

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «*Μελέτη σεναρίου επέκτασης αεροδρομίου (επιβατικός σταθμός – σημεία ελέγχου επιβατών / χειραποσκευών) με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης επιχειρησιακών διαδικασιών Arena*» εκπονήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος «Επιχειρησιακή Έρευνα» που διδάσκεται στον τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πραγματεύεται την εφαρμογή της Προσομοίωσης σε προβλήματα επιχειρησιακών διαδικασιών και συγκεκριμένα μελετάται η επέκταση ενός αεροδρομίου με το άνοιγμα ενός νέου τερματικού σταθμού επιβατών. Το πρόβλημα, βασίζεται σε δεδομένα πραγματικού αεροδρομίου και αποτέλεσε το θέμα του 13^{ου} Ετήσιου Παγκοσμίου Διαγωνισμού Προσομοίωσης, που διοργανώνεται από το IIE (Institute of Industrial Engineers) και την Rockwell Automation, εταιρία που αναπτύσσει το λογισμικό εξομοίωσης Arena.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αναλύεται αρχικά η προσομοίωση ως εργαλείο της επιχειρησιακής έρευνας: η δημιουργία, η εξέλιξη, η σημερινή εφαρμογή της, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής. Έπειτα παρουσιάζεται το πρόγραμμα Arena, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Στο εδάφιο αυτό επεξηγούνται οι βασικές αρχές και αναλύεται σε βάθος η λειτουργία του, αποτελώντας έτσι ένα μικρό εγχειρίδιο του προγράμματος. Το δεύτερο μέρος της εργασίας αφορά αποκλειστικά στο πρακτικό μέρος αυτής. Παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι πτυχές του προβλήματος της επέκτασης του αεροδρομίου και κατόπιν επεξηγείται λεπτομερώς το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την επίλυση αυτού. Στο τελευταίο εδάφιο αναφέρονται τα αποτελέσματα και πορίσματα της μελέτης αυτής καθώς και συστάσεις προς τη διοικούσα αρχή του αεροδρομίου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, κ. Σ. Πόνη. Τόσο για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο αντικείμενο, όσο και για τη συνεχή του βοήθεια, καθοδήγηση και εύστοχες συμβουλές που συνεισέφεραν στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Παράλληλα, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τα μέλη της οικογένειάς μου και τους στενούς μου φίλους για την στήριξη και ανιδιοτελή προσφορά τους όλο αυτό το διάστημα.

Κασιμάτης Παναγιώτης,

Ιούλιος 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΜΕΡΟΣ Α'	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	11
Ορισμός	11
Πρότυπα – Μοντέλα.....	12
Μεθοδολογία της Επιχειρησιακής Έρευνας.....	13
Μέθοδοι Μοντελοποίησης.....	14
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	15
Ορισμός	15
Η Ανάγκη για Εξομοίωση.....	16
Τομείς Εφαρμογής Προσομοίωσης.....	17
Πως γίνεται η Εξομοίωση.....	18
Με το χέρι – το Πείραμα του Monte Carlo	18
Προγραμματισμός σε κοινές Γλώσσες	19
Γλώσσες Προσομοίωσης	19
Εξομοιωτές Υψηλού Επιπέδου	20
Ιστορική αναδρομή.....	20
Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	21
Διάκριση Μοντέλων Εξομοίωσης.....	22
ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	24
ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ (QUEUEING THEORY)	24
Ορισμός	24
Κόστος Γραμμών Αναμονής	24
Βασικά Μέρη ενός Συστήματος Γραμμής Αναμονής	25
Αφίξεις.....	25
Γραμμή Αναμονής.....	26
Εγκαταστάσεις Εξυπηρέτησης.....	26
Σχόλια – Αποτίμηση.....	27
ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΈΝΝΟΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	29
Εισαγωγή.....	29
Βασικά Στοιχεία Μοντέλων.....	29
Οντότητες (Entities).....	29
Σταθμοί Εξυπηρέτησης - Πόροι	30

Ουρές Αναμονής (Queues)	30
Μεταβλητές – Εκφράσεις	31
Ροή Οντοτήτων	31
Χρονοδιάγραμμα Συμβάντων	32
Ρολόι Εξομοίωσης	33
Τυχειότητα στην Εξομοίωση	33
Σύνοψη μιας Μελέτης Προσομοίωσης	35
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ARENA.....	38
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	38
<i>Rockwell Arena</i>	38
<i>Περιβάλλον Εργασίας</i>	38
ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ MODULES	41
<i>Basic Process Panel</i>	41
Create Module	41
Entity Module	42
Process Module	42
Resource Module.....	43
Queue Module	43
Λοιπά Στοιχεία	43
<i>Advanced Process Panel</i>	45
<i>Advanced Transfer Panel</i>	46
ΕΚΤΕΛΕΣΗ, ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	47
<i>Γραφικά και Γραφήματα</i>	47
<i>Παράμετροι Εκτέλεσης</i>	48
<i>Εκτέλεση και Αναφορές</i>	50
<i>Διάκριση Στατιστικών Στοιχείων</i>	51
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	53
<i>Input Analysis</i>	53
<i>To Arena Input Analyzer</i>	54
<i>Output Analysis</i>	56
<i>To Arena Output Analyzer</i>	57
<i>Παραμετρική Ανάλυση Σεναρίων – Process Analyzer (PAN)</i>	58
<i>OptQuest</i>	59
ΜΕΡΟΣ Β'	61
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	62
ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΧΩΡΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ	62
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ CHECK-IN.....	63
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	64
ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗΣ	67

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	68
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	70
ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	70
<i>Οντότητες</i>	70
<i>Πόροι</i>	70
<i>Χρονοδιαγράμματα</i>	71
<i>Run Setup</i>	72
ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	73
<i>Αρχικό Μενού</i>	73
<i>Αφίξεις Επιβατών</i>	74
<i>Διαδικασία Check-In</i>	77
<i>Διαδικασία Precheck</i>	78
<i>Χώρος Αναμονής</i>	80
<i>Χώρος Ελέγχου – Security Checkpoints</i>	82
<i>Χειρωνακτικός Έλεγχος</i>	87
<i>Έξοδος από το Σύστημα</i>	88
<i>Δεδομένα Εξόδου</i>	89
% Missed Flights.....	90
% Served in less than 45min.....	90
Total Variable Cost.....	90
Staffing Cost per Hour.....	90
ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	91
<i>Μελλοντικά Σενάρια (To-Be)</i>	91
T3, T4 – S3.....	94
T3, T4 – S3&S4.....	96
ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	96
<i>Airport Overview</i>	97
<i>Security Checkpoint</i>	97
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	99
ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ - VERIFICATION.....	99
ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ – VALIDATION.....	100
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	102
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	102
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	102
<i>Δεδομένα Εισόδου</i>	102
<i>Δεδομένα Εξόδου</i>	103
ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ – T3, S3.....	105
<i>Εξοπλισμός - Προσωπικό</i>	105
<i>Βελτιστοποίηση</i>	108

Χώρος Αναμονής	108
Αντιστοίχιση Εκδοτηρίων	108
Αύξηση – Μείωση κατά 20% των Χρόνων Ελέγχου.....	110
Ανάθεση προτεραιότητας σε Επιβάτες Α' Θέσης	112
Προτεινόμενος Χρόνος Προσέλευσης Επιβατών	113
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	116
<i>Σενάριο 1: T3, T4 – S3</i>	117
<i>Σενάριο 2: T3, T4 – S3, S4</i>	119
<i>Σύγκριση</i>	122
<i>Βελτιστοποίηση</i>	123
Κόστος ανά Εταιρία.....	123
Μέγεθος Χώρου Αναμονής	123
Αντιστοίχιση Εκδοτηρίων	124
Αύξηση – Μείωση Χρόνων Ελέγχου κατά 20%.....	125
Ανάθεση προτεραιότητας σε Επιβάτες Α' Θέσης	127
Προτεινόμενος Χρόνος Προσέλευσης Επιβατών	128
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	131
<i>Χρόνοι Ελέγχου</i>	131
<i>Διαθέσιμοι Πόροι</i>	132
Αριθμός Ενεργών Σημείων Ελέγχου	133
Διαθεσιμότητα Προσωπικού	134
ΣΧΟΛΙΑ – ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	136
A. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	136
<i>Τρέχουσα Κατάσταση: T3 – S3</i>	136
<i>Σενάρια Μελλοντικής Επέκτασης</i>	140
T3, T4 – S3	140
T3, T4 – S3, S4.....	143
B. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΣΚΟΥ.....	148
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	149

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	29
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ARENA	39
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΔΟΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ CREATE.....	41
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΤΟ ENTITY MODULE	42
ΕΙΚΟΝΑ 5: PROCESS MODULE	42
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΔΟΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ RESOURCE.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΓΡΑΜΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ANIMATION	47
ΕΙΚΟΝΑ 8: ANIMATION ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ, ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΟΥΜΕΝΑ ΓΡΑΦΙΚΑ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΑΛΟΓΟΥ "RUN SETUP"	49
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΓΡΑΜΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ "RUN INTERACTION"	50
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΑΝΑΦΟΡΑ ΜΙΑΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ	51
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ ΧΩΡΟΥ ΣΤΟ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ ΧΩΡΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	64
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ.....	67
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΕΠΙΒΑΤΗΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΓΡΑΜΜΩΝ FABULOUS FLIGHTS	70
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ RUN SETUP ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	72
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ "ΜΕΝΟΥ" ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΤΜΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΑΦΙΞΕΙΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΔΟΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ "ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ" ΕΠΙΒΑΤΩΝ	75
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΑΠΟΔΟΣΗ ATTRIBUTES ΣΤΙΣ ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 21: ROUTE MODULE - ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΑ ΕΚΔΟΤΗΡΙΑ ΕΙΣΙΤΗΡΙΩΝ.....	76
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΤΜΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ CHECK-IN.....	77
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΤΜΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΈΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΒΑΤΗΡΙΩΝ & ΚΑΡΤΩΝ ΕΠΙΒΙΒΑΣΗΣ	78
ΕΙΚΟΝΑ 24: PRECHECK PROCESS	78
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	79
ΕΙΚΟΝΑ 26: ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΡΤΑΣ ΕΠΙΒΙΒΑΣΗΣ.....	79
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΑΝΑΧΩΡΣΗ ΛΟΓΩ ΕΛΛΕΙΠΟΥΣ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	80
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΤΜΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΧΩΡΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ	80
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΤΟ MODULE PICKSTATION	81
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΤΜΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΧΩΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ SECURITY AREA 3, ΟΚΤΩ CHECKPOINTS	82
ΕΙΚΟΝΑ 31: ΛΟΓΙΚΗ CHECKPOINT 1 - ΑΡΧΗ	83
ΕΙΚΟΝΑ 32: ΛΟΓΙΚΗ CHECKPOINT 1 - ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ HOLD, ACCESS, CONVEY	84
ΕΙΚΟΝΑ 33: SEGMENT MODULE - ΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ ΤΑΙΝΙΑΣ T31	84
ΕΙΚΟΝΑ 34: CONVEYOR MODULE	85
ΕΙΚΟΝΑ 35: ΛΟΓΙΚΗ CHECKPOINT 1 – ΜΕΣΑΙΟ ΤΜΗΜΑ	86
ΕΙΚΟΝΑ 36: SEIZE ΚΑΙ PROCESS MODULES - ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΣΚΕΥΩΝ.....	86

