL’ και ‘criterio’ και τρεις εξόδους: ‘before output buf’, ‘input buffer’ και ‘working or idle’. Η είσοδος ‘before input buf’ λαμβάνει το σήμα που παράγεται από την έξοδο ‘before output buf’ του subsystem ‘simulator 4-5’ (προηγούμενο subsystem) και αποτελεί την κατάσταση πριν τον buffer 5 δηλαδή τα αεροσκάφη που βρίσκονται στα hubs και ζητούν να εισέλθουν στον τροχοδρόμο για απογείωση. Η είσοδος ‘DBL’ λαμβάνει το σήμα από την κατάσταση του buffer 6 και έχει δύο δυνατότητες: α) αν η κατάσταση του buffer 6 έχει πιάσει την χωρητικότητα του τότε δίδεται εντολή να μην δουλέψει η submachine 4 καθώς δεν μπορεί να προωθήσει τα αεροσκάφη στον γεμάτο buffer που ακολουθεί και β) αν ο buffer 6 δεν έχει πιάσει την χωρητικότητα που του ορίσαμε τότε η submachine 4 παίρνει εντολή να δουλέψει. Η είσοδος ‘criterio’ λαμβάνει ως είσοδο το αποτέλεσμα της σύγκρισης των τιμών J3 και J4 από το subsystem ‘compare_J3J4’ για την περίπτωση σύγκρουσης των submachines 3 και 4 και τότε έχει δύο δυνατότητες: α) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μονάδα δηλαδή ότι η submachine 3 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 4 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να μην δουλέψει και β) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μηδέν δηλαδή ότι η submachine 4 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 3 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να δουλέψει. Η έξοδος ‘before output buf’ παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση πριν από τον buffer 6 δηλαδή τα αεροσκάφη που έχουν δρομολογηθεί από την submachine 4 στην submachine 2 (από τον τροχοδρόμο στον αεροδιάδρομο κατά την διαδικασία απογείωσης). Η έξοδος ‘input buffer’ παρέχει το

σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση του buffer 5 καθώς αποτελείται από το σήμα που λαμβάνει από την είσοδο ‘before input buf’ αφαιρούμενο από το σήμα που λαμβάνεται από την έξοδο ‘before output buf’, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η κατάσταση κάθε buffer αποτελείται από τα αεροσκάφη που εισάγονται σε αυτόν από την έξοδο της προηγούμενης submachine χωρίς αυτά που δρομολογούνται από τις διαδικασίες της τρέχουσας submachine. Η έξοδος ‘working or idle’ παράγει το σήμα που καταδεικνύει τους χρόνους που η submachine 4 λειτουργεί και δρομολογεί αεροσκάφη στην έξοδο της και τους χρόνους που αυτή παραμένει ανενεργή είτε λόγω σύγκρουσης με την submachine 2 που έχει πάρει προτεραιότητα είτε λόγω του γεγονότος ότι ο buffer 6 που ακολουθεί έχει γεμίσει σε χωρητικότητα είτε ακόμα λόγω έλλειψης αεροσκαφών από τα hubs.

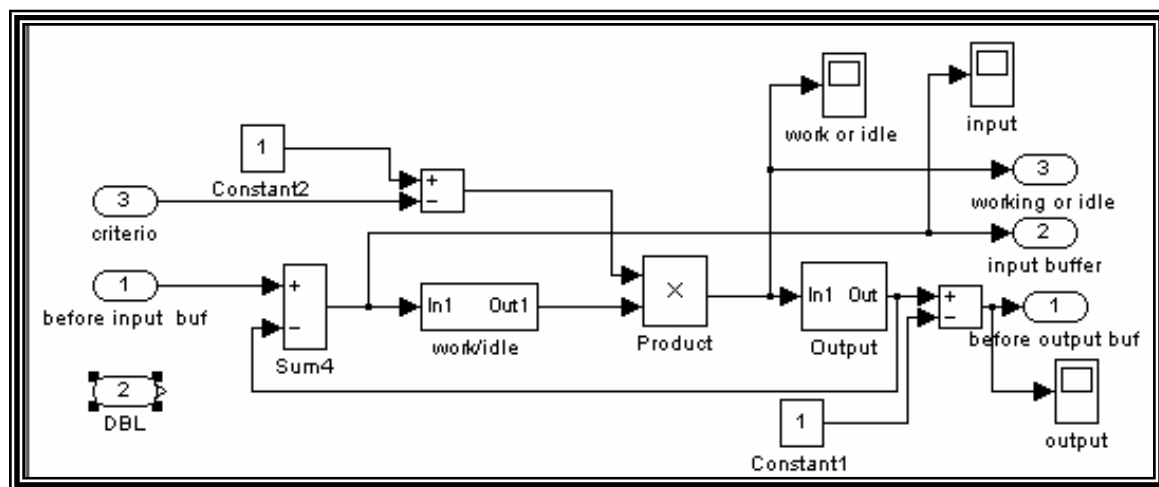


Σχήμα 3.14. Απεικόνιση του subsystem ‘simulator 5-6’

‘simulator 6-2’

Αυτό το subsystem προσομοιώνει την λειτουργία του σημείου εκείνου που περιέχει τον buffer 6, την submachine 2 και την κατάσταση του buffer 2 (buffer εξόδου). Έχει τρεις εισόδους: ‘before input buf’, ‘DBL’ και ‘criterio’ και τρεις εξόδους: ‘before output buf’, ‘input buffer’ και ‘working or idle’. Η είσοδος ‘before input buf’ λαμβάνει το σήμα που παράγεται από την έξοδο ‘before output buf’ του subsystem ‘simulator 5-6’ (προηγούμενο subsystem) και αποτελεί την κατάσταση πριν τον buffer 6 δηλαδή τα αεροσκάφη που βρίσκονται στον τροχοδρόμο και κάνουν αιτήσεις για να εισέλθουν στον αεροδιάδρομο προς απογείωση (taxi-out). Η είσοδος ‘DBL’ δεν λαμβάνει κανένα σήμα από την κατάσταση του buffer 2 καθώς αυτός αποτελεί το buffer εξόδου και δεν έχει περιορισμό στην χωρητικότητα του εφόσον αποτελεί τον αέρα. Η είσοδος ‘criterio’ λαμβάνει ως είσοδο το αποτέλεσμα της σύγκρισης των τιμών J1 και J2 από το subsystem ‘compare_J1J2’ για την περίπτωση σύγκρουσης των submachines 1 και 2 και τότε έχει δύο δυνατότητες: α) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μονάδα δηλαδή ότι η submachine 1 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 2 τότε δίνεται εντολή σε αυτή

να μην δουλέψει και b) αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης δώσει μηδέν δηλαδή ότι η submachine 2 έχει προτεραιότητα έναντι της submachine 1 τότε δίνεται εντολή σε αυτή να δουλέψει. Η έξοδος 'before output buf' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση του buffer 2 δηλαδή τα αεροσκάφη που έχουν ολοκληρώσει τη διαδικασία και έχουν απογειωθεί. Η έξοδος 'input buffer' παρέχει το σήμα εκείνο που δείχνει την κατάσταση του buffer 6 καθώς αποτελείται από το σήμα που λαμβάνει από την είσοδο 'before input buf' αφαιρούμενο από το σήμα που λαμβάνεται από την έξοδο 'before output buf', το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η κατάσταση κάθε buffer αποτελείται από τα αεροσκάφη που εισάγονται σε αυτόν από την έξοδο της προηγούμενης submachine χωρίς αυτά που δρομολογούνται από τις διαδικασίες της τρέχουσας submachine. Η έξοδος 'working or idle' παράγει το σήμα που καταδεικνύει τους χρόνους που η submachine 2 λειτουργεί και δρομολογεί αεροσκάφη στην έξοδο της και τους χρόνους που αυτή παραμένει ανενεργή είτε λόγω σύγκρουσης με την submachine 1 που έχει πάρει προτεραιότητα είτε λόγω έλλειψης αεροσκαφών από τον τροχοδρόμο προς απογείωση.



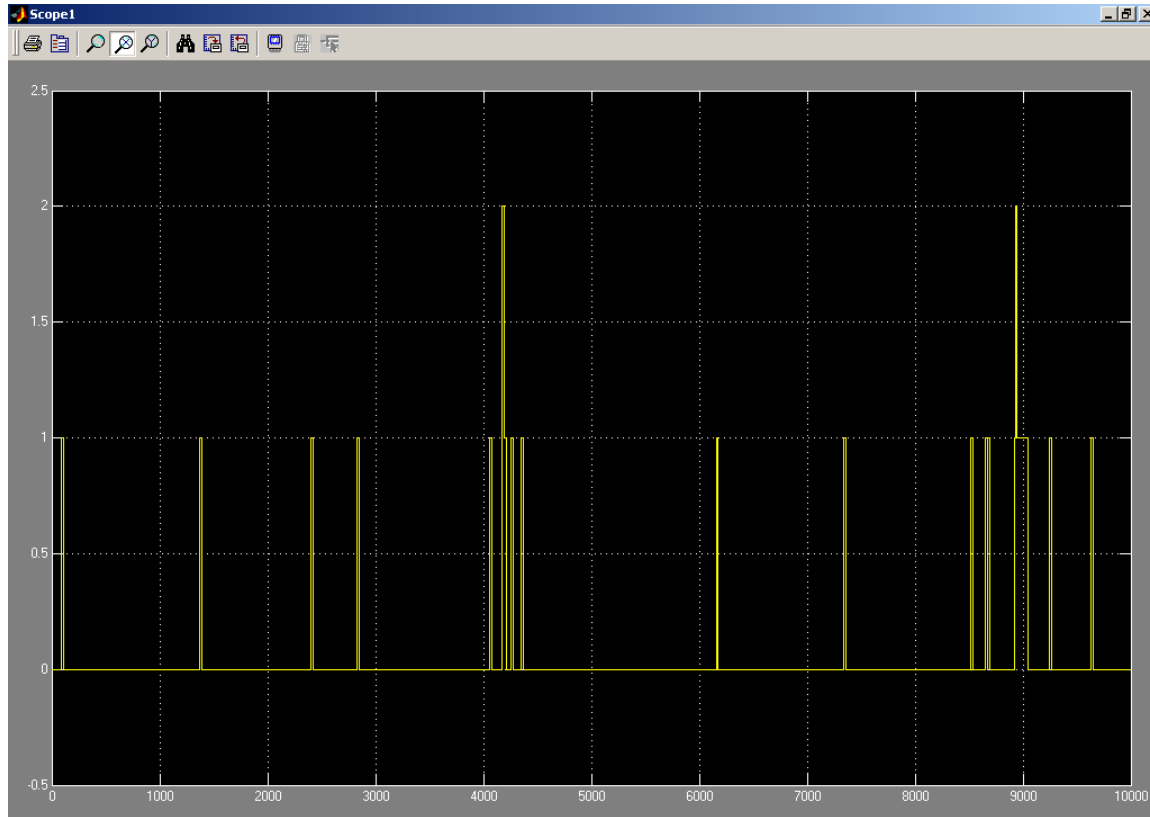
Σχήμα 3.15. Απεικόνιση του subsystem 'simulator 6-2'

Κεφάλαιο 4^ο

Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

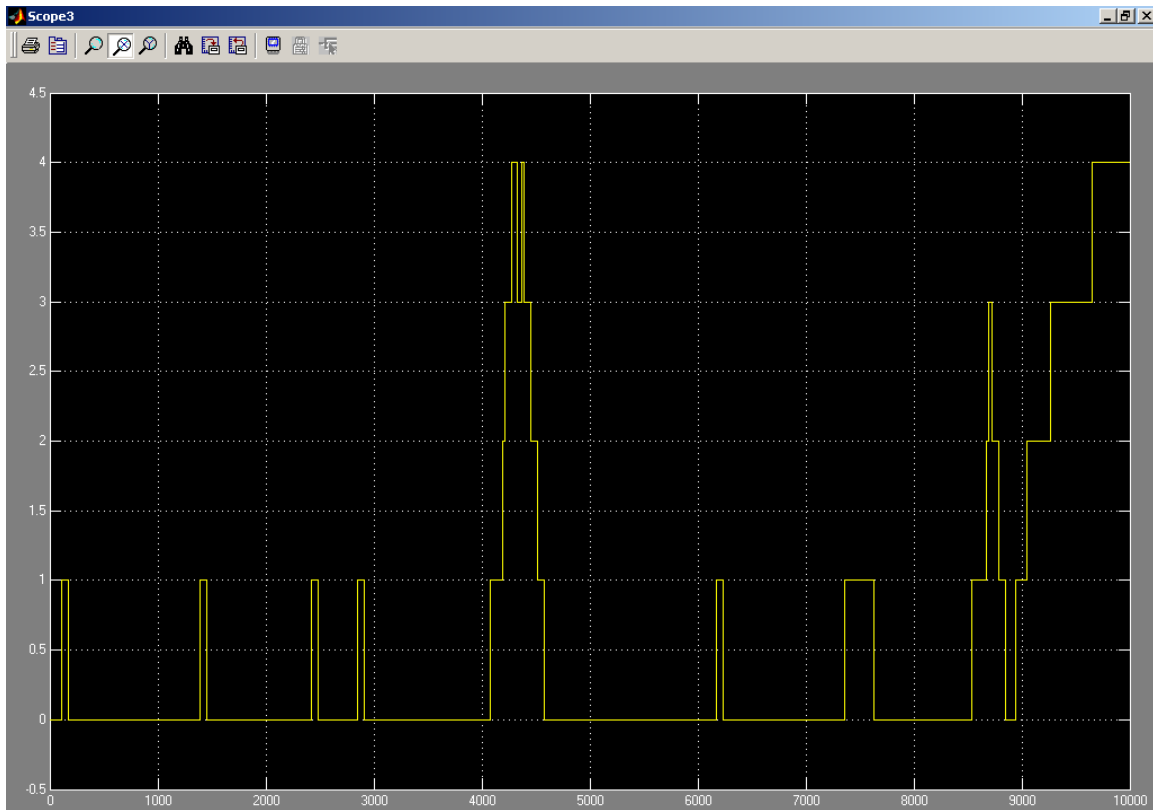
Προσομοιώνουμε τις λειτουργίες του αερολιμένα για χρόνο 10000 sec και με μέγιστη χωρητικότητα και των τεσσάρων buffers (εξαιρούνται οι buffer εισόδου και εξόδου) να φτάνει τα 5 αεροσκάφη με τα εξής χαρακτηριστικά: Ο μέσος ρυθμός άφιξης αεροσκαφών είναι 5 αεροσκάφη / ώρα και οι χρόνοι λειτουργίας για τις 4 submachines και τις 2 machines που αποτελούν τη δομή του αερολιμένα είναι 20 sec για τον αεροδιάδρομο προσγείωσης και απογείωσης, 62,5 sec \approx 60 sec για τον τροχοδρόμο προσγείωσης και απογείωσης και 20,83 min \approx 20 min για τα δύο hubs.