ΕΙΚΟΝΑ 37: ΛΟΓΙΚΗ CHECKPOINT 1 - ΤΕΛΙΚΟ ΤΜΗΜΑ, BATCH MODULE	87
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΤΜΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΣΚΕΥΩΝ	88
ΕΙΚΟΝΑ 39: ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΥΛΕΣ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗΣ	89
ΕΙΚΟΝΑ 40: ΈΞΟΔΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 41: MODULES RICKSTATION & DECIDE, ΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΣΤΑ CHECKPOINTS	93
ΕΙΚΟΝΑ 42: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ CHECKPOINTS ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ	94
ΕΙΚΟΝΑ 43: ΛΟΓΙΚΗ ΚΥΛΙΟΜΕΝΩΝ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΩΝ.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 44: ΚΑΤΟΨΗ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ - AIRPORT OVERVIEW	97
ΕΙΚΟΝΑ 45: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ 1&2.....	98
ΕΙΚΟΝΑ 46: ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ & ΕΙΔΟΣ (T3-S3).....	106
ΕΙΚΟΝΑ 47: ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΧΩΡΟΥ ΑΝΑΜΟΝΗΣ – (T3-S3)	108
ΕΙΚΟΝΑ 48: ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ ΕΚΔΟΤΗΡΙΩΝ	109
ΕΙΚΟΝΑ 49: ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ / ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΧΡΟΝΟΥ ΕΛΕΓΧΩΝ.....	112
ΕΙΚΟΝΑ 50: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	114
ΕΙΚΟΝΑ 51: ΑΦΙΞΕΙΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 52: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ - (T3,T4 - S3).....	117
ΕΙΚΟΝΑ 53: ΠΟΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ - (T3,T4 - S3)	118
ΕΙΚΟΝΑ 54: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΧΩΡΟΥ - (T3,T4-S3,S4)	119
ΕΙΚΟΝΑ 55: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ - (T3,T4-S3,S4)	120
ΕΙΚΟΝΑ 56: ΟΙ 25 ΚΑΛΥΤΕΡΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΧΩΡΟΥ ΑΝΑΜΟΝΗΣ - (T3,T4-S3,S4).....	124
ΕΙΚΟΝΑ 57: ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ & ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ ΕΚΔΟΤΗΡΙΩΝ - (T3,T4-S3,S4)	124
ΕΙΚΟΝΑ 58: ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ - ΑΥΞΗΣΗ / ΜΕΙΩΣΗ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ - (T3,T4-S3,S4)	127
ΕΙΚΟΝΑ 59: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΕΠΙΒΑΤΩΝ - (T3,T4-S3,S4)	129
ΕΙΚΟΝΑ 60: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – ΧΡΟΝΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ / %SERVED IN 45MIN	131
ΕΙΚΟΝΑ 61: : ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – ΧΡΟΝΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ / %MISSED FLIGHTS	132
ΕΙΚΟΝΑ 62: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – ΑΡΙΘΜΟΣ CHECKPOINTS S3.....	133
ΕΙΚΟΝΑ 63: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – ΑΡΙΘΜΟΣ CHECKPOINTS S4.....	133
ΕΙΚΟΝΑ 64: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – PRECHECK SECURITY	134
ΕΙΚΟΝΑ 65: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ – STANDARD SECURITY	134
ΕΙΚΟΝΑ 66: ΠΑΝΟΡΑΜΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ	136
ΕΙΚΟΝΑ 67: COUNTERS ΚΑΙ ΧΩΡΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΕΝ ΩΡΑ «ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ» ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	137
ΕΙΚΟΝΑ 68: CHECKPOINTS 1&2 ΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ, ΞΗΜΕΡΩΜΑΤΑ ΚΥΡΙΑΚΗΣ.	138
ΕΙΚΟΝΑ 69: CHECKPOINTS 1&2, ΑΠΟΓΕΥΜΑ ΔΕΥΤΕΡΑΣ	139
ΕΙΚΟΝΑ 70: ΚΑΤΟΨΗ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ. ΟΙ ΕΠΙΒΑΤΕΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΑΕΡΟΓΡΑΜΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΝΤΑΙ ΣΤΟ SECURITY AREA 3.....	140
ΕΙΚΟΝΑ 71: COUNTERS ΚΑΙ Ο ΜΟΝΑΔΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, S3	141
ΕΙΚΟΝΑ 72: ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΣΕ ΚΥΛΙΟΜΕΝΑ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΑ	142
ΕΙΚΟΝΑ 73: ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ. ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΟΙ 2 ΞΕΧΩΡΙΣΤΟΙ ΧΩΡΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ.	143
ΕΙΚΟΝΑ 74: COUNTERS ΚΑΙ SECURITY AREAS ΕΝ ΩΡΑ "ΤΡΕΞΙΜΑΤΟΣ" ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	144

ΕΙΚΟΝΑ 75: Ο ΝΕΟΣ ΧΩΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΕΙ ΤΟΥΣ ΕΠΙΒΑΤΕΣ ΤΩΝ WW ΚΑΙ ΑΑ.....	145
ΕΙΚΟΝΑ 76: CHECKPOINTS 1&2 (S3) ΚΑΙ 1 (S4), ΠΡΩΙ ΚΥΡΙΑΚΗΣ	146
ΕΙΚΟΝΑ 77: ΤΑ ΙΔΙΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΕΝ ΩΡΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ, ΜΕΣΗΜΕΡΙ ΠΕΜΠΤΗΣ.	147

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΣΤΟ ARENA.....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΕΚΔΟΣΗΣ ΕΙΣΙΤΗΡΙΩΝ ΑΝΑ ΕΤΑΙΡΙΑ	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΡΥΘΜΟΣ ΑΦΙΞΗΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΑΝΑ ΩΡΑ	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΧΡΟΝΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΠΟΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ & ΚΟΣΤΟΣ.	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΠΙΒΑΤΕΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ – (T3-S3).....	105
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ – (T3-S3).....	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΔΕΙΚΤΕΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ – (T3-S3)	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ - (T3-S3)	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ – (T3-S3)	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ – (T3-S3)	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΧΡΕΩΣΗ ΑΝΑ ΕΤΑΙΡΙΑ – (T3-S3)	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣΗΣ ΕΚΔΟΤΗΡΙΩΝ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΑΥΞΗΣΗ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΤΑ 20%.....	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ - ΑΥΞΗΣΗ ΧΡΟΝΩΝ 20%	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΜΕΙΩΣΗ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΤΑ 20%	111
ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ - ΜΕΙΩΣΗ ΧΡΟΝΩΝ 20%	111
ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΔΕΙΚΤΕΣ - ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΕΛΙΤΕ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΠΟΡΟΥΣ	113
ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΡΟΣΕΛΕΥΣΗΣ – (T3-S3)	114
ΠΙΝΑΚΑΣ 21: ΠΟΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ - (T3,T4 - S3)	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 22: ΔΕΙΚΤΕΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ - (T3,T4 - S3).....	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 23: ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ - (T3,T4 - S3)	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 24: ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ - (T3,T4 - S3)	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 25: ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ - (T3,T4 - S3)	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 26: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ - (T3,T4-S3,S4).....	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 27: ΔΕΙΚΤΕΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ - (T3,T4-S3,S4)	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 28: ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ - (T3,T4-S3,S4)	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 29: ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ - (T3,T4-S3,S4)	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 30: ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ - (T3,T4-S3,S4)	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 31: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 32: ΧΡΕΩΣΗ ΑΝΑ ΕΤΑΙΡΙΑ - (T3,T4-S3,S4)	123
ΠΙΝΑΚΑΣ 33: ΟΙ 5 ΚΑΛΥΤΕΡΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΧΩΡΟΥ ΑΝΑΜΟΝΗΣ - (T3,T4-S3,S4)	124

ΠΙΝΑΚΑΣ 34: ΠΙΘΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣΗΣ ΕΚΔΟΤΗΡΙΩΝ - (T3,T4-S3,S4)	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 35: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗΣΗΣ ΕΚΔΟΤΗΡΙΩΝ - (T3,T4-S3,S4).....	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 36: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ 20%	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 37: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ 20%.....	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 38: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ 20%	127
ΠΙΝΑΚΑΣ 39: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΕΠΙΒΑΤΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΧΡΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ 20%	127
ΠΙΝΑΚΑΣ 40: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ / ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΕΛΙΤΕ - (T3,T4-S3,S4)	128
ΠΙΝΑΚΑΣ 41: ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ – 20% ΚΑΛΥΤΕΡΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΓΙΑ ΕΛΙΤΕ - (T3,T4-S3,S4)	128
ΠΙΝΑΚΑΣ 42: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΡΟΣΕΛΕΥΣΗΣ - (T3,T4-S3,S4).....	129

Μέρος Α'

*Προσομοίωση ως
εργαλείο της
Επιχειρησιακής Έρευνας.
Θεωρητική Προσέγγιση –
Εισαγωγή στο ARENA.*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Επιχειρησιακή Έρευνα

Ορισμός

Η Επιχειρησιακή Έρευνα αποτελεί ένα διεπιστημονικό κλάδο εφαρμοσμένων μαθηματικών και σύγχρονων επιστημών, που χρησιμοποιεί προχωρημένες αναλυτικές μεθόδους όπως τα μαθηματικά μοντέλα και η στατιστική ανάλυση, με απώτερο στόχο την βέλτιστη ή σχεδόν βέλτιστη επίλυση σύνθετων προβλημάτων αποφάσεων¹. Ασχολείται συχνά με την διερεύνηση του μεγίστου (κέρδους, απόδοσης) ή του ελαχίστου (κόστους, ρίσκου, απώλειας) ενός πραγματικού αντικειμενικού στόχου.

Η χαρακτηριστική της προσέγγιση συνίσταται στην ανάπτυξη επιστημονικού μοντέλου του υπό μελέτη συστήματος, που συχνά περιλαμβάνει μετρήσεις τυχαίων παραγόντων και με το οποίο προβλέπει και συγκρίνει τα αποτελέσματα εναλλακτικών αποφάσεων, στρατηγικών και ελέγχων. Σκοπός της είναι να βοηθήσει τη διοίκηση να καθορίσει την πολιτική και τις ενέργειές της επιστημονικά, κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.²

Ο όρος Επιχειρησιακή Έρευνα προκύπτει από τη μετάφραση του Αγγλικού όρου “Operational Research”, ή όπως έχει επικρατήσει στην Αμερική “Operations Research”. Παρατηρεί κανείς ότι ακριβέστερη μετάφραση θα ήταν “Λειτουργική Έρευνα”. Η προέλευση όμως του κλάδου (και κατά συνέπεια της ορολογίας) από τον στρατιωτικό τομέα, όπου οι κυριότερες λειτουργίες ονομάζονται επιχειρήσεις, οδήγησε στην υιοθέτηση και καθιέρωση στην ελληνική γλώσσα του όρου “Επιχειρησιακή Έρευνα”.

Ρίζες του κλάδου αναζητούνται στις αρχές του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, την περίοδο 1939 – 1940, όταν για πρώτη φορά έγινε εργασία στον τομέα που είναι σήμερα γνωστός ως Operational Research. Η ανάγκη προέκυψε από την ραγδαία εξέλιξη της στρατιωτικής τεχνολογίας στο διάστημα του μεσοπολέμου, σε σημείο που δεν μπορούσε πλέον να απορροφάται αποδοτικά από τις γνωστές τότε τακτικές και στρατηγικές διεξαγωγής πολέμου. Οι διοικούντες των ενόπλων δυνάμεων της Μεγάλης Βρετανίας στράφηκαν τότε προς τους επιστήμονες ζητώντας βοήθεια για

¹ <http://www.hsor.org/>

² (Ξηρόκωστας Δ. Α., 1999)

την επίλυση των (επιχειρησιακών) προβλημάτων τους. Δημιουργήθηκαν έτσι ομάδες επιστημόνων διαφόρων ειδικοτήτων που εντάχθηκαν στο Επιτελείο Αεροπορίας της Αγγλίας. Η επιτυχία των ομάδων αυτών έγινε γνωστή στους συμμάχους τότε ως “Operational Research”.

Συμπερασματικά, ο κλάδος της Επιχειρησιακής Έρευνας:

- Αναφέρεται σε προβλήματα λήψεως αποφάσεων και ελέγχου οργανωμένων ενεργιών (λειτουργούντων) συστημάτων.
- Δεν διεξάγεται σε εργαστήρια όπως η κλασική έρευνα, αλλά στο χώρο που υπάρχουν τα προβλήματα με συνεχή επαφή και συνεργασία με τα άτομα εκείνα που η επίλυσή τους τα αφορά άμεσα.
- Εφαρμόζει επιστημονική μεθοδολογία για την εκτίμηση της βέλτιστης λύσης των προβλημάτων. Βασικό εργαλείο είναι η ανάπτυξη μαθηματικού προτύπου ή μοντέλου.
- Υιοθετεί στη βάση του τη συστημική προσέγγιση, κατά την οποία η συμπεριφορά καθενός από τα μέρη ενός συστήματος επηρεάζει τη συμπεριφορά των άλλων μερών αλλά και του συνόλου του συστήματος.
- Έχει διεπιστημονικό χαρακτήρα, καθώς η εφαρμογή της διεξάγεται από μικτές ομάδες επιστημόνων διαφόρων ειδικοτήτων.

Πρότυπα – Μοντέλα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θεμελιώδες στοιχείο της Επιχειρησιακής Έρευνας είναι η απεικόνιση των υπό εξέταση συστημάτων με χρήση μοντέλων. Υπάρχουν πολλές διακρίσεις προτύπων ή μοντέλων που χρησιμοποιούνται στις διάφορες επιστημονικές μεθόδους. Μια από αυτές διαχωρίζει τα πρότυπα σε εικονικά, αναλογικά και συμβολικά.

Τα εικονικά πρότυπα αποτελούν πιστή κατά το δυνατόν αναπαράσταση, συνήθως σε μικρογραφία, του υπό μελέτη συστήματος. Π.χ. πρότυπα πλοίων δοκιμάζονται σε δεξαμενές, πρότυπα πτερυγίων αεροπλάνου δοκιμάζονται σε αεροδυναμικές σήραγγες κ.ά. Τα πρότυπα αυτά είναι πλέον ειδικευμένα ανά περίπτωση και επομένως πιο δύσχρηστα. Στα αναλογικά πρότυπα οι ιδιότητες του συστήματος αναπαρίστανται από άλλες ιδιότητες, λ.χ. υδραυλικά ανάλογα κυκλοφοριακών συστημάτων. Τα αναλογικά πρότυπα είναι γενικότερα, λιγότερο συγκεκριμένα και πιο εύχρηστα από τα εικονικά.

Τα συμβολικά πρότυπα τέλος χρησιμοποιούν γράμματα, αριθμούς και άλλα σύμβολα για την αναπαράσταση των μεταβλητών και σταθερών παραμέτρων ενός προβλήματος και της μεταξύ τους σχέσης. Συνήθως λαμβάνουν τη μορφή μαθηματικών σχέσεων και γι' αυτό ονομάζονται μαθηματικά πρότυπα ή μαθηματικά μοντέλα. Είναι τα πιο αφηρημένα και γενικά και κατά συνέπεια τα πιο εύχρηστα. Για το λόγο αυτό η Επιχειρησιακή Έρευνα χρησιμοποιεί κατά κόρον τα μαθηματικά μοντέλα (ή αλλιώς λογικά μοντέλα¹).

Μεθοδολογία της Επιχειρησιακής Έρευνας

Τα βασικά στάδια στα οποία μπορεί να διαχωριστεί ένα έργο – μελέτη επιχειρησιακής έρευνας είναι τα εξής:

1. Αναγνώριση του προβλήματος.
 - i. Μελέτη του συστήματος και διάγνωση του προβλήματος μέσα από συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.
 - ii. Προσδιορισμός στοιχείων του προβλήματος.
 - iii. Καθορισμός στόχων.
2. Κατασκευή μοντέλου
 - i. Επιλογή τρόπου μοντελοποίησης (βλ. σχετικά παρακάτω).
 - ii. Αναγνώριση επιπέδου λεπτομέρειας που απαιτείται στην αναπαράσταση.
3. Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλου.
 - i. Επαλήθευση μοντέλου (verification).
 - ii. Επικύρωση μοντέλου (validation).
4. Επίλυση μοντέλου.
5. Ανάλυση αποτελεσμάτων.
 - i. Δοκιμή λύσης.
 - ii. Τεκμηρίωση, αναφορά αποτελεσμάτων.
 - iii. Υλοποίηση λύσης.

Η έννοια καθενός από τα βήματα που αναφέρθηκαν συναρτάται άμεσα από την επιλογή μεθόδου μοντελοποίησης. Για το λόγο αυτό θα επεξηγηθούν αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας έκθεσης.

¹ (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

Μέθοδοι Μοντελοποίησης

Έχει αναπτυχθεί πληθώρα τρόπων μοντελοποίησης, καθένας από τους οποίους στοχεύει σε συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων. Η σημαντικότερη διάκριση τους διαχωρίζει σε ντετερμινιστικούς (deterministic) και στοχαστικούς (stochastic). Η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων έγκειται στη φύση των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος. Στους μεν ντετερμινιστικούς οι μεταβλητές είναι σταθεροί αριθμοί, ενώ στους στοχαστικούς ακολουθούν κάποια στατιστική κατανομή.

Σε ένα πραγματικό σύστημα είναι πρακτικά αδύνατο όλες οι μεταβλητές να έχουν σταθερή τιμή. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση μιας στατιστικής κατανομής με τη μέση τιμή της μπορεί να αποφέρει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις. Επιπλέον, η διαμόρφωση μοντέλων ντετερμινιστικών μεθόδων είναι σημαντικά ευκολότερη και για την επίλυσή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοινά πακέτα λογισμικού (Excel, Visual Basic κ.ά.). Χαρακτηριστικές τέτοιες μέθοδοι είναι οι εξής:

- Γραμμικός Προγραμματισμός
- Δυναμικός Προγραμματισμός
- Ακέραιος Προγραμματισμός
- Ανάλυση Δικτύων

Οι στοχαστικοί τρόποι μοντελοποίησης μπορούν αδιαμφισβήτητα να περιγράψουν με μεγαλύτερη ακρίβεια και πιστότητα ένα πραγματικό σύστημα. Ωστόσο η διαμόρφωση και ιδιαίτερα η επίλυση των μοντέλων είναι σημαντικά δυσκολότερες διαδικασίες. Εδώ υπεισέρχονται οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και απλουστεύουν τα πράγματα, αναλυτικότερη αναφορά όμως στην προσφορά τους περιέχεται στο επόμενο εδάφιο. Χαρακτηριστικές μέθοδοι στοχαστικής μοντελοποίησης είναι οι εξής:

- Δέντρα Αποφάσεων
- Αλυσίδες Markov
- Θεωρία Αναμονής
- Προσομοίωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μοντελοποίηση και επίλυση ενός πραγματικού προβλήματος σε περιβάλλον Rockwell ARENA, λογισμικό εξομοίωσης επιχειρηματικών μοντέλων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Προσομοίωση

Ορισμός

Ανακεφαλαιώνοντας κάποια πράγματα που ειπώθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο, αλλά και διευκρινίζοντας το τι θα εννοούμε στο εξής με τους όρους μοντέλο και προσομοίωση παρατίθενται οι ορισμοί:

«Μοντέλο ενός συστήματος ορίζεται μια περιγραφή του, η οποία παραμερίζει τις μη βασικές λεπτομέρειες και αναδεικνύει την ουσία, δηλαδή τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία του συστήματος που περιγράφει.»