Παρατηρούμε από το διάγραμμα του buffer 1 (buffer εισόδου) ότι εφόσον ο ρυθμός αφίξεων είναι 5/3600 είναι ορθό το γεγονός ότι 18 αεροσκάφη καταφθάνουν στη διάρκεια των 10000 sec προσομοίωσης. Είναι προφανές επίσης ότι η διάρκεια επεξεργασίας του κάθε αεροσκάφους στον αεροδιάδρομο προσγείωσης είναι 20 sec όπως ακριβώς ορίστηκε από τις παραμέτρους προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι τις χρονικές στιγμές 4170 sec και 8920 sec έχουμε μία άφιξη και πριν αυτή εξυπηρετηθεί έχουμε μία νέα με αποτέλεσμα εκείνη τη χρονική στιγμή ο buffer 1 να πιάσει σε στάθμη χωρητικότητας τα δύο αεροσκάφη μέχρι να τα εξυπηρετήσει και να μηδενιστεί η στάθμη του.



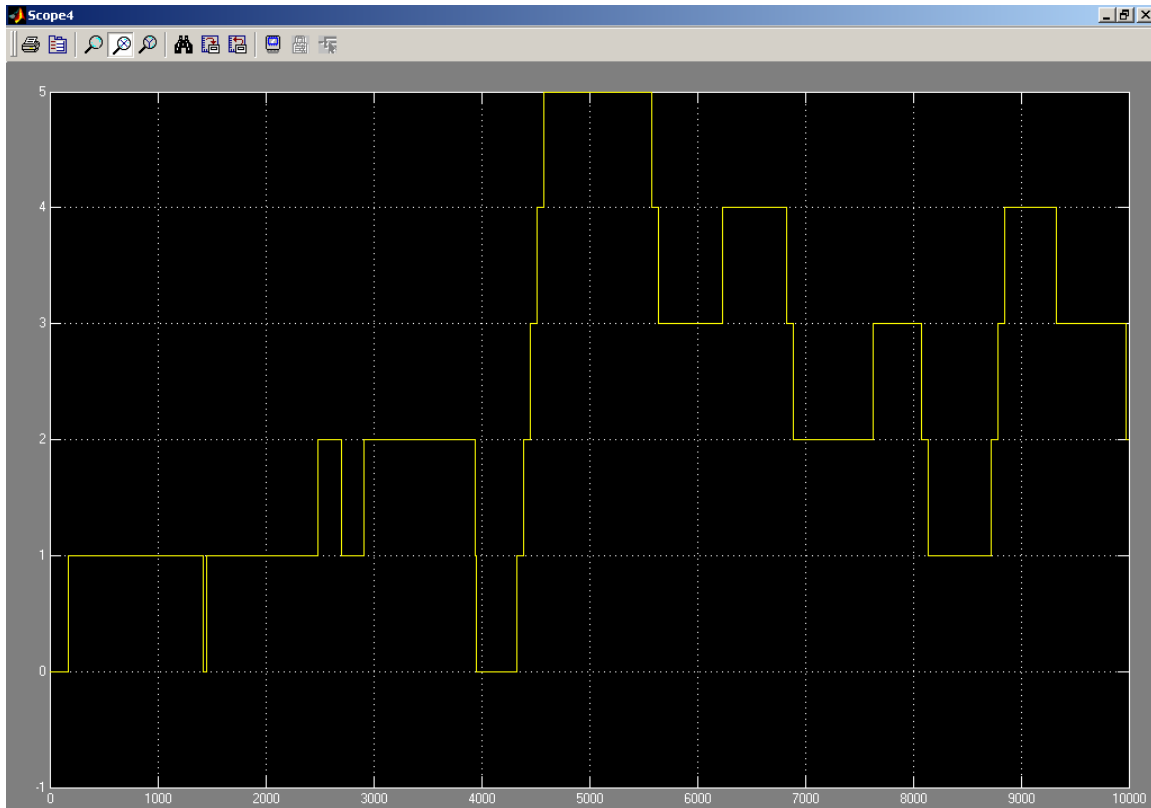
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα κατάστασης του buffer 1

Από το διάγραμμα του buffer 3 παρατηρούμε ότι από τα 18 αεροσκάφη που προωθήθηκαν από τον προηγούμενο buffer πρόλαβαν να εξυπηρετηθούν 14 από τον τροχοδρόμο προσγείωσης και ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι πράγματι ≈ 60 sec. Επίσης τη χρονική στιγμή 4080 sec καταφθάνει ένα αεροσκάφος και πριν εξυπηρετηθεί καταφθάνουν άλλα τρία σε μικρό χρονικό διάστημα και με τη στάθμη του buffer να φτάνει τα τέσσερα και ενώ λίγο αργότερα εξυπηρετείται το πρώτο αεροπλάνο και η στάθμη πέφτει στιγμιαία στα τρία καταφθάνει άλλο ένα χωρίς να προλάβουν να εξυπηρετηθούν άμεσα τα προηγούμενα με τη στάθμη να φτάνει και πάλι τα τέσσερα αεροσκάφη στο buffer μέχρι τη χρονική στιγμή 4580 sec όπου μηδενίζεται και πάλι η στάθμη. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και τη χρονική στιγμή 8690 sec που καταφθάνουν τρία αεροσκάφη πριν προλάβει να εξυπηρετηθεί κάποιο από αυτά και αργότερα μηδενίζεται. Προς το τέλος του χρόνου προσομοίωσης παρατηρούνται 4 αεροσκάφη στον buffer 3 που παρέμειναν σε αυτόν και σε άθροισμα με τα 14 αεροσκάφη που δρομολογήθηκαν δίνουν τον συνολικό αριθμό αφίξεων από τον προηγούμενο buffer.



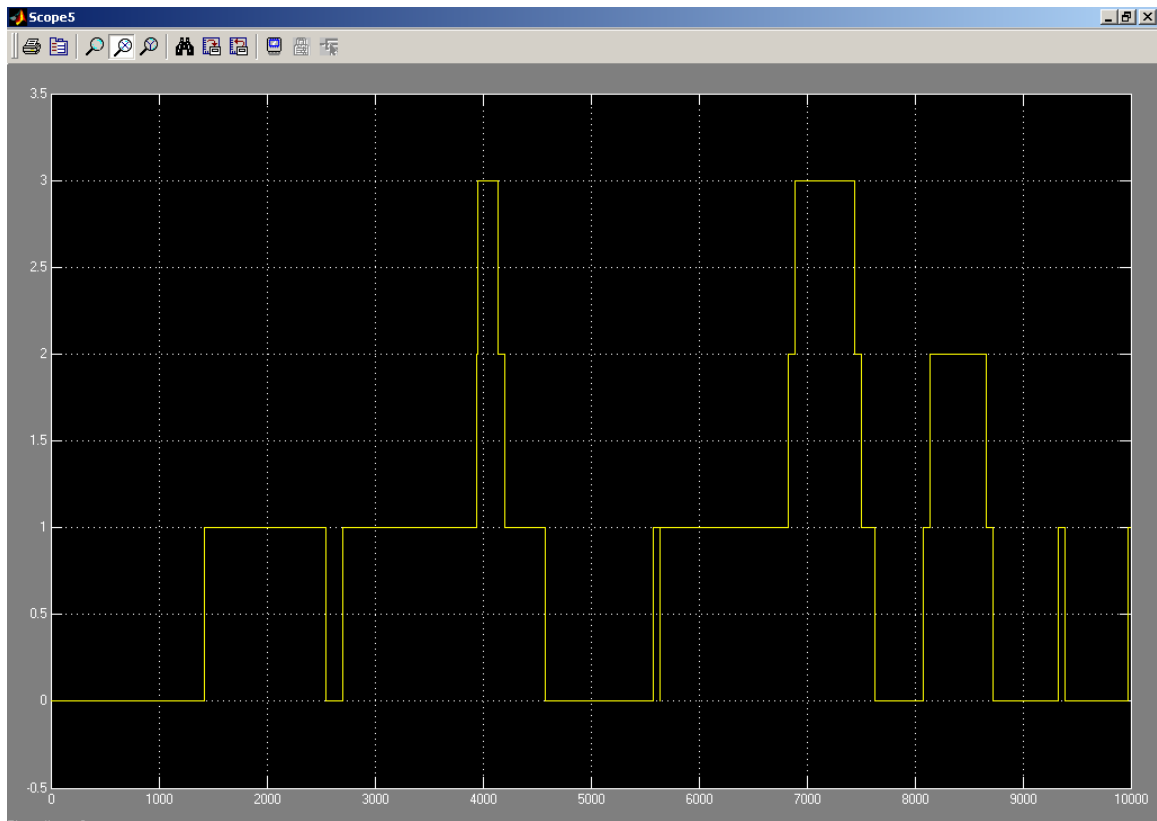
Σχήμα 4.2 Διάγραμμα κατάστασης του buffer 3

Από το διάγραμμα του buffer 4 παρατηρούμε ότι τα 11 πρώτα αεροσκάφη που φτάσανε στα hubs εξυπηρετήθηκαν μέχρι τη χρονική στιγμή 9320 sec, ενώ άλλα 3 αεροσκάφη που καταφθάνουν δεν προλαβαίνουν να εξυπηρετηθούν στα πλαίσια του χρόνου προσομοίωσης καθώς το κάθε hub ορίστηκε να έχει χρόνο λειτουργίας 1250 sec για την εξυπηρέτηση κάθε αεροσκάφους. Για τη στάθμη χωρητικότητας του συγκεκριμένου buffer παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή 4580 sec αυτή φτάνει τα 5 αεροσκάφη αλλά αμέσως μετά μειώνεται καθώς εξυπηρετούνται ταυτόχρονα και από τα δύο hubs. Ο buffer 4 για να προωθήσει τα αεροσκάφη που διαθέτει ελέγχει αν είναι idle το πρώτο hub και τότε προωθεί αν όχι ελέγχει και το δεύτερο hub και αν είναι idle προωθεί το αεροσκάφος εκεί και τέλος αν είναι σε κατάσταση working και τα δύο hubs τότε περιμένει. Στο τέλος του χρόνου προσομοίωσης η στάθμη του buffer 4 είναι τρία αεροσκάφη που μαζί με τα 11 που δρομολογήθηκαν δίνουν τον αριθμό αυτών που είχανε εξυπηρετηθεί από τον προηγούμενο buffer και καταφθάνανε σε αυτόν.