«Προσομοίωση ενός συστήματος είναι η μεθοδολογία εκείνη μέσω της οποίας μελετάται ένα σύστημα με βάση την παρατήρηση της απόκρισης / συμπεριφοράς ενός μοντέλου του σε τεχνητώς παραγόμενες εισόδους (inputs).»¹

Ως κλάδος της επιχειρησιακής έρευνας η προσομοίωση διατηρεί όλα τα βασικά χαρακτηριστικά της. Η ουσία της μελέτης ενός συστήματος είναι η μοντελοποίηση του. Περιορισμοί ως προς τη φύση του μοντέλου θεωρητικά δεν υπάρχουν, άλλωστε υπάρχουν πειράματα με φυσικά μοντέλα που έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικά. Στον κλάδο των εστιατορίων fast food για παράδειγμα, πολλές από τις μεγάλες αλυσίδες διαθέτουν από ένα φυσικό αντίγραφο των εστιατορίων τους όπου δοκιμάζουν εναλλακτικές διαδικασίες εξυπηρέτησης. Ωστόσο τα φυσικά μοντέλα παρουσιάζουν αυξημένο κόστος και δυσχρησία. Αντιθέτως, τα μαθηματικά μοντέλα και κυρίως αυτά που υλοποιούνται σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές αποτελούν πλέον την πιο διαδεδομένη μορφή προσομοίωσης.

Μολονότι η αρχή της εξομοίωσης δεν στηρίζεται στην ύπαρξη ηλεκτρονικού υπολογιστή, η ανάπτυξη και ραγδαία εξέλιξη των Η/Υ (όσον αφορά την ταχύτητα και το χαμηλό κόστος απόκτησής τους) είναι αυτή που κατέστησε την προσομοίωση ένα πρακτικό εργαλείο ανάλυσης. Η εξομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή αναφέρεται λοιπόν σε μεθόδους μελέτης μιας πληθώρας μοντέλων πραγματικών συστημάτων με χρήση ποσοτικών (αριθμητικών) εκτιμήσεων, μέσω ενός πακέτου λογισμικού σχεδιασμένο να μπορεί να μιμηθεί χαρακτηριστικά και διαδικασίες των συστημάτων, συχνά σε βάθος χρόνου. Από πρακτικής άποψης, η προσομοίωση είναι η διαδικασία του σχεδιασμού και δημιουργίας ενός υπολογιστικού μοντέλου ενός ρεαλιστικού συστήματος με απώτερο σκοπό την διεξαγωγή αριθμητικών πειραμάτων που θα

¹ (Ξηρόκωστας, Πολύζος, & Παπακωνσταντίνου, 2005)

δώσουν μια πληρέστερη εικόνα της συμπεριφοράς του για ένα σύνολο συγκεκριμένων συνθηκών. Αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη απλών προβλημάτων, το πραγματικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής διαφαίνεται όταν επιστρατεύεται για την μελέτη πολύπλοκων συστημάτων.

Σίγουρα η εξομοίωση δεν είναι το μόνο εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ενός συστήματος. Η δυνατότητα όμως των υπολογιστικών μοντέλων να γίνουν σημαντικά πολύπλοκα αν υπάρχει απαίτηση ακριβούς αναπαράστασης του συστήματος και να το αναλύουν ικανοποιητικά, καθιστά την εξομοίωση την δημοφιλέστερη επιλογή τα τελευταία χρόνια.

Η Ανάγκη για Εξομοίωση

Συστήματα πολύπλοκα, πολυάριθμα, σε συνεχή αλληλεπίδραση δομούν τη σημερινή κοινωνία και γεννούν κάθε οικονομική δραστηριότητα. Η εξέλιξη καθιστά την εξάρτηση από άλλα συστήματα πιο επιτακτική, την ανάλυσή τους δυσχερή και τα φυσικά τους όρια δυσδιάκριτα.

Ένα εργοστάσιο για παράδειγμα αποτελεί ένα πολύπλοκο σύστημα της παραγωγικής διαδικασίας. Περιλαμβάνει μηχανές, εργαζομένους, μεταφορικές ταινίες, περονοφόρα, αποθήκες. Εξαρτάται από τους προμηθευτές, από τους αγοραστές ακόμα και από τις εταιρίες παροχής τεχνικής υποστήριξης σε εξοπλισμό και υπολογιστικά συστήματα που μπορεί να διαθέτει. Στον τομέα των υπηρεσιών, ένα νοσοκομείο απαρτίζεται από ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό, εγκαταστάσεις (χειρουργεία, δωμάτια) και ιατρικά μηχανήματα, αλληλεπιδρά όμως και με φαρμακευτικές εταιρίες προμήθειας φαρμάκων και εξαρτάται από αυτές. Τα παραδείγματα είναι αναρίθμητα, απαντώνται δε σε όλες τις πτυχές του σύγχρονου πολιτισμού.

Οι διοικητές, επιχειρηματίες, διευθυντές και κάθε λογής υπεύθυνοι προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τα συστήματα αυτά, να αυξήσουν την απόδοση, να ελαχιστοποιήσουν το κόστος ή και πολλές φορές να τα σχεδιάσουν προτού υλοποιηθούν. Συνεπώς οι αναλυτές καλούνται να μελετήσουν τέτοια συστήματα και να διερευνήσουν την συμπεριφορά τους ώστε να καταστεί ευκολότερη – ασφαλέστερη η λήψη αποφάσεων και η θέσπιση στόχων σε διοικητικό επίπεδο. Συχνά η μελέτη επιβάλλει πειραματισμό με το σύστημα και την λειτουργία του. Κάποιες φορές αυτό είναι εφικτό με αποδεκτό κόστος. Σε ένα πολυκατάστημα για

παράδειγμα, ο διευθυντής μπορεί να πειραματιστεί με την κατανομή του ανθρώπινου δυναμικού ώστε να καλύπτονται αποτελεσματικότερα οι ώρες αιχμής της εβδομάδος.

Τις περισσότερες όμως φορές είναι εξαιρετικά δύσκολο, απαγορευτικά πολυέξοδο, ή εξ ορισμού αδύνατο να εφαρμοστούν πειραματισμοί στο σύστημα:

- Προφανώς δεν μπορεί να πειραματιστεί κανείς με τη διαρρύθμιση ενός εργοστασίου αν αυτό δεν έχει χτιστεί ακόμη.
- Ακόμα και σε ένα υπάρχον εργοστάσιο, το κόστος μετάβασης σε μια νέα, πειραματική διαρρύθμιση είναι τεράστιο, και η επιτυχία του δεν είναι εγγυημένη.
- Η δοκιμή μιας νέας διαδικασίας check-in στο αεροδρόμιο πιθανότατα θα προκαλέσει έναν μεγάλο αριθμό εκνευρισμένων ανθρώπων που έχασαν την πτήση τους, αν προκύψουν απρόβλεπτα προβλήματα.
- Θα ήταν μάλλον δύσκολο να φέρει κανείς διπλάσιο αριθμό πελατών σε μια τράπεζα για να μελετήσει την επίδραση του κλεισίματος του γειτονικού υποκαταστήματος.
- Πειραματισμός με τα ωράρια και της βάρδιες του προσωπικού ενός τμήματος επειγόντων περιστατικών νοσοκομείου απλά δεν γίνεται.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, υπεισέρχεται η μοντελοποίηση και προσομοίωση συστημάτων για να εξυπηρετήσουν στην μελέτη και ανάλυση αυτών. Ο αναλυτής μπορεί να βρει απαντήσεις σε ερωτήματα της φύσης «Ποια η επίπτωση στο σύστημα αν γινόταν αυτό ή εκείνο;», «Ποια η αντίδραση του συστήματος αν μια κατάσταση πέρα του ελέγχου μας προέκυπτε;». Με την εξομοίωση μοντέλων κανείς δεν επηρεάζεται, κανείς δεν πληγώνεται (κυριολεκτικά) και η ελευθερία δοκιμών και πειραματισμών είναι απεριόριστη. Αν αναλογιστεί κανείς τα προτερήματα της εφαρμογής αυτής της διαδικασίας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή – ευκολία χρήσης, ταχύτητα υπολογισμών, οπτική αναπαράσταση – καταλαβαίνει γιατί η προσομοίωση είναι από τις δημοφιλέστερες επιλογές ανάλυσης συστημάτων.

Τομείς Εφαρμογής Προσομοίωσης

Στο σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον με τις αυτοματοποιημένες μονάδες παραγωγής και εξυπηρέτησης, η διαδικασίες του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης των μονάδων καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία μιας επιχειρηματικής επένδυσης. Οι παραδοσιακές σχεδιαστικές και αναλυτικές μέθοδοι έχουν αποδειχθεί ανεπαρκείς στη μελέτη πολύπλοκων διαδικασιών παραγωγής και

παροχής υπηρεσιών. Οι περισσότεροι οργανισμοί και εταιρίες στρέφονται στην προσομοίωση ως εργαλείο για δυναμική ανάλυση του συστήματος στη φάση του σχεδιασμού. Το ρίσκο και το κόστος είναι συνήθως πολύ μεγάλα για να παραβλέψουν αυτήν την τακτική. Παράλληλα, επειδή μεγάλη πλειοψηφία των συστημάτων μπορεί να προσομοιωθεί, τα πεδία στα οποία εφαρμόζονται τεχνικές της εξομοίωσης καλύπτουν μεγάλο φάσμα των διαδικασιών της σύγχρονης κοινωνίας. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Στη Βιομηχανία. Συστήματα διαχείρισης υλικών, γραμμές παραγωγής, αυτοματοποιημένες εγκαταστάσεις, διαχείριση αποθεμάτων, σχεδιασμός συστημάτων και μηχανών και ανάλυση αξιοπιστίας.
- Στις Επιχειρήσεις. Πολιτικές κοστολόγησης, στρατηγικές προώθησης, αναλύσεις χρηματοροών, logistics, forecasting και διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού.
- Στα Ηλεκτρονικά Συστήματα. Hardware και λογισμικό, ανάλυση δικτύων, δομή και διαχείριση βάσεων δεδομένων, ανάλυση πληροφοριών (information processing).
- Στις Βιοεπιστήμες. Ανάλυση και έλεγχος επιδημιών, μελέτες βιοϊατρικής και βιολογικής ζωής, ακόμα και ανάλυση επιδόσεων αθλητών.
- Στην Πολιτική. Πρόγνωση πληθυσμιακών χαρακτηριστικών, διαχείριση συστημάτων περιβάλλουσας, δικτύων υδροδότησης και ελέγχου κυκλοφορίας. Εξομοίωση χρησιμοποιείται ακόμα και σε στρατιωτικές επιχειρήσεις, όπως η μελέτη και ανάλυση οπλικών συστημάτων και στρατηγικών.
- Στην Οικολογία. Έλεγχος απορριμμάτων και μολύνσεων, πρόγνωση καιρού, ανάλυση σεισμών και ακραίων φυσικών φαινομένων.
- Στην Κοινωνιολογία τέλος, όπου η μελέτη κοινωνικών δομών αλλά και ακραίων κοινωνικών φαινομένων αποτελούν εκ φύσεως στοχαστικά συστήματα, με την προσομοίωση να αποτελεί ένα από τα λίγα επιστημονικά εργαλεία ανάλυσης αυτών.

Πως γίνεται η Εξομοίωση

Με το χέρι – το Πείραμα του Monte Carlo

Η πρώτη ιστορικά απόπειρα εξομοίωσης έγινε το 1733 από τον Γάλλο νατουραλιστή Georges Louis Leclerc. Το πρόβλημα της βελόνας του Buffon, όπως διατυπώθηκε τότε, αποτέλεσε μια (επιτυχημένη) απόπειρα μέτρησης του αριθμού π με συνδυασμό προσομοίωσης και αναλυτικών μεθόδων. Μια βελόνα μήκους α

ρίχνεται τυχαία σε επίπεδο όπου έχουν χαραχθεί παράλληλες γραμμές σε απόσταση d μεταξύ τους ($d < a$). Η πιθανότητα να τέμνει η βελόνα μια γραμμή προκύπτει από αναλυτικές μεθόδους ίση με:

$$p = \frac{2a}{\pi d}$$

Ο κόμης του Buffon (τίτλος ευγενείας που του αποδόθηκε αργότερα), εκτελώντας το πείραμα αυτό, υπολόγισε την πιθανότητα p από τη συχνότητα του γεγονότος στο σύνολο των παρατηρήσεών του και κατ' επέκταση, την τιμή του π . Η έξοχη αυτή ιδέα προσέγγισης ενός ντετερμινιστικού μεγέθους από τα δεδομένα ενός τυχαίου πειράματος έγινε μια πρακτική μεθοδολογία. Πολύ αργότερα, κατά την ανάπτυξη της ατομικής βόμβας, η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική ισοδυναμία ολοκληρωμάτων και ονομάστηκε πείραμα του Monte Carlo, όπως και έμεινε γνωστή μέχρι σήμερα¹.

Προγραμματισμός σε κοινές Γλώσσες

Με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών τις δεκαετίες του '50 και '60, άρχισε η δημιουργία προγραμμάτων σε κοινές (γενικής χρήσης) γλώσσες προγραμματισμού, όπως η FORTRAN. Αυτή η προσέγγιση παρείχε μεγάλη προσαρμοστικότητα και ευελιξία, αλλά παράλληλα η διαδικασία ανάπτυξης των μοντέλων (που τότε εγγράφονταν σε κάρτες) ήταν σχοινοτενής και επιρρεπής σε λάθη.

Σημερινός απόγονος αυτής της μεθοδολογίας είναι η συχνή χρήση κοινών λογισμικών spreadsheet (όπως το Excel) για την εκτέλεση εξομοίωσης σε απλά, συνήθως στατικά, μοντέλα. Στη συντριπτική πλειοψηφία των δυναμικών μοντέλων όμως, η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων χαρακτηρίζεται, στην καλύτερη περίπτωση, ως ένας αδόκιμος τρόπος εξομοίωσης.

Γλώσσες Προσομοίωσης

Γλώσσες προγραμματισμού ειδικά σχεδιασμένες για την εξομοίωση μοντέλων έκαναν την εμφάνισή τους αρκετά αργότερα. GPSS, Simscript, SLAM και SIMAN ήταν κάποιες από αυτές, και προσέφεραν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τις εφαρμογές των περισσοτέρων χρηστών. Οι γλώσσες αυτές έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλείς και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Παρόλα αυτά, απαιτείται

¹ (Ξηρόκωστας, Πολύζος, & Παπακωνσταντίνου, 2005)

αρκετός χρόνος και προσπάθεια για την εκμάθησή τους ώστε να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά.

Εξομοιωτές Υψηλού Επιπέδου

Τέλος, στο πρόσφατο παρελθόν, αναπτύχθηκαν αρκετές πλατφόρμες υψηλού επιπέδου «εξομοιωτών» που ήταν πολύ φιλικές στο χρήστη. Με τον όρο υψηλό επίπεδο προγράμματος εξομοίωσης εννοούμε μια ενιαία γραφική διεπιφάνεια (interface) που παρέχει στο χρήστη έτοιμα βασικά δομικά στοιχεία ενός μοντέλου. Ο χρήστης επεξεργάζεται τις ιδιότητες τους μέσα από πλαίσια διαλόγων και μενού, τα συνδέει μεταξύ τους και τρέχει το μοντέλο με παράλληλη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης αυτών. Στον αντίποδα, πολλά από αυτά τα προγράμματα έχουν περιορισμούς στην ελευθερία προγραμματισμού, έχοντας επίπτωση ενδεχομένως στην ακρίβεια του μοντέλου.

Ιστορική αναδρομή

Με την δραματική αύξηση τα τελευταία 40 με 50 χρόνια των δυνατοτήτων των γλωσσών εξομοίωσης και των λογισμικών πακέτων που τις εμπεριέχουν, άλλαξε πλήρως και η αντίληψη όσον αφορά το πότε και πώς χρησιμοποιείται η προσομοίωση.

Κατά τις δεκαετίες του '50 και '60, οι περιορισμένες δυνατότητες των Η/Υ και οι τεχνικές δυσκολίες στον προγραμματισμό καθιστούσαν την προσομοίωση ένα απαγορευτικού κόστους εργαλείο. Μοντέλα προσομοίωσης σε υπολογιστή χρησιμοποιούνταν κυρίως από μεγάλες πολυεθνικές αεροπλοΐας και διαστημικών αποστολών, καθώς και βιομηχανίες ατσαλιού. Ανατέθηκε από τους οργανισμούς αυτούς σε επιστήμονες η δημιουργία πολύπλοκων μοντέλων εξομοίωσης, χρησιμοποιώντας τις τότε διαθέσιμες γλώσσες προγραμματισμού. Τα μοντέλα αυτά “έτρεχαν” σε γιγαντιαία mainframes υπολογιστών, με το κόστος χρήσης να αγγίζει μέχρι και τα 1.000 δολάρια την ώρα.

Τη δεκαετία του '70 οι υπολογιστές βελτιώθηκαν σημαντικά, με αποτέλεσμα η προσομοίωση να χρησιμοποιηθεί από μεγαλύτερο φάσμα εταιριών και βιομηχανιών. Συνήθως όμως δεν χρησιμοποιούνταν παρά μόνο μέχρι να γίνει κάποια καταστροφή, με σκοπό την εύρεση των αιτιών και την απόδοση ευθυνών.

Η δεκαετία του '80 χαρακτηρίζεται από την εξάπλωση των προσωπικών υπολογιστών, τη χρήση γραφικών στον προγραμματισμό και την οπτική

αναπαράσταση των μοντέλων. Πλέον, η χρήση της εξομοίωσης ως εργαλείο ανάλυσης κρίσεων αλλά και σχεδιασμού συστημάτων καθιερώθηκε από πολλές εταιρίες και βιομηχανίες ενώ λίγο αργότερα, αποτέλεσε προϋπόθεση για την έγκριση μεγάλων επενδύσεων από πολλούς οργανισμούς.

Ο κλάδος της προσομοίωσης άρχισε να ωριμάζει τη δεκαετία του '90. Μικρές εταιρίες την χρησιμοποιούν και αναγνωρίζεται πλέον ως σημαντικό εργαλείο ανάλυσης. Πρόσφατα εισήλθε στον τομέα των υπηρεσιών και εξυπηρέτησης, βρίσκοντας εφαρμογή σε πολλά μη παραδοσιακά (για την εξομοίωση) προβλήματα. Η εξάπλωσή της συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, αν και δεν αποτελεί ακόμα τυπικό εργαλείο που απαντάται σε όλους τους Η/Υ των επιχειρήσεων και εταιριών.

Ίσως αυτό που επιβραδύνει την διάδοση και την εγκαθίδρυση της προσομοίωσης ως ένα καθολικό εργαλείο ανάλυσης είναι οι χρονικές απαιτήσεις για την μοντελοποίηση, αλλά και οι ικανότητες που απαιτούνται για την επιτυχία αυτής.¹ Άλλωστε, η μοντελοποίηση ενός συστήματος είναι περισσότερο “τέχνη”, παρά “επιστήμη”, απαιτεί στοχασμό και μελέτη στο ζύγισμα μεταξύ: της ποσότητας των λεπτομερειών που θα περιληφθούν στο μοντέλο, και της απλότητας αυτού².

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Αξιολογώντας την προσομοίωση ως τεχνική ανάλυσης της επιχειρησιακής έρευνας αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της.

- Ο πειραματισμός σε μικρό χρονικό διάστημα αποτελεί σίγουρα ένα πλεονέκτημα της εξομοίωσης. Τα πειράματα, χάρη στις επιδόσεις των Η/Υ, πραγματοποιούνται πολύ συντομότερα από ότι αντίστοιχα σε φυσικά μοντέλα. Η εκτέλεση ενός μοντέλου (τρέξιμο) που αναπαριστά λειτουργία γραμμής παραγωγής για έναν ολόκληρο χρόνο είναι μόλις θέμα ωρών.
- Δεν προϋποθέτει ισχυρό μαθηματικό υπόβαθρο από πλευράς μελετητή για την ανάλυση συστημάτων σε αντίθεση με άλλες τεχνικές, όπως η θεωρία αναμονής. Σε κάθε περίπτωση βέβαια οι απαιτούμενες γνώσεις είναι ανάλογες της πολυπλοκότητας του μοντέλου.
- Τα παραγόμενα μοντέλα επιδεικνύονται εύκολα. Η αναπαράστασή τους γίνεται με λογικά διαγράμματα αλλά και γραφικά, χάρη στην τελειοποίηση

¹ (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

² (Ξηρόκωστας, Πολύζος, & Παπακωνσταντίνου, 2005)

λογισμικών ανωτέρου επιπέδου προγραμματισμού μοντέλων. Το σημαντικό όφελος από το γεγονός αυτό είναι η ευκολία στην κατανόηση από μεριάς διοικητικού προσωπικού, το οποίο και αφορά σε τελική ανάλυση η μελέτη ενός συστήματος.