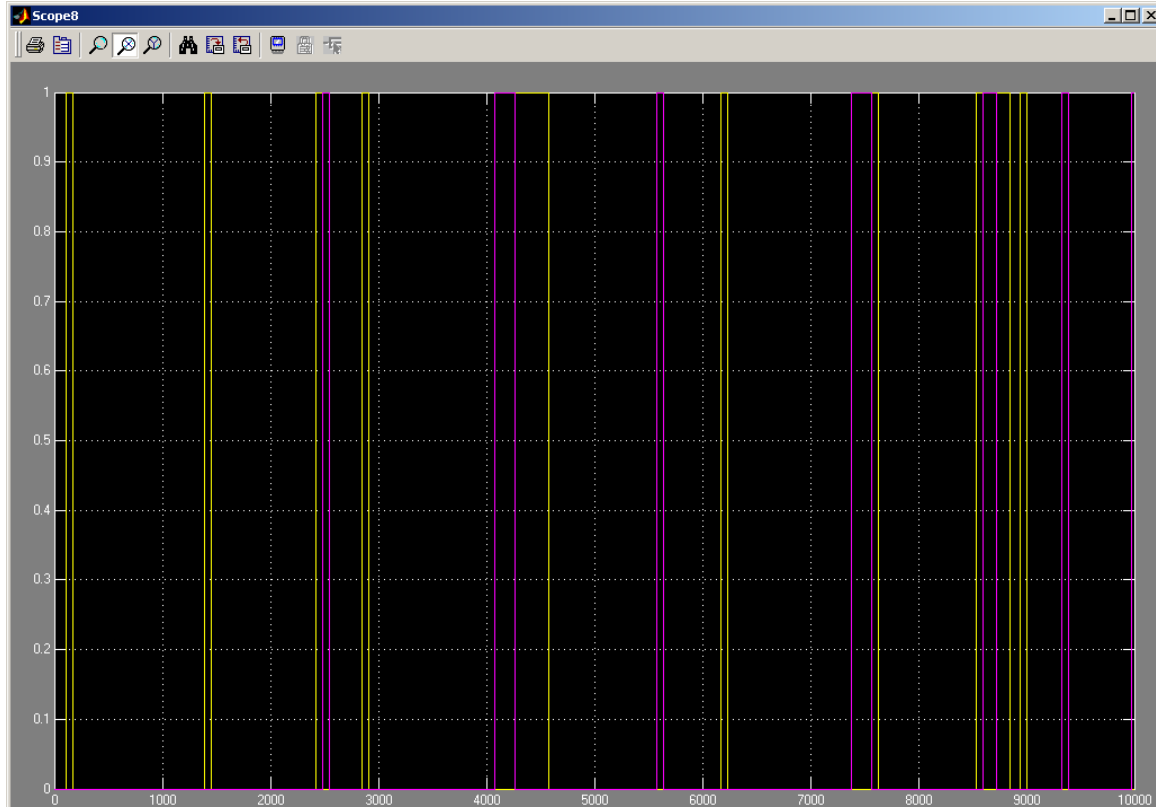


Σχήμα 4.3 Διάγραμμα κατάστασης του buffer 4

Από το διάγραμμα του buffer 5 παρατηρούμε ότι και τα 11 αεροσκάφη που προωθήθηκαν από τα δύο hubs εξυπηρετήθηκαν από τον τροχοδρόμο απογείωσης. Ο χρόνος εξυπηρέτησης για αυτή την submachine ορίστηκε να είναι ≈ 60 sec αλλά αυτό δεν εφαρμόζεται πάντα όπως είναι αντιληπτό καθώς η συγκεκριμένη submachine 4 δεν εξυπηρετεί άμεσα αλλά ελέγχει πρωτίστως αν δουλεύει η submachine 3 για να αποφευχθεί η σύγκρουση. Για το λόγο αυτό κάποιες περιπτώσεις αεροσκαφών δεν εξυπηρετούνται στα πλαίσια του προκαθορισμένου χρόνου αλλά παραμένουν στο buffer έως ότου η submachine 3 παραμείνει αδρανής και έτσι παρουσιάζονται μερικά αεροσκάφη όπως το πρώτο με τη σειρά που καταφθάνουν να καθυστερεί ενώ το τέταρτο στη σειρά να εξυπηρετείται αμέσως μεταξύ των χρόνων 5580 sec και 5640 sec. Για να γίνει πιο αντιληπτό αυτό παραθέτουμε εκτός από το διάγραμμα κατάστασης του buffer 5 και το διάγραμμα που δείχνει τις καταστάσεις working or idle και για τις δύο submachines 3 και 4 μαζί.

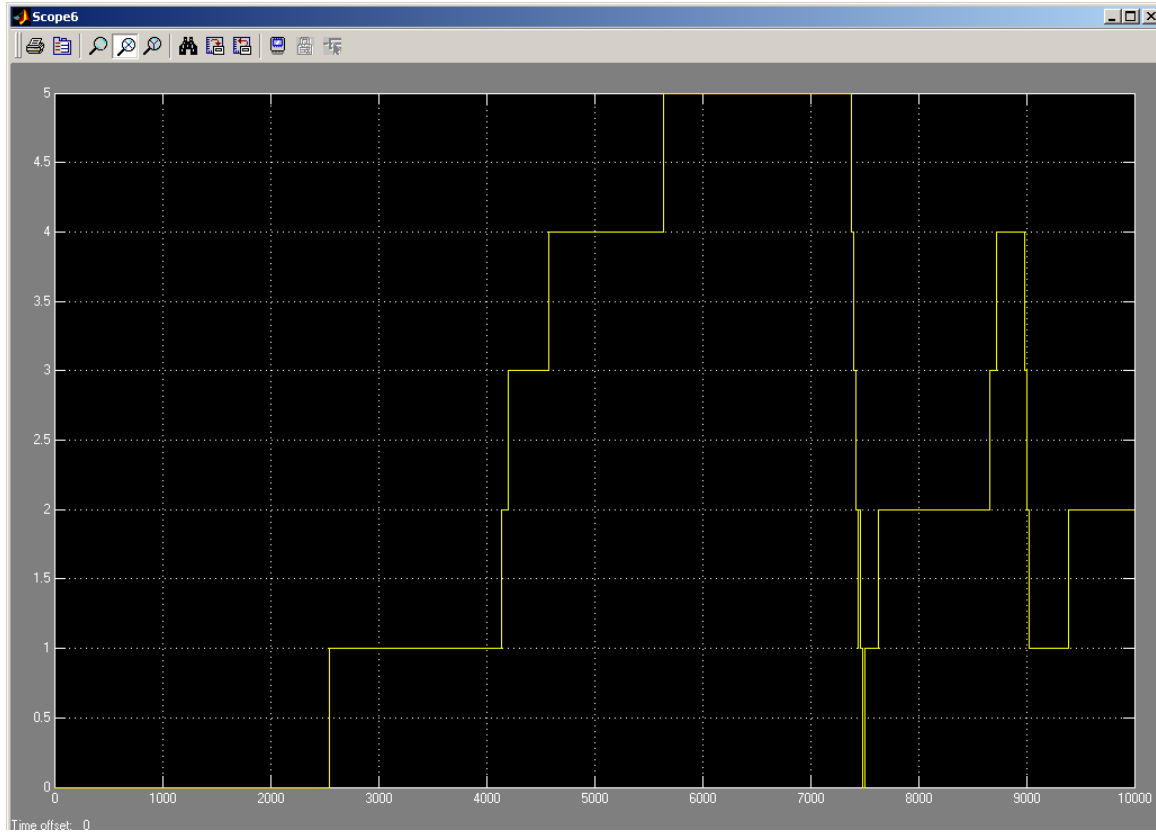


Σχήμα 4.4 Διάγραμμα κατάστασης του buffer 5

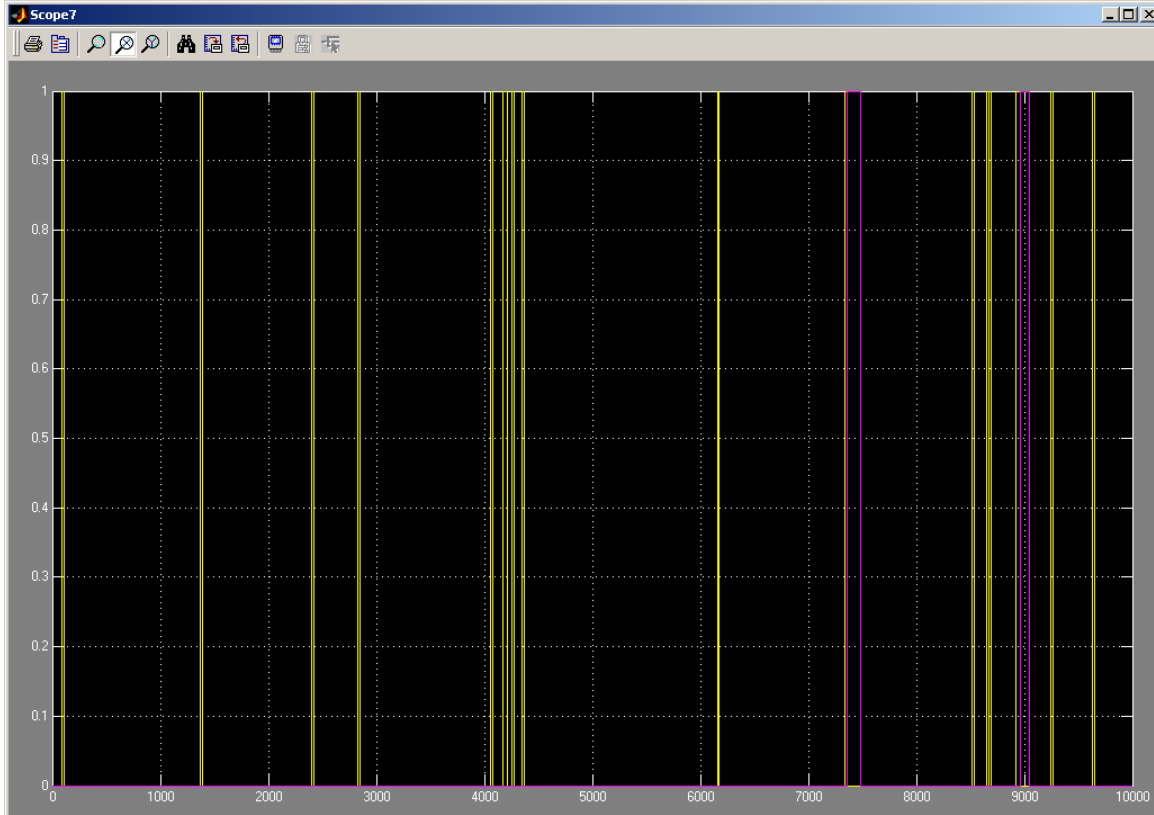


Σχήμα 4.5 Διάγραμμα καταστάσεων των submachines 3 και 4 (working or idle)

Από το διάγραμμα του buffer 6 παρατηρούμε ότι τα 11 αεροσκάφη που προωθήθηκαν από τον τροχοδρόμο απογείωσης φτάσανε στον επόμενο buffer με τη διαφορά ότι δεν εξυπηρετήθηκαν όλα σε αντίθεση με την προηγούμενη submachine. Στην submachine 2 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι εξυπηρετούνται 9 από αυτά ενώ δύο παραμένουν στον buffer όπως δείχνει και η στάθμη του στο τέλος. Η εξυπηρέτηση τους ξεκινάει σχετικά αργά τη χρονική στιγμή 7380 sec και αυτό παρατηρείται λόγω της πορείας που πρέπει να ακολουθήσουν μέχρι να φτάσουν στον buffer 6 και ακόμα για τον ίδιο λόγο με παραπάνω. Δηλαδή, λόγω σύγκρουσης με την submachine 1 η submachine 2 ελέγχει πρώτα αν δουλεύει η άλλη submachine πριν να αρχίσει να λειτουργεί αυτή για το λόγο αυτό ο χρόνος εξυπηρέτησης δεν φαίνεται πάντα να είναι 20 sec όπως ακριβώς ορίστηκε από τις παραμέτρους προσομοίωσης. Για να γίνει πιο αντιληπτό αυτό παραθέτουμε εκτός από το διάγραμμα κατάστασης του buffer 6 και το διάγραμμα που δείχνει τις καταστάσεις working or idle και για τις δύο submachines 1 και 2 μαζί.

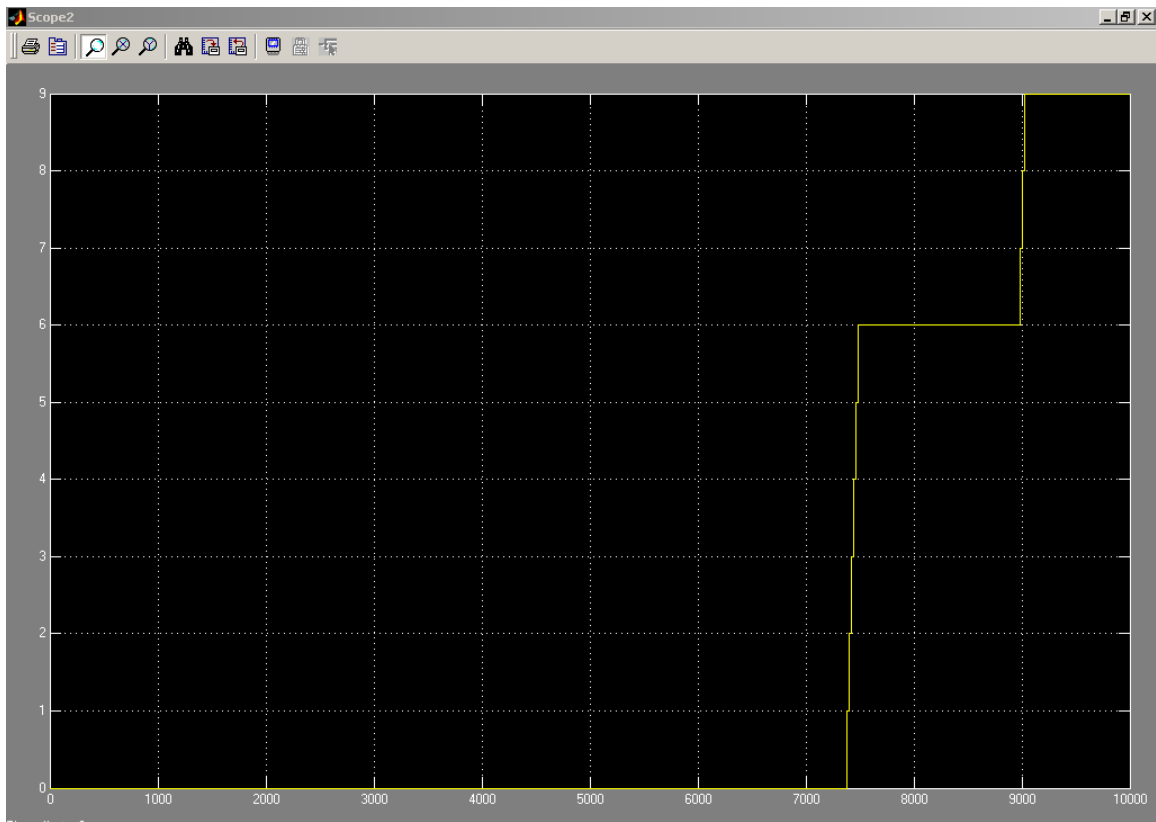


Σχήμα 4.6 Διάγραμμα κατάστασης του buffer 6



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα καταστάσεων των submachines 1 και 2 (working or idle)

Τέλος από το διάγραμμα του buffer 2 (buffer εξόδου) παρατηρούμε ότι το πρώτο αεροσκάφος που φτάνει σε αυτόν είναι τη χρονική στιγμή 7380 sec και συνολικά προωθούνται 9 αεροσκάφη προς απογείωση εντός των χρονικών ορίων της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα κατάστασης του buffer 2

Κεφάλαιο 5^ο

Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

5.1.Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία εφαρμόστηκε και παρουσιάστηκε μία αξιολογημένη μεθοδολογία χρονοπρογραμματισμού που προτάθηκε. Όπως φαίνονται από τα αποτελέσματα προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της συμφόρησης κυκλοφορίας στην επιφάνεια και οι περατώσεις διαμορφώσεων μπορούν να μοντελοποιηθούν ικανοποιητικά με τη σχετικά απλή δυναμική αναμονής. Εντούτοις, οι καθυστερήσεις αναχώρησης που μπορούν να εξηγηθούν απλώς από αυτά τα αποτελέσματα είναι επίσης προφανείς. Παρατηρούμε ότι στις 3 περιπτώσεις διαφορετικών ρυθμών αφίξεων που εξετάσαμε (βλ. Παράρτημα) λαμβάνουμε τα εξής συμπεράσματα:

Αν ο μέσος ρυθμός τυχαίων αφίξεων είναι 4 αεροσκάφη / ώρα τότε σε ένα συνολικό χρόνο προσομοίωσης 10000 sec (περίπου 3 ώρες) καταφθάνουν στον αερολιμένα 13 αεροσκάφη και στο τέλος του χρόνου έχουν εξυπηρετηθεί 5 αεροσκάφη προς απογείωση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έχει δοθεί προτεραιότητα κυρίως στην προσγείωση και όχι τόσο στην απογείωση βάση του κριτηρίου που εφαρμόζεται σε περίπτωση σύγκρουσης.

Αν ο μέσος ρυθμός τυχαίων αφίξεων είναι 5 αεροσκάφη / ώρα τότε σε ένα συνολικό χρόνο προσομοίωσης 10000 sec (περίπου 3 ώρες) καταφθάνουν στον αερολιμένα 18 αεροσκάφη και στο τέλος του χρόνου έχουν εξυπηρετηθεί 9 αεροσκάφη προς απογείωση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έχει δοθεί προτεραιότητα κυρίως στην προσγείωση και όχι τόσο στην απογείωση βάση του κριτηρίου που εφαρμόζεται σε περίπτωση σύγκρουσης. Είναι όμως αντιληπτό ότι η απόδοση του προσομοιωμένου μοντέλου βελτιώνεται καθώς εκμεταλλεύεται περισσότερους χρόνους που στην προηγούμενη περίπτωση οι machines του μοντέλου παρέμεναν idle ενώ τώρα είναι σε κατάσταση working.

Αν ο μέσος ρυθμός τυχαίων αφίξεων είναι 6 αεροσκάφη / ώρα τότε σε ένα συνολικό χρόνο προσομοίωσης 10000 sec (περίπου 3 ώρες) καταφθάνουν στον αερολιμένα 20 αεροσκάφη και στο τέλος του χρόνου έχουν εξυπηρετηθεί 11 αεροσκάφη προς απογείωση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έχει δοθεί προτεραιότητα κυρίως στην προσγείωση και όχι τόσο στην απογείωση βάση του κριτηρίου που εφαρμόζεται σε περίπτωση σύγκρουσης. Είναι όμως αντιληπτό ότι η απόδοση του προσομοιωμένου μοντέλου βελτιώνεται καθώς εκμεταλλεύεται περισσότερους χρόνους που στην προηγούμενη περίπτωση οι machines του μοντέλου παρέμεναν idle ενώ τώρα είναι σε κατάσταση working.

Έχουμε λοιπόν εξετάσει το πρόβλημα μοντελοποίησης της διαδικασίας αναχώρησης σε έναν πολυάσχολο αερολιμένα με σκοπό ελάφρυνση της συμφόρησης επιφάνειας. Η πειραματική έρευνα μας έχει επιτρέψει να προάγουμε ένα απλό, όμως εκτενώς

επικυρωμένος δυναμικό μοντέλο αναμονής της διαδικασίας αναχώρησης. Προκαταρκτικές έρευνες δείχνουν ότι ενεργές στρατηγικές ελέγχου σε αυτό το μοντέλο μπορεί να μειώσουν τη συμφόρηση στην επιφάνεια αερολιμένων. Αυτές οι στρατηγικές επιτρέπουν μείωση των άμεσων λειτουργικών δαπανών και των περιβαλλοντικών δαπανών χωρίς να αυξάνεται η συνολική καθυστέρηση σημαντικά. Η υλοποίηση τους θα ήταν συμβατή με τις τρέχουσες διαδικασίες αερολιμένων και την ανθρώπινη δομή ελέγχου. Η περαιτέρω έρευνα θα συνδυάσει τον έλεγχο αναχώρησης αεροσκαφών με τον έλεγχο αφίξεων, με την πρόθεση να βελτιώσει τη γενική αποδοτικότητα του αερολιμένα. Περαιτέρω αποδοτικότητα θα επιτευχθεί επίσης με την μείωση των αβεβαιοτήτων του μοντέλου και με την έρευνα περισσότερων εξελιγμένων νόμων ελέγχου.

Το πρόβλημα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας είναι εξαιρετικά σύνθετο και περιλαμβάνει διάφορους συνεργάτες, κάθε ένας που προσπαθεί ενδεχομένως να βελτιστοποιήσει τη σύγκρουση και περιστασιακά διφορούμενος στόχους. Ο σχεδιασμός πτήσης και η λήψη απόφασης εκτελούνται αυτήν την περίοδο σε επάρκεια, υψηλής αλληλεπίδρασης αλλά σε αποκεντρωμένα επίπεδα. Είναι επομένως ένα περίπλοκο σύστημα ελέγχου με τις διάφορες αλληλεπιδράσεις και τους διαφορετικούς βαθμούς σύζευξης μεταξύ των διαφορετικών συστατικών του. Οι καθυστερήσεις (π.χ., λόγω της κακοκαιρίας ή άλλων απροσδόκητων γεγονότων) μπορούν να προκαλέσουν ιδιαίτερα απρόβλεπτα αποτελέσματα λόγω της διαφορετικής σύζευξης μεταξύ αυτών των διαφορετικών συστατικών και λόγω των ισχυρών συνδέσεων μεταξύ των αερολιμένων και των καθοδόν τομέων του εναέριου χώρου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο προγραμματισμός των προχωρημένων πόρων, καθώς επίσης και η ρύθμιση στα απροσδόκητα γεγονότα που οδηγούν στις ανώμαλες διαδικασίες είναι μια σημαντική ανησυχία και για τις αερογραμμές.

5.2.Μελλοντική Έρευνα

Είναι γνωστό ότι ένα τέτοιο μη γραμμικό μοντέλο με άγνωστες σχεδιάσεις (άγνωστη δομή) όπως ανωτέρω μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τα στοιχεία μέτρησης μέσω των επαναλαμβανόμενων δυναμικών high-order τεχνικών με νευρωνικά δίκτυα. Επιπλέον οι προσαρμοστικοί νόμοι ελέγχου καθιερώνονται για την ανίχνευση των επιθυμητών τιμών στόχων για τους buffers, την ελαχιστοποίηση της λειτουργίας του taxiway ή άλλους δείκτες απόδοσης. Οι περισσότεροι από τους αλγορίθμους ελέγχου, βασισμένοι σε ορισμένες ήπιες υποθέσεις για τις μη γραμμικές άγνωστες σχεδιάσεις, παρέχουν αποτελέσματα αποδεικνύοντας τη σύγκλιση λάθους στο μηδέν, ή σε περίπτωση μη μοντελοποιημένης δυναμικής, το ομοιόμορφο τελικό boundedness, το boundedness όλων των κλειστών βρόχων σημάτων και επιπλέον η σύγκλιση λάθους στο μηδέν είναι εκθετικά γρήγορη, το οποίο σημαίνει ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε τους προσαρμοστικούς ελεγκτές που μπορούν να επιλύσουν τη συμφόρηση και άλλα προβλήματα στους αερολιμένες σε πραγματικό χρόνο.

Εδώ παρουσιάζεται μία σύντομη επισκόπηση των βασικών βημάτων της σχεδίασης του συστήματος ελέγχου και μία τυπική περιγραφή του επιλεγόμενου σχήματος προσαρμοστικού ελέγχου. Το θέμα ελέγχου ενός plant π.χ. μία διεργασία χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό από εισόδους u και εξόδους y όπου στην περίπτωση μας είναι κάποια υπομηχανή και οι συνεργαζόμενοι buffer εισόδου και εξόδου του και συνεπάγονται τρία στάδια:

Μοντελοποίηση: Ο επεξεργαστικός μηχανισμός του plant για τον οποίο για μία δοσμένη είσοδο $u(t)$ παράγεται μία έξοδος $y(t)$ και εκφράζεται σε όρους μαθηματικών εξισώσεων, ένα έργο πολύ σημαντικό που παράγει πολύ συχνά εξαιρετικά πολύπλοκα συστήματα.

Σχεδίαση ελεγκτή: Ένας ελεγκτής σχεδιάζεται για να προσεγγίσει τις απαιτήσεις απόδοσης που συνεπάγονται από το μοντέλο του plant και πρέπει να λάβει υπόψη τις αναπόφευκτες ασυμφωνίες μεταξύ του plant και του προσεγγιστικού μοντέλου.

Υλοποίηση: Συνήθως γίνεται σε ψηφιακές και μερικές φορές σε αναλογικές υπολογιστικές μηχανές.

Στην περίπτωση που οι παράμετροι του μοντέλου του plant είναι άγνωστες ή μεταβαλλόμενες στο χρόνο, χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι του προσαρμοστικού ελέγχου του οποίου η ουσία είναι η προσαρμογή των παραμέτρων του ελεγκτή (κέρδη) εφαρμόζοντας ανάδραση στην απόκριση εξόδου του plant που μεταφέρει πληροφορίες για της αλλαγές κατάστασης και παραμέτρων. Διαισθητικά, κάθε μοντέλο που προσπαθεί να συλλάβει τις διεργασίες που παρουσιάζονται σε ένα σύστημα, για το οποίο οι δείκτες κατάστασης είναι τα περιεχόμενα των buffers που υπάρχουν στο σύστημα, αυτό θα τείνει να γίνει πολύ πολύπλοκο εμπεριέχοντας μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων οντοτήτων που αναμειγνύονται στη διεργασία προώθησης. Έτσι, ο προσαρμοστικός έλεγχος των νευρωνικών δικτύων έχει επιλεγεί ως η προσέγγιση που θα χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση των περιεχομένων των buffer. Επίσης ο άμεσος προσαρμοστικός έλεγχος (direct adaptive control) μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με τη ποικιλία των σχεδίων που υπάρχουν σύμφωνα με τους τρόπους αλλαγής των κερδών του ελεγκτή σε απόκριση των αλλαγών στο plant και στις διαταραχές των δυναμικών.

Ένας προσαρμοστικός ελεγκτής μορφοποιείται συνδυάζοντας έναν on-line εκτιμητή παραμέτρων, ο οποίος παρέχει εκτιμήσεις των άγνωστων παραμέτρων σε κάθε στιγμή, με έναν κανόνα ελέγχου, που κινητοποιείται από περιπτώσεις γνωστών παραμέτρων. Στον άμεσο προσαρμοστικό έλεγχο, το μοντέλο του plant παραμετροποιείται με όρους των παραμέτρων του ελεγκτή που έχουν εκτιμηθεί απ' ευθείας χωρίς ενδιάμεσους υπολογισμούς που αναμειγνύουν τις εκτιμήσεις παραμέτρων του plant. Αυτή η προσέγγιση είναι επίσης γνωστή ως συνεπαγόμενος προσαρμοστικός έλεγχος (implicit adaptive control) εφόσον βασίζεται στις εκτιμήσεις του συνεπαγόμενου plant μοντέλου.

5.2.1. Σύγκριση Προσαρμοστικού και Βέλτιστου Ελέγχου

Επιπλέον παραμένει να επιβεβαιώσουμε γιατί η επιλογή του μη γραμμικού προσαρμοστικού ελεγκτή έχει πραγματοποιηθεί και γιατί άλλα εναλλακτικά σχήματα ελέγχου, όπως ο βέλτιστος έλεγχος έχουν απορριφθεί. Ακολουθεί μια πληροφοριακή σύγκριση προτερημάτων του προσαρμοστικού και του βέλτιστου ελέγχου για το πρόβλημα προγραμματισμού συνυπολογίζοντας τις ποικίλες δομικές πλευρές στα συστήματα που πραγματοποιούνται με σκοπό να διασαφηνιστούν τα κίνητρα που οδηγούν στην επιλογή του προσαρμοστικού ελέγχου. Έλεγχος real time, on line αποτελεί προϋπόθεση στο πλαίσιο του σχεδίου HIMAC για την εισαγωγή κάθε ευκολίας ελέγχου που παρουσιάζεται στο κύτταρο. Η προσέγγιση του προσαρμοστικού ελέγχου απολαμβάνει την ιδιότητα του ελέγχου σε real-time, καθώς οι μέθοδοι βέλτιστου ελέγχου είναι κυρίως off-line τεχνικές, εξαιτίας των μεγάλων διαστάσεων τις οποίες τα προβλήματα προγραμματισμού αποκτούν ακόμα και για μεσαία μεγέθη κυττάρων και εξαιτίας των προϋποθέσεων που ολόκληρο το πρόγραμμα παρουσιάζει. Ομοίως, η

υπολογιστική πολυπλοκότητα γίνεται υπερβολικά μεγάλη όταν λαμβάνει υπόψη προσεγγίσεις βέλτιστου ελέγχου, όταν οι προσεγγίσεις προσαρμοστικού ελέγχου διευκολύνουν τον on-line έλεγχο.