Βέβαια, καμία μέθοδος – γνωστή ως τώρα τουλάχιστον – δεν αποτελεί πανάκεια στην ανάλυση συστημάτων. Έτσι και στην εξομοίωση, υπάρχουν κάποια σημεία η άγνοια των οποίων μπορεί να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα.

- Τα αποτελέσματα δεν μπορεί να είναι αξιόπιστα όταν τα δεδομένα εισόδου είναι ανακριβή. Ισχύει ο κανόνας GIGO (Garbage In Garbage Out). Επομένως, όσο ακριβές και να είναι ένα μοντέλο, αν τα στοιχεία που το τροφοδοτούν είναι αναξιόπιστα δεν θα αποδώσει αληθή αποτελέσματα για το υπό μελέτη σύστημα.
- Επειδή τα πραγματικά συστήματα επηρεάζονται από απρόβλεπτα και τυχαία γεγονότα, πολλά μοντέλα περιλαμβάνουν στοχαστικές τιμές εισόδου, με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι αντίστοιχα τυχαία. Συνεπώς πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό και την ανάλυση πειραμάτων προσομοίωσης ώστε να ληφθεί υπόψη αυτή η αβεβαιότητα, ειδικά αν ο χρονικός ορίζοντας εκτέλεσής τους είναι μικρός.
- Η εξομοίωση δεν δίνει απλές απαντήσεις σε πολύπλοκα ερωτήματα. Επεξηγώντας την πρόταση αυτή, πολλοί εσφαλμένα πιστεύουν ότι οι προσομοίωση μπορεί να δώσει εύκολη λύση σε οποιοδήποτε πρόβλημα, όσο πολύπλοκο και αν είναι αυτό. Στην πραγματικότητα, η λύση είναι σπανίως μοναδική και ευδιάκριτη. Είναι στην ευχέρεια του μελετητή να αναλύσει όλους τους πιθανούς τρόπους που βελτιστοποιούν ένα σύστημα και να τους παρουσιάσει με την ανάλογη τεκμηρίωση.
- Η εξομοίωση δεν λύνει προβλήματα από μόνη της, σε αντίθεση με την πεποίθηση πολλών στελεχών. Αποτελεί ένα εργαλείο μελέτης και εφαρμογής πολλαπλών σεναρίων σε ένα σύστημα και δεν αρκεί απλώς η μοντελοποίηση και το «τρέξιμο» του μοντέλου για να επιλυθεί το πρόβλημα.

Διάκριση Μοντέλων Εξομοίωσης

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι κατηγοριοποίησης των μοντέλων εξομοίωσης, οι κυριότεροι από τους οποίους παρουσιάζονται συνοπτικά.

- *Στατικά και Δυναμικά μοντέλα:* Η μεταξύ τους διαφορά είναι η επίδραση του χρόνου. Στα στατικά μοντέλα ο χρόνος είναι ανύπαρκτος. Τα μοντέλα σε μελέτες επιχειρησιακής έρευνας (και κατ' επέκταση προσομοίωσης) είναι κατά κανόνα δυναμικά.
- *Μοντέλα Συνεχούς και Μοντέλα Διακριτού Χρόνου:* Σε ένα μοντέλο συνεχούς χρόνου (continuous model), η κατάσταση του συστήματος μπορεί να αλλάζει συνεχώς σε βάθος χρόνου. Αντιθέτως στα μοντέλα διακριτού χρόνου (discrete models) οι αλλαγές καταστάσεων συμβαίνουν μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές. Η συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων απεικονίζονται σε μοντέλα διακριτού χρόνου. Πάντως, σε ένα μοντέλο μπορούν να συνυπάρχουν συνεχής και διακριτά υπομοντέλα.
- *Ντετερμινιστικά και Στοχαστικά:* Όπως σχολιάσθηκε και νωρίτερα, τα μοντέλα δίχως τυχειότητα στις εισόδους τους είναι ντετερμινιστικά, ενώ αυτά που οι εισοδοί τους είναι μεταβλητές, στοχαστικά. Οι δυνατότητες των πειραμάτων προσομοίωσης αξιοποιούνται καλύτερα σε στοχαστικά μοντέλα.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάλυση ενός πραγματικού στοχαστικού συστήματος σε μοντέλο διακριτού χρόνου. Σημειώνεται ότι οι όροι προσομοίωση και εξομοίωση έχουν ταυτόσημη έννοια, που προκύπτει από τη μετάφραση του αγγλικού όρου “simulation”, και στο εξής αναφέρονται σε εξομοίωση διακριτού χρόνου¹ σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, εκτός αν διευκρινιστεί αλλιώς.

¹ Εξομοίωση Διακριτού Χρόνου: Discrete Event Simulation (DES).

ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Θεωρία Ουρών Αναμονής (Queuing Theory)

Ορισμός

Η θεωρία ουρών είναι η μελέτη των γραμμών αναμονής (waiting lines). Γραμμές αναμονής υπάρχουν σε κάθε περίπτωση της ζωής μας, είτε σε ένα κατάστημα που περιμένουν πελάτες να πληρώσουν στο ταμείο, είτε σε μια τράπεζα που περιμένουν πελάτες να καταθέσουν χρήματα, είτε σε ένα αεροδρόμιο που περιμένουν αεροπλάνα να απογειωθούν. Οι τρεις βασικές συνιστώσες μιας διαδικασίας ουρών είναι οι αφίξεις, τα μέσα εξυπηρέτησης και η πραγματική γραμμή εξυπηρέτησης.

Ουρές αναμονής υπάρχουν σε όλα σχεδόν τα μοντέλα προσομοίωσης. Αν και η θεωρία αναμονής αποτελεί ξεχωριστή προσέγγιση στην επίλυση των προβλημάτων αναμονής, στοιχεία αυτής απαντώνται σε πολλά λογισμικά προσομοίωσης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της, ενώ διαπιστώνονται οι συγγένειες και οι διαφορές στην εφαρμογή της στα προβλήματα προσομοίωσης.

Κόστος Γραμμών Αναμονής

Ένας από τους κύριους στόχους της ανάλυσης των γραμμών αναμονής είναι να βρεθεί το καλύτερο δυνατό επίπεδο εξυπηρέτησης. Ο σκοπός των διευθυντών μιας επιχείρησης είναι η εξασφάλιση της χρυσής τομής – του αποδοτικότερου συμβιβασμού δηλαδή – μεταξύ δύο άκρων. Από τη μια, η πρόσληψη πολλών υπαλλήλων και η παροχή ευκολιών εξυπηρέτησης, και, από την άλλη, η επιχείρηση να έχει ελάχιστο αριθμό ευκολιών και να διατηρεί το κόστος χαμηλό. Η επίπτωση της δεύτερης επιλογής θα είναι η δυσαρέσκεια των πελατών για το επίπεδο εξυπηρέτησης. Συνεπώς πρέπει να εξασφαλισθεί μια ισορροπία μεταξύ του σκοπού εξασφάλισης χαμηλού κόστους και της εξασφάλισης επαρκούς αριθμού ευκολιών εξυπηρέτησης για την ικανοποίηση των πελατών.

Το συνολικό αναμενόμενο κόστος μιας ουράς αναμονής είναι το άθροισμα των αναμενόμενων δαπανών εξυπηρέτησης και των αναμενόμενων δαπανών αναμονής σε αυτή¹.

¹ (Φράγκος, 2006)

Δαπάνες εξυπηρέτησης θεωρούνται όλα εκείνα τα κόστη που είναι απαραίτητα για την εξυπηρέτηση της μονάδας που εισέρχεται στο σύστημα. Μπορεί να είναι μισθοί υπαλλήλων ή και λειτουργικά έξοδα (ρεύμα, χαρτί, κόστος χρήσης εξοπλισμού κ.ά.). Δαπάνες αναμονής προκύπτουν από την αναμονή των στοιχείων του συστήματος στην ουρά. Μπορεί να είναι κόστη αποθήκευσης αν πρόκειται για υλικά αγαθά, κόστη δημιουργίας του συστήματος αναμονής (για φυσικά πρόσωπα) όπως καρέκλες, διάδρομοι, μηχάνημα έκδοσης αριθμημένων χαρτιών προτεραιότητας, αλλά και το κόστος καθυστέρησης της μονάδας στην ουρά αναμονής. Δεν πρέπει τέλος να παραλείπεται το κόστος για κάθε χαμένη μονάδα που είτε το επιλέγει, είτε δεν είναι δυνατό λόγω πληρότητας να εισέλθει στο σύστημα αναμονής. Όλα τα παραπάνω κόστη πρέπει να προσμετρούνται για τον υπολογισμό του συνολικού αναμενόμενου κόστους μιας ουράς αναμονής.

Βασικά Μέρη ενός Συστήματος Γραμμής Αναμονής

Αφίξεις

Οι αφίξεις σε ένα σύστημα αναμονής χαρακτηρίζονται από το μέγεθος, το πρότυπο αφίξεων και τη συμπεριφορά τους.

Το μέγεθος των αφίξεων είναι είτε άπειρο είτε πεπερασμένο. Το πλήθος αυτοκινήτων που φθάνουν σε ένα σταθμό διοδίων μπορεί να θεωρηθεί άπειρο, το ίδιο και οι πελάτες που θα προσέλθουν σε ένα σουπερ μάρκετ για να ψωνίσουν. Οι χαλασμένες μηχανές ενός εργοστασίου από την άλλη που αναμένουν επισκευή αποτελούν ένα πεπερασμένο μέγεθος.