Και οι δυο προσεγγίσεις είναι ικανές να επιλύσουν το πρόβλημα προγραμματισμού, μοιράζονται την δυνατότητα της επιτυχίας για τον σκοπό της προώθησης καθώς ο βέλτιστος έλεγχος προσφέρει βέλτιστες λύσεις συγκρινόμενες με τις προσαρμοστικές που αναζητούν μόνο λιγότερο βέλτιστες.

Εντωμεταξύ η ακριβής γνώση του μοντέλου είναι απαραίτητη για την εφαρμογή ενός σχεδίου βέλτιστου ελέγχου, καθώς σαφείς τεχνικές προσαρμοστικού ελέγχου μπορούν να χειριστούν ασάφειες του μοντέλου. Η παραγωγή ενός σχετικού μοντέλου ικανού να συλλάβει όλες τις λεπτομέρειες σχετικές με την συμπεριφορά των κυττάρων είναι με τα βίαις εφικτό, καθώς κάθε παραγόμενο μοντέλο που θα ήταν μη γραμμικό οδηγεί σε υπερβολικά πολύπλοκες, συχνά άλυτες μορφοποιήσεις βέλτιστου ελέγχου. Μη γραμμικότητες μοντέλων είναι πιο εύκολα χειριζόμενες από ποικίλες μεθοδολογίες προσαρμοστικού ελέγχου.

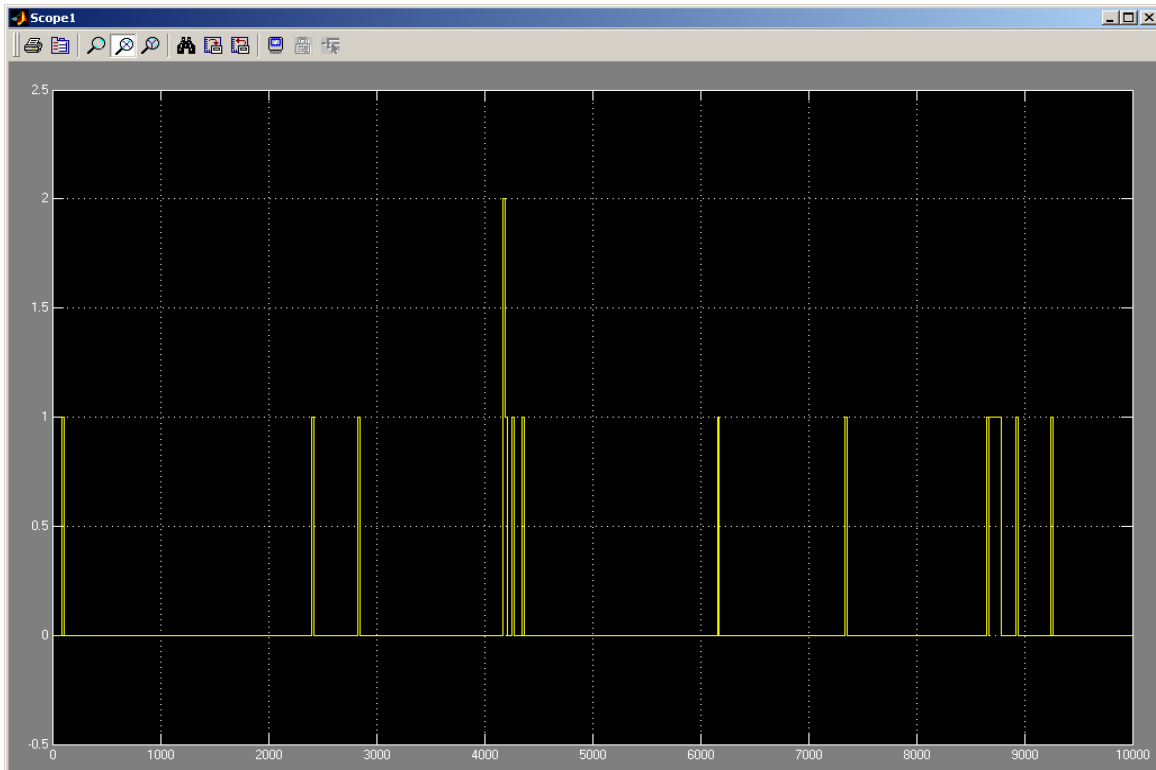
Μετατροπές στον προσδιορισμό ενός προβλήματος προγραμματισμού, όπως αλλαγές στις απαιτήσεις παραγωγής, είναι μη εφικτές σε πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου αφού απαιτείται ο επαναυπολογισμός της βέλτιστης λύσης. Αντίθετα, τέτοια αλλαγή μπορεί αμέσως να ενσωματωθεί από έναν προσαρμοστικό ελεγκτή. Τέλος, διαταραχές στο σύστημα μπορούν να γίνουν ανεχτές από κατάλληλες δομές προσαρμοστικού ελέγχου, αλλά είναι λιγότερο αντιμετωπίσιμες σε σχέδια βέλτιστου ελέγχου.

Επομένως, η ανάγκη της συσχέτισης με μια μεγάλη ποικιλία από περιβάλλοντα και οι αποκλίσεις τους, οι μικρές διαστάσεις, και πρωταρχικά η επιθυμία για ένα real-time πρόγραμμα, καθιερώνει τον προσαρμοστικό έλεγχο ως την κατάλληλη επιλογή, ελαττώνοντας τον συμβιβασμό για λιγότερο βέλτιστες λύσεις.

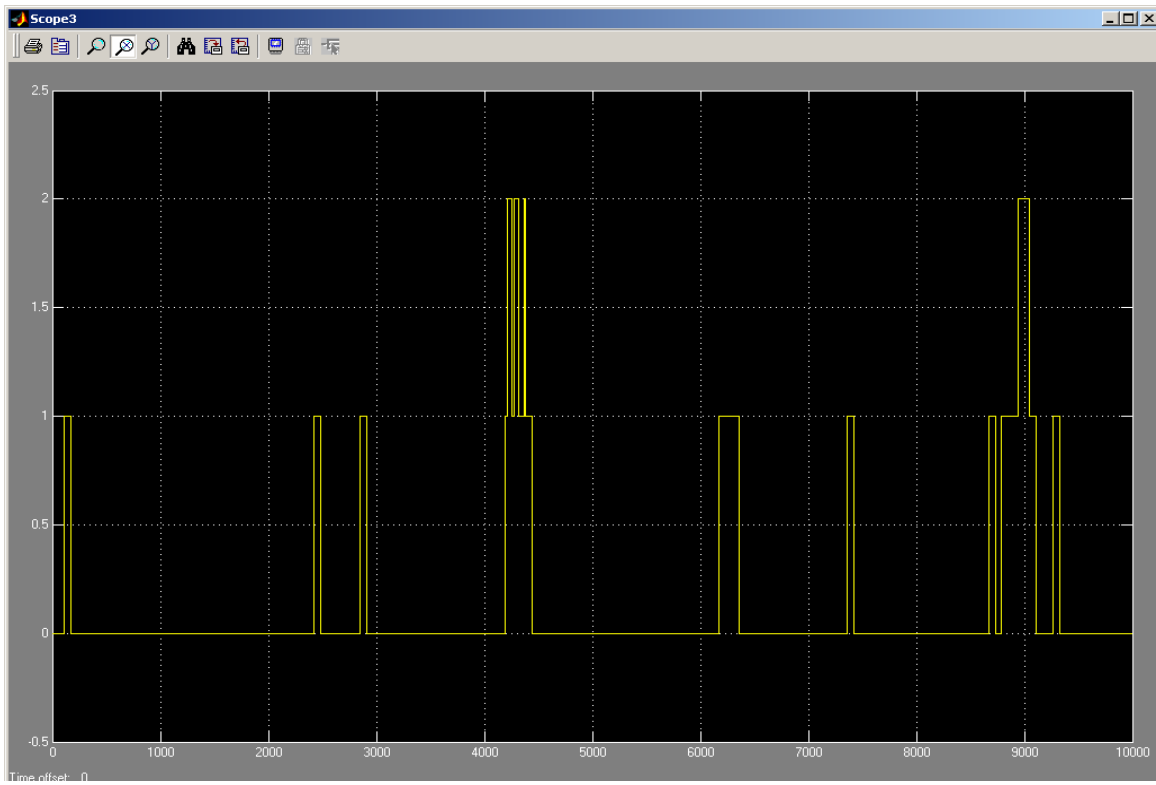
Παράρτημα

Συνέχεια αποτελεσμάτων Simulink

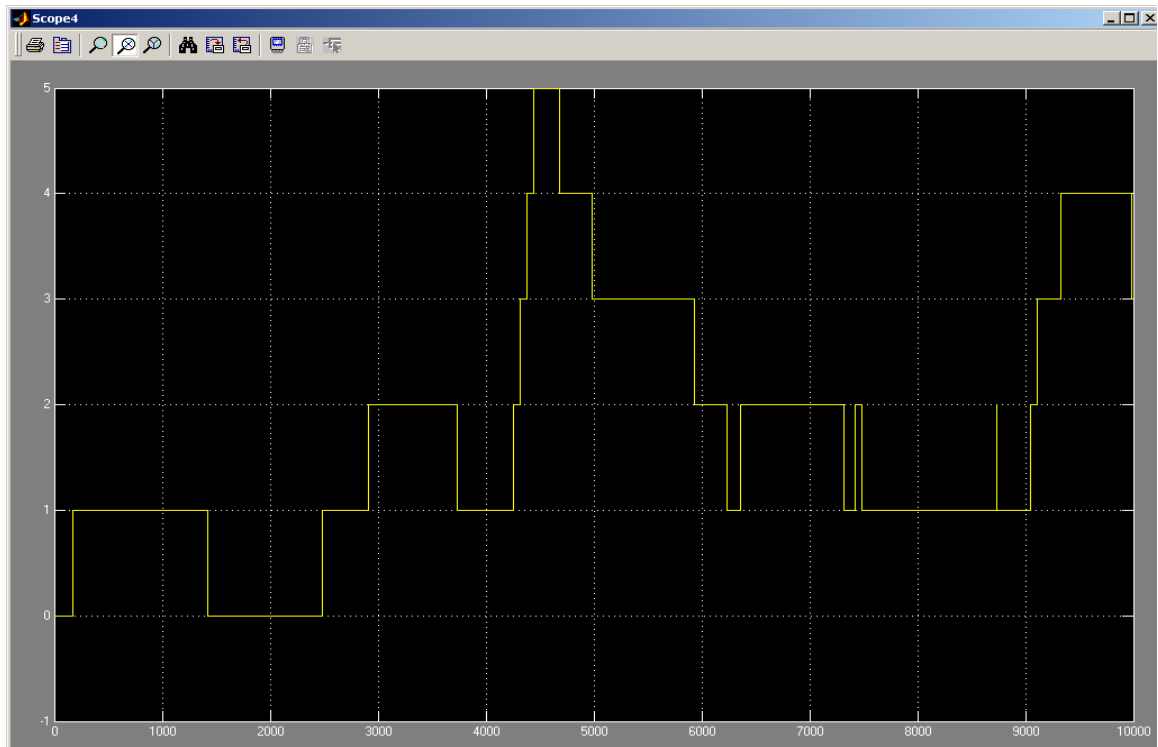
- Παρατίθενται ακολούθως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αερολιμένα για μέσο ρυθμό αφίξεων 4 αεροσκάφη / ώρα, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι προσομοίωσης παραμένουν ως είχαν στο προηγούμενο παράδειγμα. Ακολουθούν τα διαγράμματα καταστάσεων των 6 buffers του μοντέλου του αερολιμένα.
 - Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αερολιμένα για μέσο ρυθμό αφίξεων 6 αεροσκάφη / ώρα, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι προσομοίωσης παραμένουν ως είχαν στο προηγούμενο παράδειγμα. Ακολουθούν τα διαγράμματα καταστάσεων των 6 buffers του μοντέλου του αερολιμένα.
-



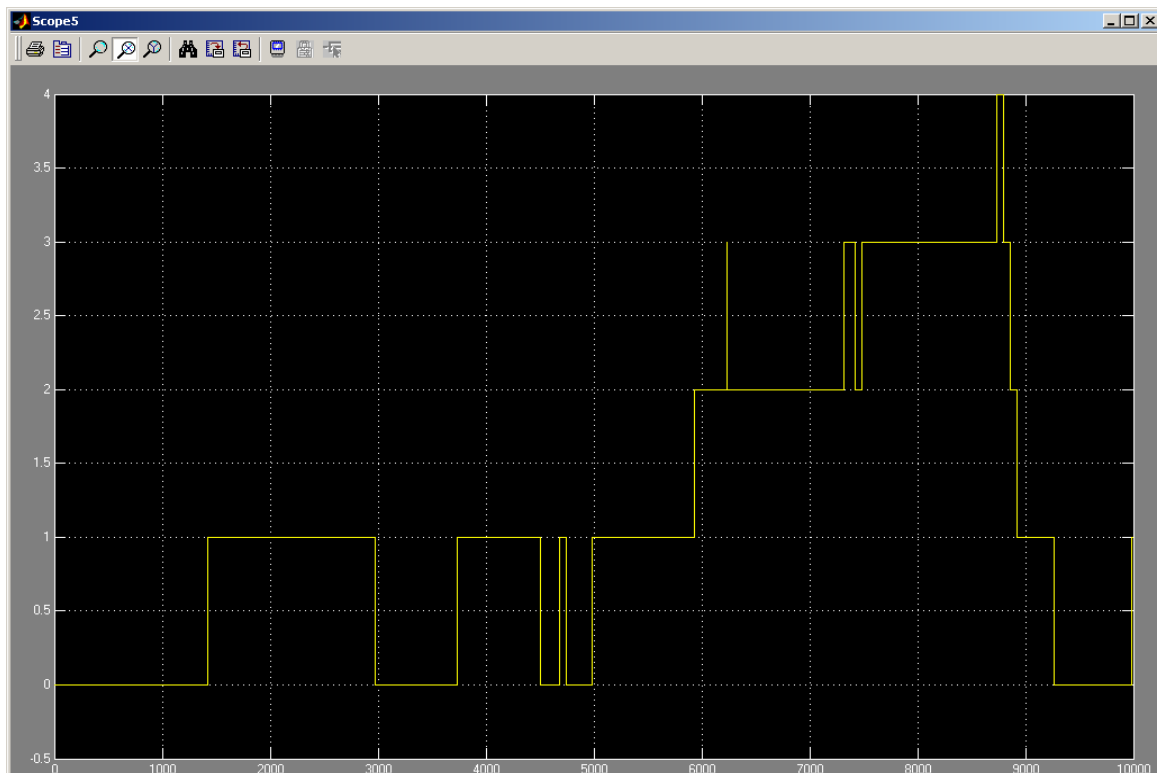
Π. Ι. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 1



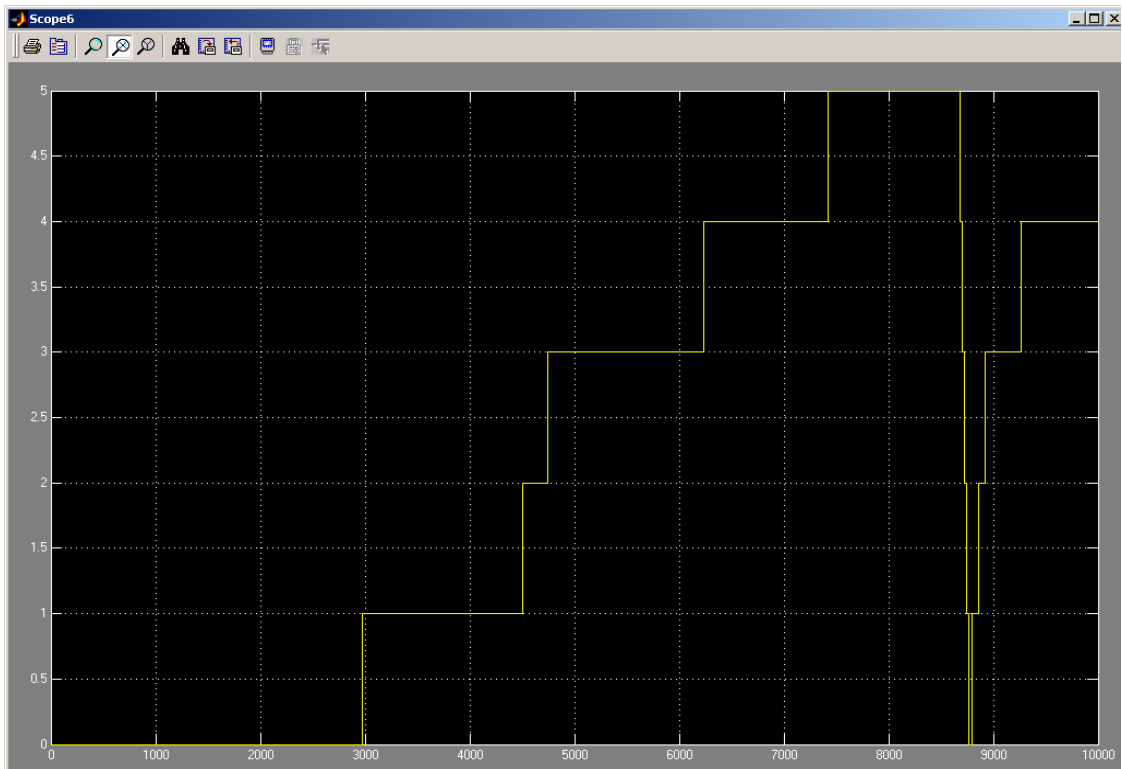
Π. ΙΙ. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 3



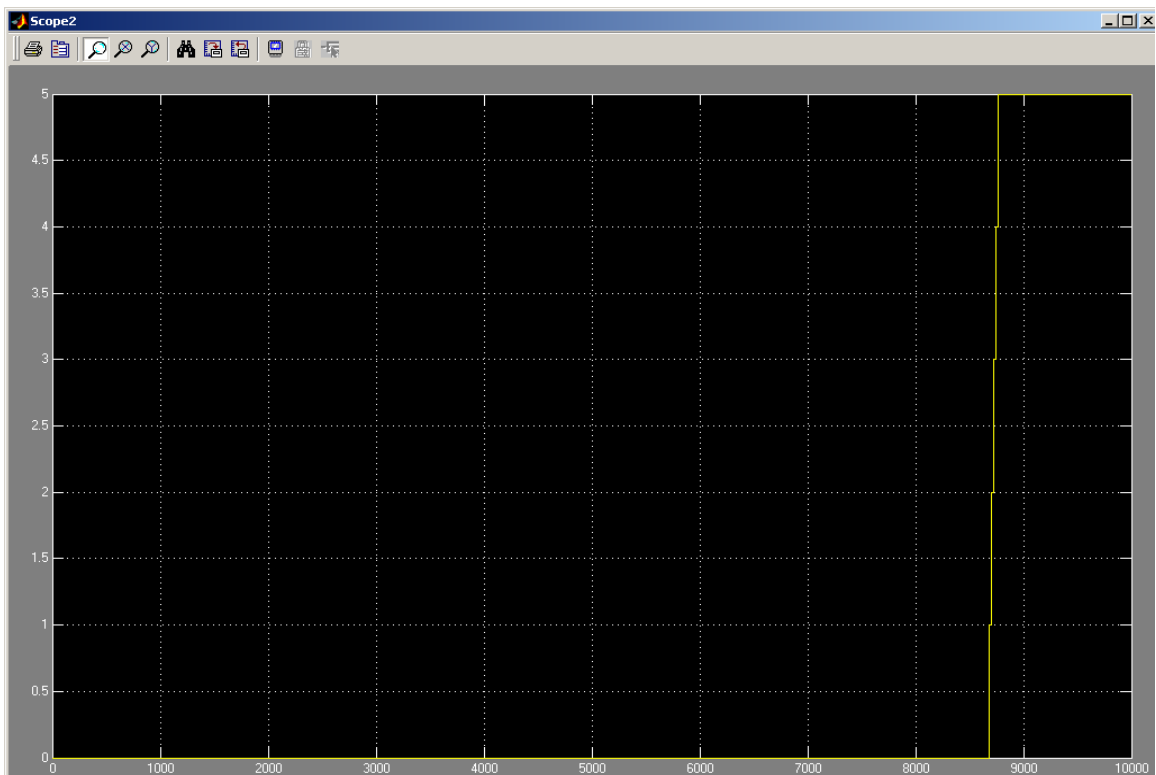
Π. III. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 4



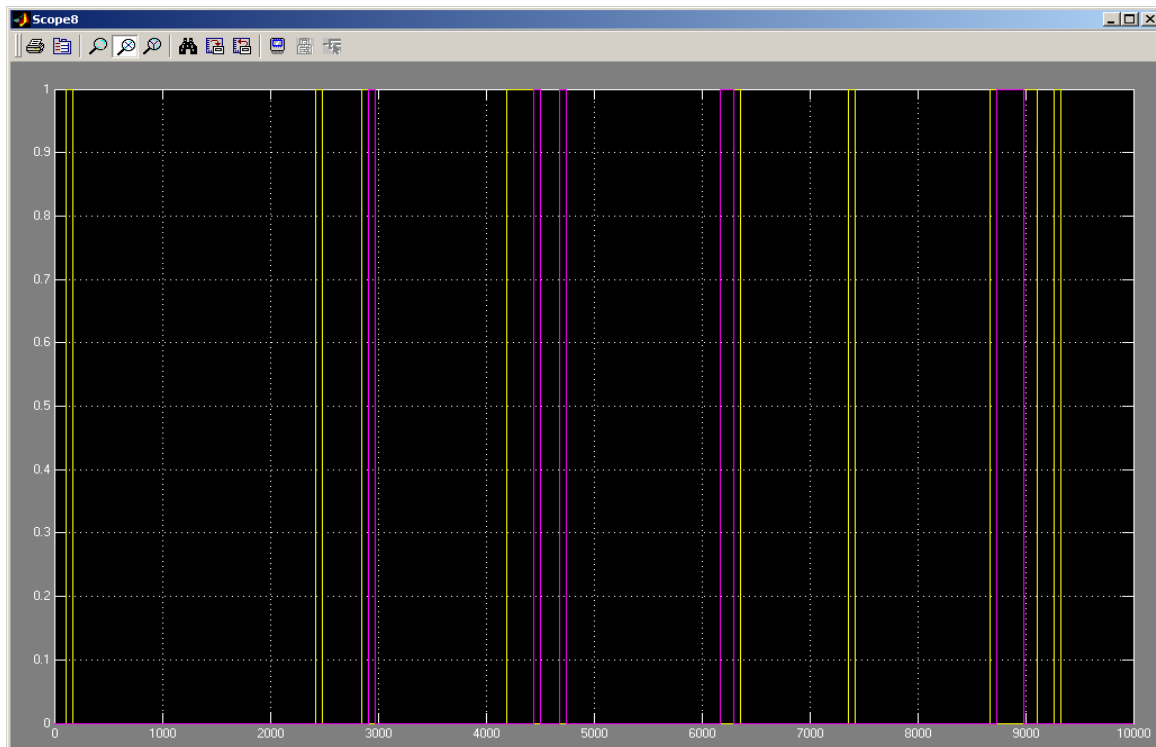
Π. IV. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 5



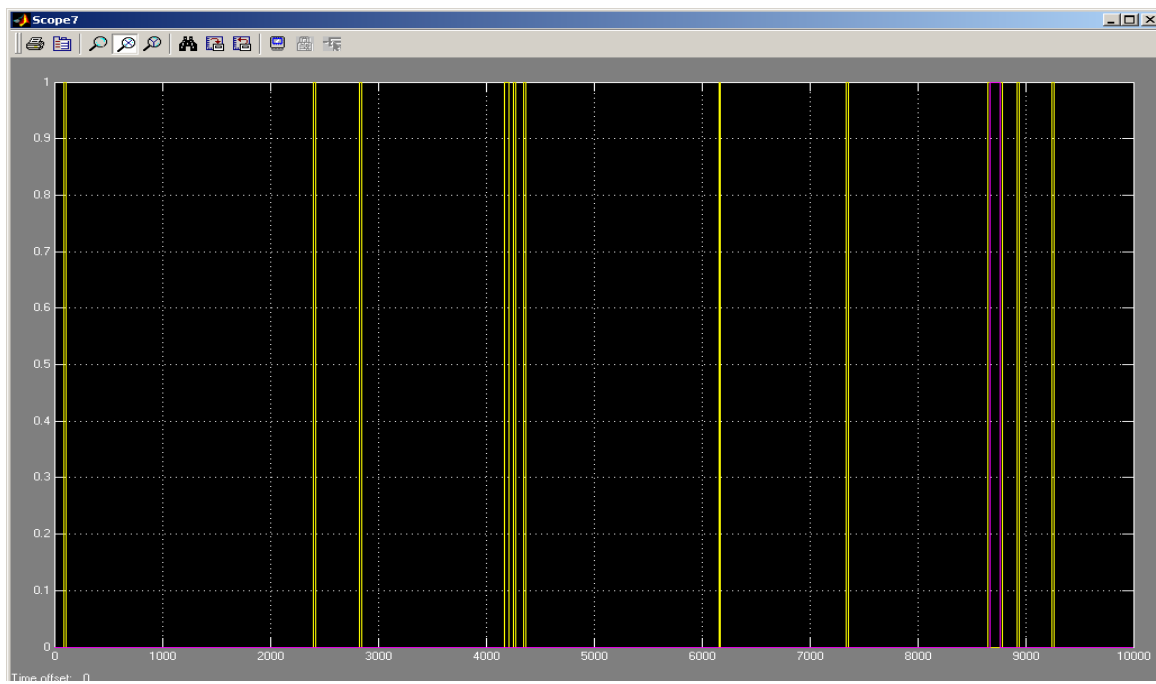
Π. V. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 6