Οι αφίξεις σε ένα σύστημα γίνονται είτε κατά σταθερό, είτε κατά τυχαίο τρόπο. Οι αφίξεις θεωρούνται τυχαίες όταν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και δεν μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς πότε θα συμβεί η επόμενη. Συνήθης υπόθεση είναι ότι οι αφίξεις ακολουθούν την κατανομή πιθανότητας Poisson.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά των αφίξεων, η θεωρία ουρών υποθέτει ότι οι πελάτες που καταφθάνουν σε μια ουρά αναμονής είναι υπομονετικοί, δεν αλλάζουν γραμμές και δεν μπαίνουν αυθαίρετα μπροστά σε άλλους πελάτες που έχουν φθάσει προηγουμένως.

Γραμμή Αναμονής

Τα αναλυτικά μοντέλα αναμονής που χρησιμοποιεί η θεωρία ουρών υποθέτουν ότι οι γραμμές αναμονής έχουν άπειρο μήκος.

Παράλληλα, κάθε ουρά αναμονής χαρακτηρίζεται από έναν κανονισμό (queue discipline). Ο κανονισμός γραμμής αναμονής είναι ο κανόνας σύμφωνα με τον οποίο οι πελάτες που βρίσκονται στην ουρά αναμονής θα τύχουν εξυπηρέτησης. Τα περισσότερα συστήματα γραμμών αναμονής χρησιμοποιούν τον εξής κανόνα: Ο πρώτος πελάτης που έρχεται, αυτός (ο πρώτος) εξυπηρετείται και εξέρχεται από το σύστημα – First In, First Out (FIFO). Ο κανονισμός αυτός δεν είναι κατάλληλος για όλα τα συστήματα υπηρεσιών, για το λόγο αυτό υπάρχουν και πολλοί άλλοι εναλλακτικοί (LIFO, ανάθεση προτεραιότητας κ.ά.).

Εγκαταστάσεις Εξυπηρέτησης

Όσον αφορά τα σημεία παροχής υπηρεσιών (σημείων εξυπηρέτησης), η θεωρία ουρών μελετάει κυρίως τη διάταξη της εγκατάστασης και την κατανομή πιθανότητας των χρόνων εξυπηρέτησης.

Σε ένα σύστημα αναμονής υπάρχει ένας αριθμός ανθρώπων ή μηχανών που παρέχουν την υπηρεσία που επιζητούν οι πελάτες (ή, γενικότερα, οι οντότητες) που εισέρχονται σε αυτό. Επίσης υπάρχει ένας αριθμός τύπων σταθμών εξυπηρέτησης, παραδείγματος χάρη ένας πελάτης πρώτα αναζητά πληροφορίες από τον αρμόδιο υπάλληλο στη γραμματεία και μετά προβαίνει στο ταμείο για να πληρώσει, όπου εξυπηρετείται από άλλο υπάλληλο. Τα διάφορα συστήματα αναμονής ταξινομούνται με βάση τον αριθμό σημείων εξυπηρέτησης (servers, channels) και των αριθμό τύπων εξυπηρέτησης (phases). Το απλούστερο σύστημα είναι αυτό τις μίας φάσης, στο οποίο ο πελάτης εξυπηρετείται σε έναν μόνο σταθμό εξυπηρέτησης πριν εξέλθει από το σύστημα.

Οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι, σε πολλές περιπτώσεις, μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την αρνητική εκθετική κατανομή πιθανότητας (negative exponential distribution). Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που οι χρόνοι αφίξεων πελατών ακολουθούν την κατανομή πιθανότητας Poisson. Μια από τις απλούστερες και πιο δημοφιλείς ουρές της θεωρίας αναμονής είναι η $M/M/1$ ¹. Το πρώτο «M» υποδηλώνει ότι ο ρυθμός άφιξης είναι Μαρκοβιανός, οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων είναι δηλαδή

¹ Συμβολισμός D.G. Kendall για την ταυτοποίηση μοντέλων γραμμών αναμονής, βλ. (Φράγκος, 2006)

ανεξάρτητοι και ανήκουν στην ίδια στατιστική κατανομή. Το δεύτερο «M» συμβολίζει την κατανομή των χρόνων εξυπηρέτησης, που είναι επίσης εκθετική στην προκειμένη περίπτωση. Το «1» αναφέρεται στον αριθμό σημείων εξυπηρέτησης.

Σχόλια – Αποτίμηση

Το θετικό με την θεωρία ουρών είναι ότι μπορούμε να έχουμε ποσοτικά αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά των ουρών μέσα από εύκολα υλοποιήσιμες σχέσεις. Για παράδειγμα, ο μέσος χρόνος αναμονής σε μια ουρά δίνεται¹:

$$\frac{\mu_s^2}{\mu_A - \mu_s}$$

Όπου μ_A είναι η αναμενόμενη τιμή της κατανομής ενδιάμεσου χρόνου αφίξεων και μ_s , η αντίστοιχη τιμή του χρόνου εξυπηρέτησης (υποθέτοντας φυσικά ότι $\mu_A > \mu_s$).

Μια σκέψη είναι λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία ουρών αναμονής για την επίλυση όλων των προβλημάτων αναμονής. Σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να βοηθήσει στην απόκτηση επίγνωσης μέσω πολύ απλών εξισώσεων. Μια τέτοια προσέγγιση όμως, μπορεί πολλές φορές να επιφέρει εκτιμήσεις πολύ διαφορετικές από τις πραγματικές, και να οδηγήσει σε εσφαλμένες συγκρίσεις:

- Οι εκτιμήσεις των χρόνων στη σχέση του παραδείγματος δεν είναι ακριβείς. Θα υπάρχει επομένως σφάλμα στο αποτέλεσμα.
- Οι υποθέσεις για την ισχύ της παραπάνω σχέσης, για εκθετικές κατανομές ενδιάμεσων χρόνων και χρόνου εξυπηρέτησης δεν εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση. Υπάρχουν και άλλες, πιο ολοκληρωμένες μορφές σχέσεων, αλλά πάντα συνοδεύονται από περιοριστικές υποθέσεις.
- Τέτοιοι τύποι δεν παρέχουν καμία πληροφορία για τη μεταβλητότητα των υπολογιζόμενων μεγεθών.
- Οι περισσότερες σχέσεις αναφέρονται σε μεγάλης διάρκειας λειτουργία της ουράς με αποτέλεσμα την σημαντική απόκλιση όταν αυτές εφαρμόζονται σε πεπερασμένα, μικρά διαστήματα λειτουργίας.

Πέρα από την συγκεκριμένη εξίσωση, η θεωρία ουρών βασίζεται σε κάποιες παραδοχές που την καθιστούν πλήρως ακατάλληλη για την μελέτη πολύπλοκων πραγματικών συστημάτων. Σπανίως το μήκος μιας γραμμής αναμονής μπορεί να θεωρηθεί άπειρο και συνήθως παίζει σημαντικό ρόλο στην εξυπηρέτηση των

¹ (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

πελατών (ή γενικώς, σε όρους εξομοίωσης, των οντοτήτων). Επίσης πολύ συχνά παρατηρείται σε συστήματα που διαθέτουν πολλές ουρές αναμονής η μεταπήδηση από τη μία στην άλλη, η απόφαση μη εισόδου στο σύστημα αναμονής αν περιμένουν ήδη πολλά άτομα (customer balking), ή και η εγκατάλειψη της ουράς πριν εξυπηρετηθεί ο πελάτης λόγω πολύωρης αναμονής (customer reneging). Οι περιπτώσεις αυτές, αν και όχι εύκολα, αντιμετωπίζονται ικανοποιητικά από την προσομοίωση, ενώ η κλασική θεωρία αναμονής τις αγνοεί.

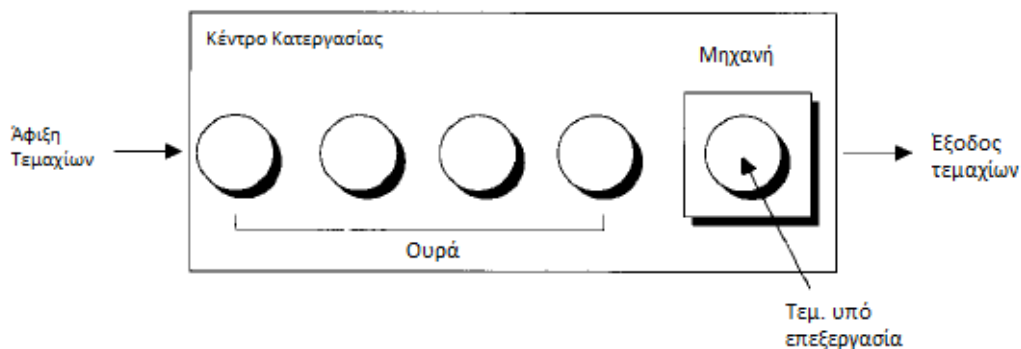
Πολλοί πιστεύουν ότι η θεωρία αναμονής μπορεί να δώσει εύκολα και γρήγορα μια εικόνα στον αναλυτή για την κατάσταση του συστήματος και των πειραμάτων που θα χρειασθούν για τη μελέτη. Αυτό ισχύει, αλλά ο μελετητής θα πρέπει να έχει κατά νου τις ελλείψεις και αδυναμίες της θεωρίας αυτής, και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν να είναι συγκρατημένη.

Θεμελιώδεις Έννοιες Προσομοίωσης

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικές υποκείμενες έννοιες, μέθοδοι και στοιχεία προσομοίωσης διακριτού χρόνου προτού παρουσιαστεί το πρόγραμμα Arena, στο οποίο εκπονήθηκε η παρούσα μελέτη. Οι έννοιες αυτές είναι κοινές σε όλο το εύρος των σύγχρονων λογισμικών εξομοίωσης, τα οποία στοχεύουν σε γρήγορη και εύκολη μοντελοποίηση συστημάτων, χωρίς ιδιαίτερες προγραμματιστικές απαιτήσεις από τον αναλυτή.

Για τους σκοπούς της παρουσίασης θα χρησιμοποιηθεί ένα απλοϊκό παράδειγμα, μιας μηχανής που κατεργάζεται τεμάχια σε τμήμα εργοστασίου. Τα τεμάχια φτάνουν στη μηχανή, επεξεργάζονται από την πρέσα και αποχωρούν. Αν κατά την άφιξή του κάποιο τεμάχιο βρει την πρέσα αδρανή, η επεξεργασία του ξεκινά άμεσα. Αλλιώς, περιμένει σε μια ουρά με κανόνα αναμονής FIFO (First-In First-Out). Το λογικό διάγραμμα έχει ως εξής:



Εικόνα 1: Λογικό διάγραμμα κατεργασίας τεμαχίου

Η προσομοίωση γίνεται για χρόνο λειτουργίας του συστήματος 20 λεπτών, και στο διάστημα αυτό εξήλθαν 5 ολοκληρωμένα τεμάχια.