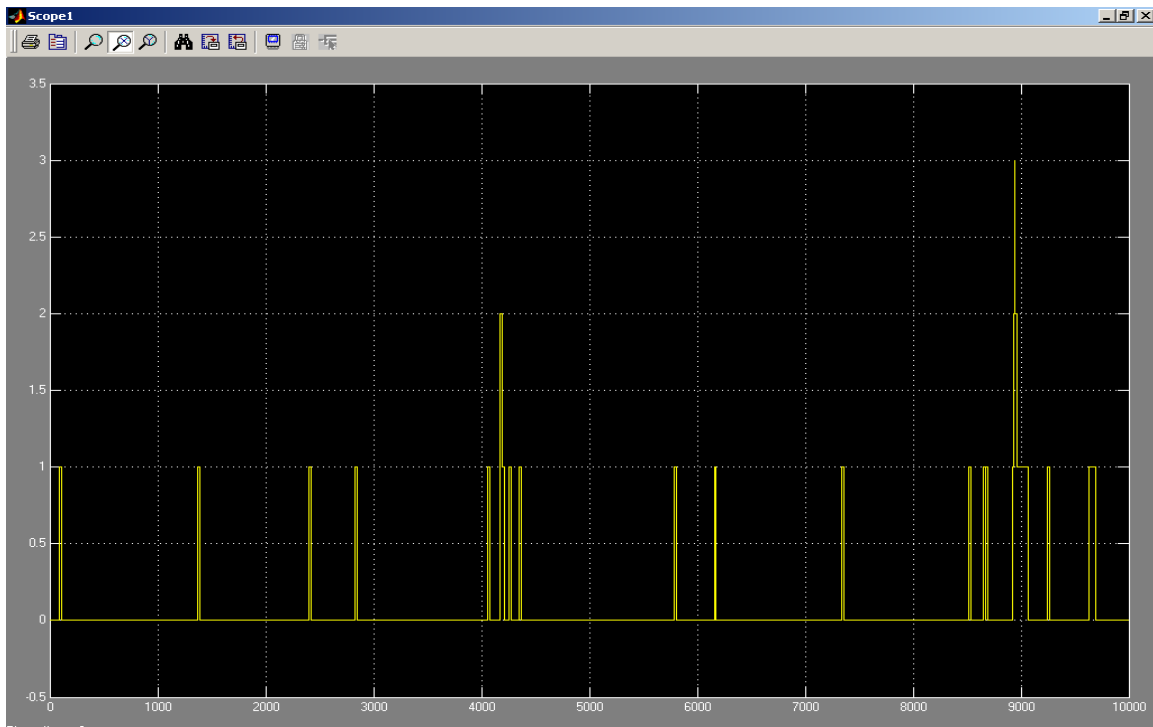
Π. VI. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 2



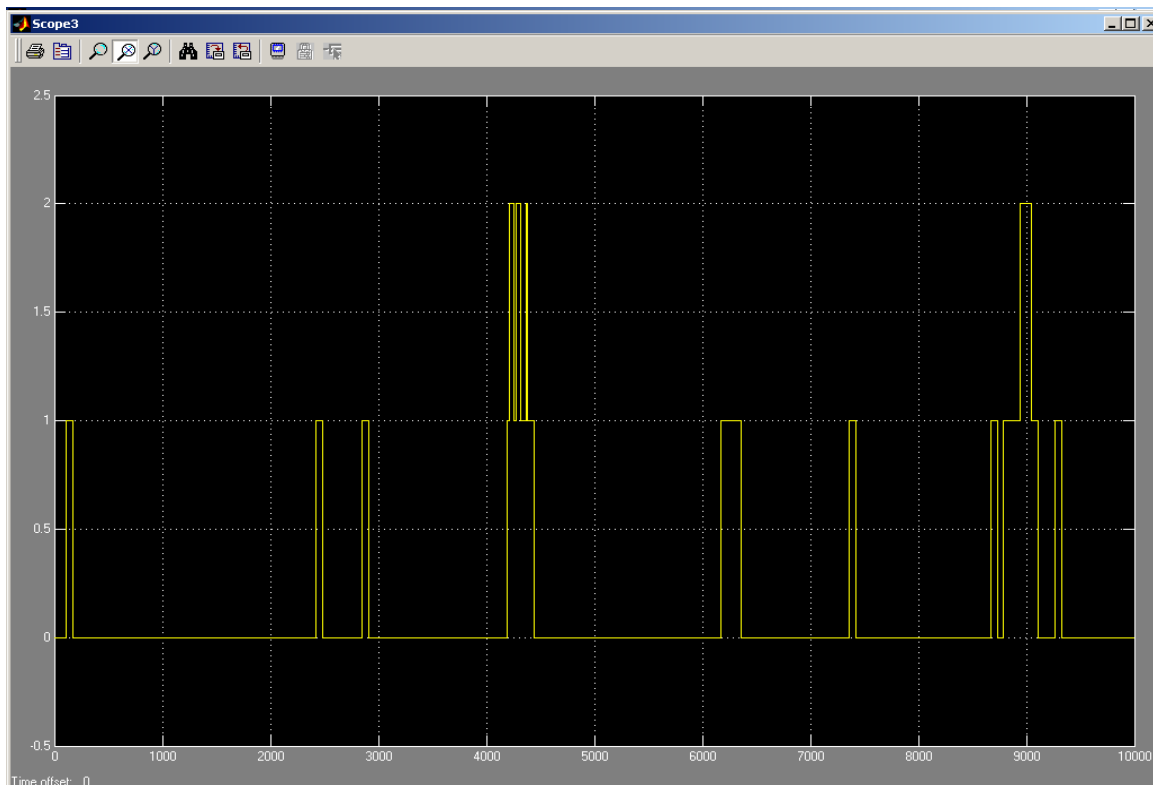
Π. VII. Διάγραμμα καταστάσεων των submachines 3 και 4 (working or idle)



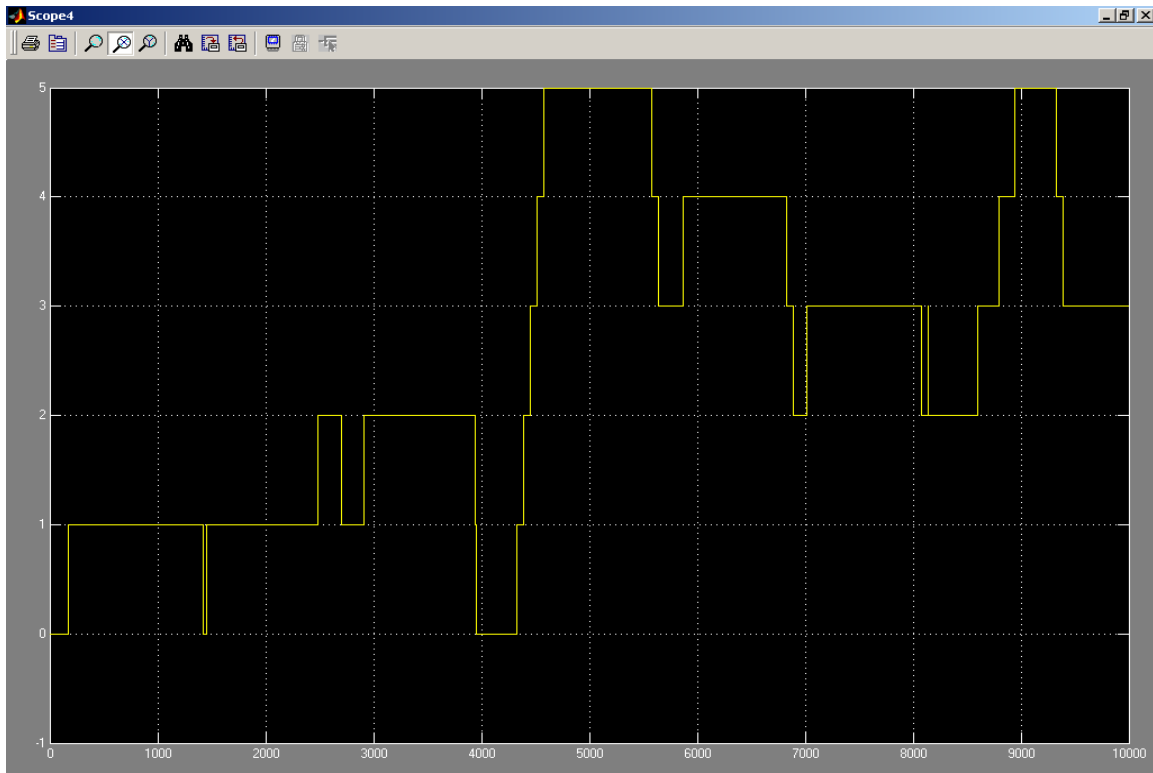
Π. VIII. Διάγραμμα καταστάσεων των submachines 1 και 2 (working or idle)



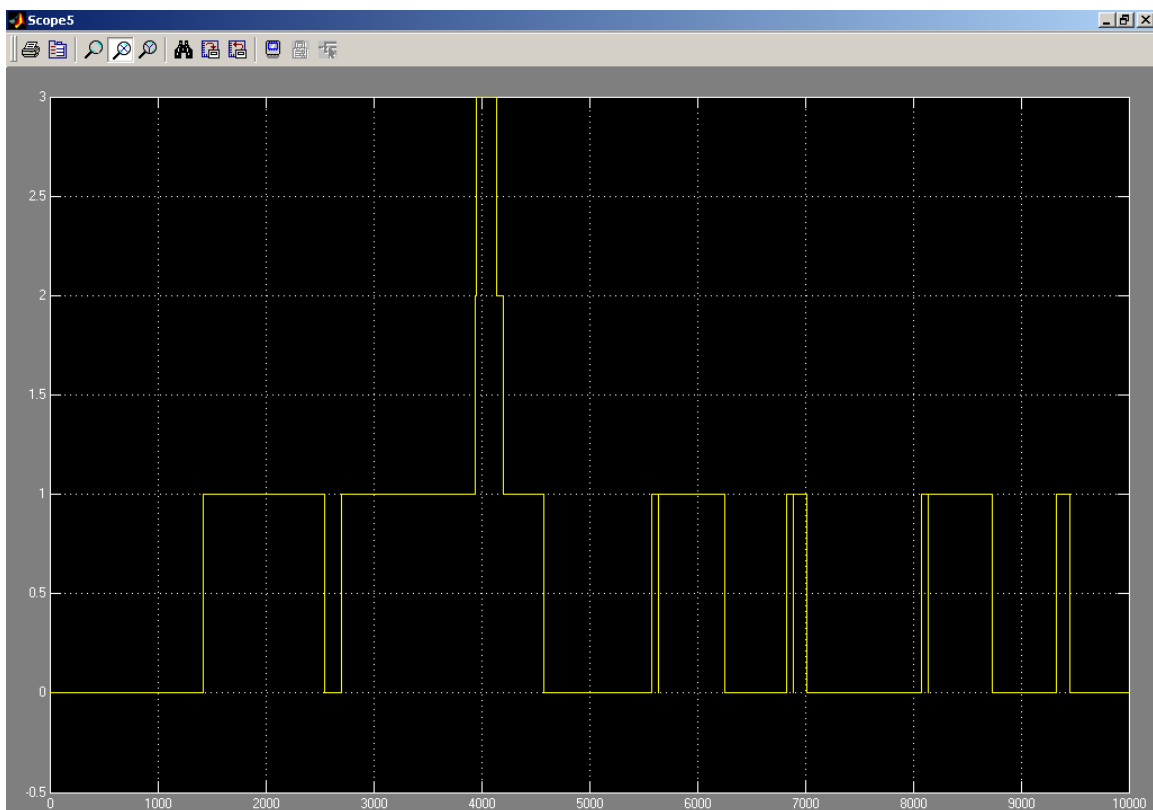
Π. IX. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 1



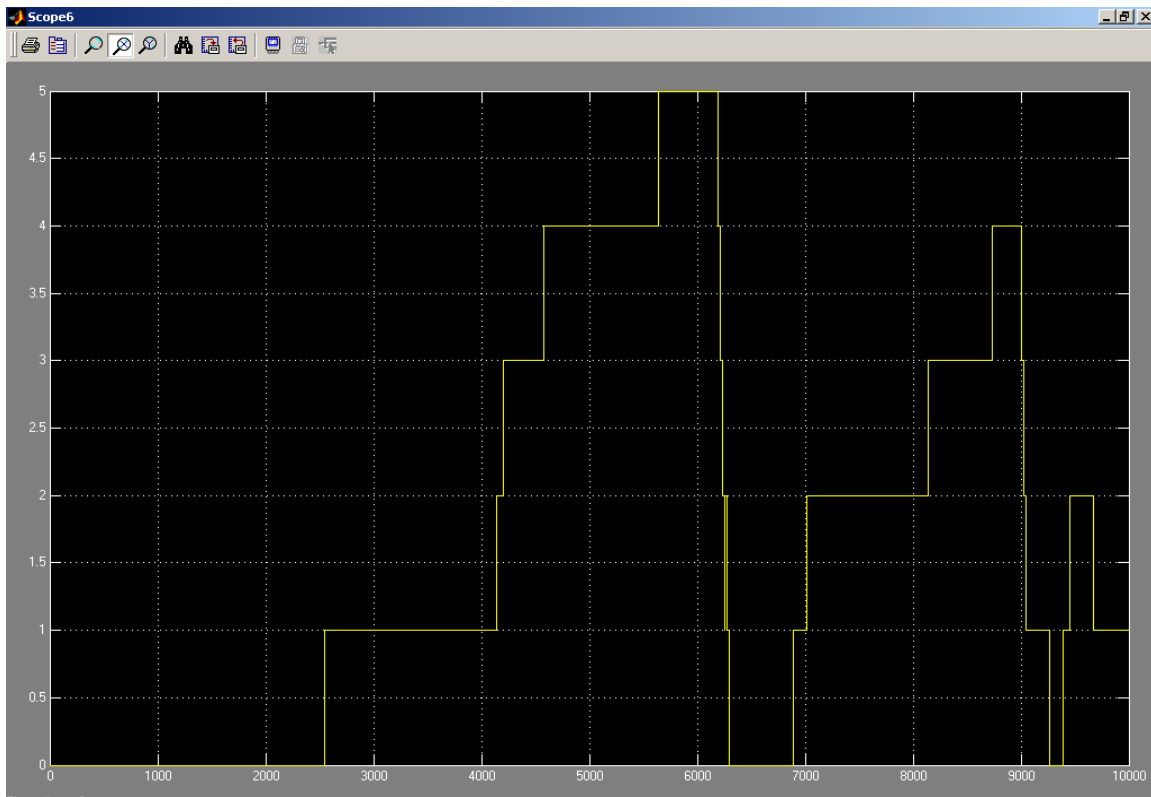
Π. X. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 3



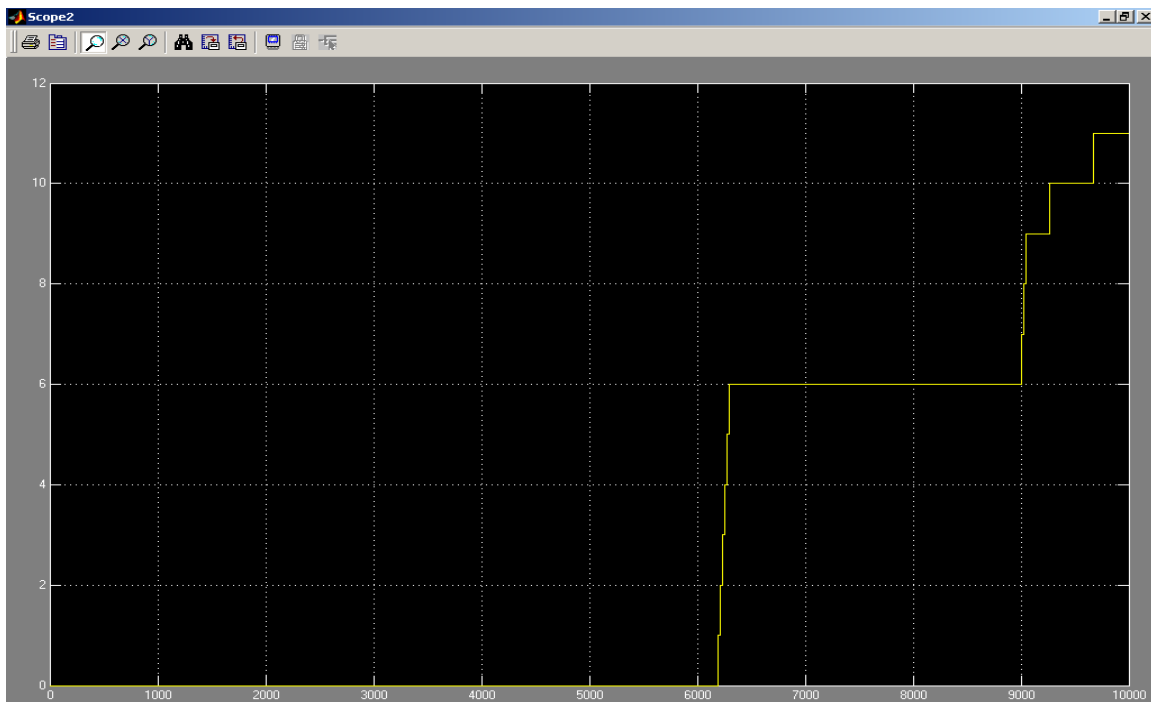
Π. XI. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 4



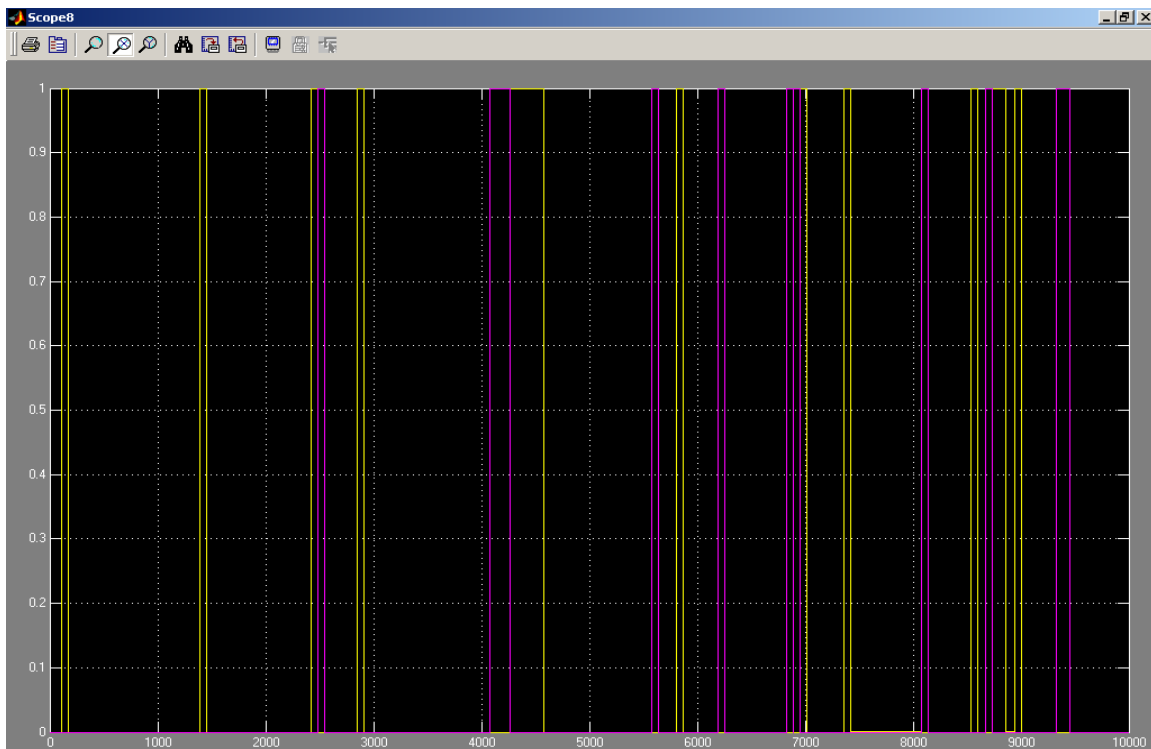
Π. XII. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 5



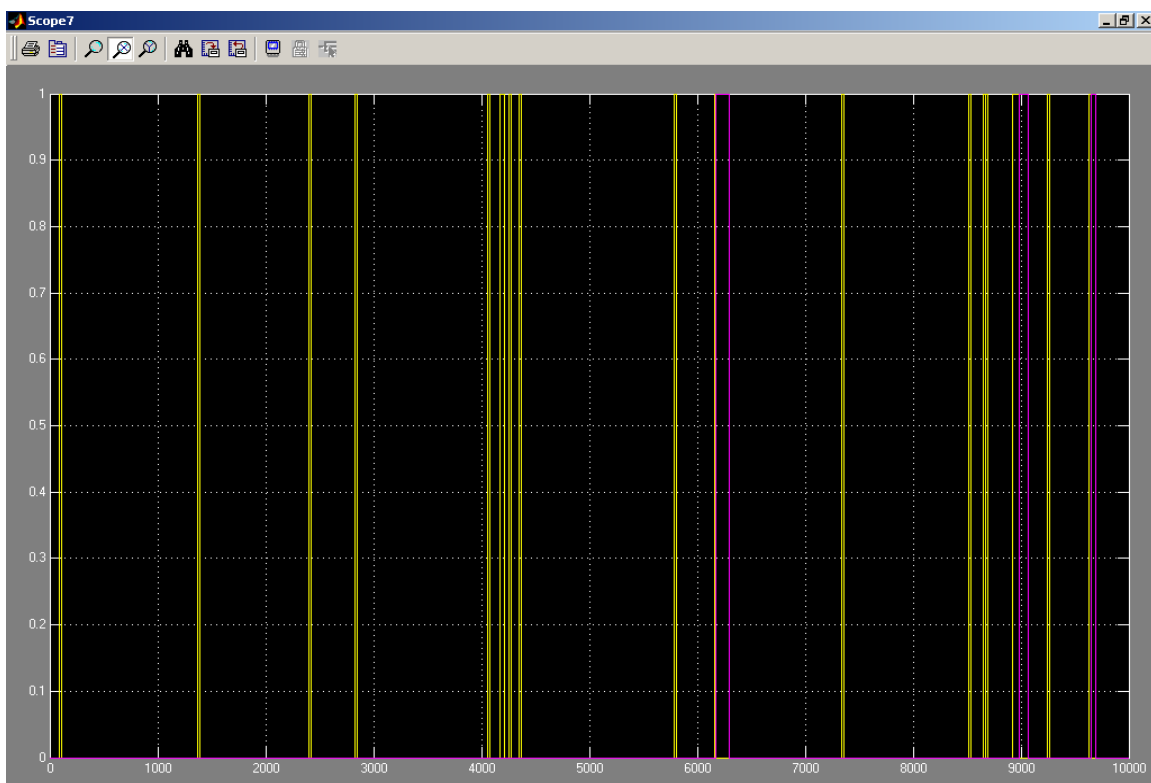
Π. XIII. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 6



Π. XIV. Διάγραμμα κατάστασης του buffer 2



Π. XV. Διάγραμμα καταστάσεων των submachines 3 και 4 (working or idle)



Π. XVI. Διάγραμμα καταστάσεων των submachines 1 και 2 (working or idle)

Βιβλιογραφία

- [1] M. Varvarigos, P. Voulgaris, M. Christodoulou and E. Feron, “Advanced Information Technology Tools for the Air Traffic Management Systems of the Future”, Massachusetts Institute of Technology, University of Patras, Greece.
 - [2] N. Pujet, B. Delcaire and E. Feron, “Input-Output Modeling and Control of the Departure Process of Congested Airports”, GNC conference, paper AIAA-99-4299.
 - [3] F. Carr, A. Evans, J.P. Clarke and E. Feron, “Modeling and Control of Airport Queuing Dynamics Under Severe Flow Restrictions”, 12 April 2001.
 - [4] K. Andersson, F. Carr, E. Feron and W. D. Hall, “Analysis and Modeling of Ground Operations at Hub Airports”, In Proceedings of 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Website: <http://atmseminar-2000.eurocontrol.fr/>, July 2000. Eurocontrol and the FAA.
 - [5] S. Perrakis, “Neural Network Schedulers in Manufacturing Systems”, Master of Science, Technical University of Crete, Greece 2001.
 - [6] G.A. Rovithakis, V.I. Gaganis, S.E. Perrakis and M.A. Christodoulou, “Neuro Schedulers for Flexible Manufacturing Systems”, *Computers in Industry*, vol. 39, pp. 209-217, 1999.
 - [7] G.A. Rovithakis, V.I. Gaganis, S.E. Perrakis and M.A. Christodoulou, “Real Time Control of Manufacturing Cells using Dynamic Neural Networks”, *Automatica*, vol. 35, pp. 139-149, 1999.
 - [8] G.A. Rovithakis, V.I. Gaganis, S.E. Perrakis and M.A. Christodoulou, “Manufacturing Systems Modeling using Neural Networks”, *Studies in Informatics and Control*, vol. 6, no. 1, pp. 37-47, 1997.
 - [9] G.A. Rovithakis and M.A. Christodoulou, “Adaptive Control with Recurrent High Order Neural Networks: Theory and Industrial Applications”, Springer Verlag, London, 2000.
 - [10] K. Bilimoria, H. Lee, Z.-H. Mao, E. Feron., “Comparison of Centralized and Decentralized Conflict Resolution Strategies for Multiple Aircraft Problems”, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Denver, august 2000.
-

-
- [11] Z.-H. Mao, E. Feron and K. Bilimoria, "Stability of Intersecting Aircraft Flows Under Decentralized Conflict Avoidance Rules", *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Denver, august 2000, Submitted to the Special Issue on Automated Air Traffic Control Systems of the *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- [12] E. Frazzoli, Z.H. Mao, J.H. Oh and E. Feron, "Resolution of Conflicts Involving Many Aircraft via Semidefinite Programming" *AIAA J. Guidance, Control and Dynamics*, 2000.
- [13] L. Pallottino, E. Feron, and A. Bicchi, "Conflict Resolution Problems for Air Traffic Management Systems Solved with Mixed Integer Programming" Accepted for publication in *IEEE Trans. Intell. Transp. Systems*, 2002.
- [14] Web Site: <http://www.metsci.com/cdm/index.html>. Collaborative Decision Making, maintained by Metro Scientific, Reston, VA.
- [15] F. Carr, "Stochastic modeling and control of airport surface traffic", Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [16] H. Idris, "Observations and Analysis of Departure Operations at Boston Logan International Airport", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [17] H. Idris, B. Delcaire, I. Anagnostakis, W. Hall, N. Pujet, E. Feron, R. J. Hansman, J. P. Clarke, and A. Odoni, "Identification of flow constraints and control points in departure operations at airport systems", *Air Traffic Control Quarterly*, 2000.
- [18] N. Pujet, "Modeling and Control of the Departure Process of Congested Airports" PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [19] N. Pujet, B. Delcaire, and E. Feron, "Input-output modeling and control of the departure process of busy airports", *Air Traffic Control Quarterly*, Volume 8, Number 1, pp. 1 – 32, 2000
- [20] N. Pujet and E. Feron, "Input-output modeling and control of the departure process of busy airports" In *AIAA Conference on Guidance, Navigation and Control*, Portland, OR, August 1999. AIAA.
- [21] B. Delcaire and E. Feron. "Dealing With Airport Congestion: Development of Tactical Tools for the Departure Flows from a Large Airport." Technical report, International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [22] Website of FAA Office of System Capacity. <http://www.faa.gov/ats/asc/>
-