Βασικά Στοιχεία Μοντέλων

Οντότητες (Entities)

Ολόκληρη η διαδικασία της προσομοίωσης στηρίζεται στην μετακίνηση και επεξεργασία οντοτήτων. Οντότητα ορίζεται το στοιχείο του φυσικού συστήματος που παράγεται ή εξυπηρετείται από αυτό. Στην προκείμενη περίπτωση είναι τα τεμάχια που εισέρχονται στο σύστημα (κέντρο κατεργασίας) για να κατεργασθούν.

Οι οντότητες έχουν χαρακτηριστικά, τα οποία ορίζονται και μπορούν να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο σύστημα (μοντέλο). Τα χαρακτηριστικά αυτά ονομάζονται Attributes. Καθένα από αυτά αποτελεί μια πληροφορία για την οντότητα, η οποία χρησιμοποιείται από το σύστημα είτε μόνη της είτε σε συνδυασμό με άλλες πληροφορίες, για τον προσδιορισμό ζητούμενων στατιστικών μεγεθών ή και για τη διαφοροποίηση παρόμοιων οντοτήτων. Στο παράδειγμά μας, ο χρήστης μπορεί να ορίσει ως attribute τον απαιτούμενο χρόνο κατεργασίας κάθε τεμαχίου (αν φυσικά αυτός διαφέρει).

Σταθμοί Εξυπηρέτησης - Πόροι

Ένας σταθμός εξυπηρέτησης (process server) χρησιμοποιεί πόρους για να προσδώσει αξία σε μια οντότητα. Στο σύστημα που παρουσιάστηκε η μηχανή είναι σταθμός εξυπηρέτησης και επεξεργάζεται τις οντότητες – τεμάχια. Ο χρόνος εξυπηρέτησης εξαρτάται από τον σταθμό αλλά και από τη διαθεσιμότητα πόρων. Μπορεί να έχει διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη, και να απεικονίζεται με ανάλογα γραφικά. Τέτοιες είναι: αδρανής, κατελιγμένος, εκτός λειτουργίας, βλάβη.

Όπως προαναφέρθηκε, οι πόροι είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με τους σταθμούς εξυπηρέτησης. Στο απλό παράδειγμα συστήματος, πόρος μπορεί να θεωρηθεί η μηχανή, ο χειριστής της ή και το κοπτικό εργαλείο. Σε κάθε σταθμό εξυπηρέτησης πρέπει να είναι σαφώς προσδιορισμένο ποιοι πόροι πρέπει να χρησιμοποιηθούν και σε τι ποσότητα έκαστος.

Ουρές Αναμονής (Queues)

Όταν δεν υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι πόροι οι οντότητες σχηματίζουν ουρά αναμονής (queue), μέχρι να έρθει η σειρά τους να εξυπηρετηθούν. Όταν μια οντότητα θέλει να εξυπηρετηθεί πρέπει να εισέλθει στην ουρά αναμονής, ενώ αντίστροφα αν θέλει να εξέλθει πρέπει – συνήθως¹ – να εξυπηρετηθεί πρώτα. Οι ουρές χαρακτηρίζονται από κανόνες αναμονής, λ.χ. First-In First-Out, Last-In First-Out. Παράλληλα, είναι δυνατή η απόδοση προτεραιοτήτων (priorities) στις οντότητες ενός συστήματος, παρακάμπτοντας έτσι προσωρινά τους κανόνες, αλλά και η μοντελοποίηση οποιουδήποτε κανόνα αναμονής μέσω της δημιουργίας έκφρασης (expression) από τον μελετητή.

¹ Υπάρχει και η περίπτωση της υπαναχώρησης οντοτήτων - πελατών από ένα σύστημα, λόγω πολύωρης αναμονής στην ουρά, γνωστή ως customer reneging.

Μεταβλητές – Εκφράσεις

Οι μεταβλητές (variables) είναι ανεξάρτητες από τις οντότητες και η τιμή τους είναι μια αριθμητική ποσότητα η οποία μπορεί να μεταβληθεί ανά πάσα στιγμή (μέσω σχετικής εντολής φυσικά) κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Υπάρχουν δύο ειδών μεταβλητές, έτοιμες, και προσδιοριζόμενες από το χρήστη. Τα περισσότερα προγράμματα έχουν κάποιες έτοιμες μεταβλητές, όπως ο χρόνος εξομοίωσης και ο αριθμός οντοτήτων σε μια ουρά, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει τις δικές του ανά πάσα στιγμή. Οι χρήσεις των μεταβλητών είναι ποικίλες και μπορούν να αναπαριστούν και μεγέθη που τροποποιούνται κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης. Στο ανωτέρω παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια μεταβλητή που να απεικονίζει το συνολικό φόρτο εργασίας στο σύστημα ανά πάσα στιγμή, Total WIP¹, το οποίο να αυξάνεται κατά μία μονάδα κάθε φορά που εισέρχεται ένα τεμάχιο στο κέντρο κατεργασίας και να μειώνεται κάθε φορά που ένα έτοιμο τεμάχιο εξέρχεται.

Αντίστοιχη χρήση με τις μεταβλητές έχουν και οι εκφράσεις (expressions). Η διαφορά τους έγκειται στο ότι οι εκφράσεις ορίζονται από τον προγραμματιστή του μοντέλου και είναι μαθηματικές ή λογικές σχέσεις που μπορούν να περιέχουν στον ορισμό τους ονόματα μεταβλητών και άλλων χαρακτηριστικών του μοντέλου. Απαραίτητη είναι η χρήση σχετικού συντακτικού και γνώση ορισμένων εντολών ανάλογα με το λογισμικό για τον καθορισμό των εκφράσεων.

Ροή Οντοτήτων

Ο κορμός της εκτέλεσης ενός μοντέλου εξομοίωσης είναι η κυκλοφορία των οντοτήτων μέσα στο δίκτυο των βασικών δομικών στοιχείων που ο χρήστης έχει κατασκευάσει. Οι οντότητες ενεργοποιούν τα δομικά αυτά στοιχεία (κυψελίδες – modules) και πραγματοποιούνται οι εντολές που περικλείει καθένα από αυτά.

Όταν για παράδειγμα μια οντότητα εισέρχεται σε έναν Μετρητή, ενεργοποιεί την εργασία αυτού, που μπορεί να είναι η προσαύξηση της μεταβλητής Total WIP κατά μία μονάδα. Όταν φτάνει σε έναν σταθμό εξυπηρέτησης, εισέρχεται στην αντίστοιχη ουρά αναμονής. Αν υπάρχουν άλλες οντότητες που προπορεύονται, περιμένει να ολοκληρωθεί η εξυπηρέτησή τους προτού δεσμεύσει αυτή τους απαραίτητους πόρους. Κατόπιν, περιμένει στο σταθμό για χρόνο που ορίζεται από τη διάρκεια της

¹ Total Work In Progress: Συχνή ονομασία για τη μεταβλητή που απεικονίζει το συνολικό φόρτο εργασίας.

διεργασίας που εκτελείται. Η τιμή αυτή ορίζεται από τον αναλυτή και μπορεί να είναι σταθερά, τυχαία ή να υπακούει σε κάποια στατιστική κατανομή. Τέλος αποδεσμεύει τον πόρο και εξέρχεται του σταθμού εξυπηρέτησης.

Κατά τη διάρκεια της «ζωής» της, μια οντότητα μπορεί να εισέρθει σε μια πληθώρα κυψελίδων. Τις περισσότερες φορές ο χρόνος παραμονής της είναι μηδενικός, με μοναδικό στόχο την ενεργοποίηση συγκεκριμένων λειτουργιών, υπολογισμών και διαδικασιών στο μοντέλο.

Χρονοδιάγραμμα Συμβάντων

Σε κάθε δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης, η κατάσταση του συστήματος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επίκεντρο του τρόπου λειτουργίας του μοντέλου όταν αυτό εκτελείται («τρέχει») είναι τα γεγονότα – συμβάντα – events. Ένα γεγονός είναι κάτι που συμβαίνει σε μια δεδομένη στιγμή στον χρόνο (εξομοίωσης), που μπορεί να συντελέσει στην αλλαγή χαρακτηριστικών, μεταβλητών, ή και στατιστικών στοιχείων¹. Στο απλουστευμένο σύστημα του κέντρου κατεργασίας υπάρχουν τριών ειδών γεγονότα:

- Άφιξη ενός τεμαχίου στο σύστημα.
- Αποχώρηση ενός επεξεργασμένου τεμαχίου.
- Ολοκλήρωση προσομοίωσης, στον ορισμένο από το χρήστη χρόνο των 20 λεπτών.

Φυσικά, και άλλα πράγματα συμβαίνουν στο μοντέλο αυτό κατά την εκτέλεσή του, δεν είναι όμως απαραίτητο να αποτελούν ξεχωριστά γεγονότα. Για παράδειγμα, ένα τεμάχιο εγκαταλείπει την ουρά και αρχίζει η επεξεργασία του, αλλά αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αποχώρησης του προηγούμενου τεμαχίου από το σύστημα.

Για την εκτέλεση του μοντέλου, η προσομοίωση πρέπει να παρακολουθεί τα γεγονότα που πρόκειται να συμβούν στο προσεχές μέλλον (της εξομοίωσης). Σε κάθε πρόγραμμα εξομοίωσης αυτά τα γεγονότα καταγράφονται σε κάποιου είδους χρονοδιάγραμμα². Ο τρόπος λειτουργίας αυτού έχει ως εξής: Όταν η λογική της προσομοίωσης το απαιτεί, καταγράφεται στο χρονοδιάγραμμα μια πληροφορία σχετικά με το γεγονός. Η εγγραφή αυτή περιλαμβάνει ταυτοποίηση της συσχετιζόμενης οντότητας, του χρόνου και του είδους του γεγονότος που θα συμβεί. Οι εγγραφές ταξινομούνται χρονολογικά, με τη συντομότερη να είναι πάντα πρώτη.

¹ (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

² Στο Arena το χρονοδιάγραμμα αυτό καλείται event calendar.

Σε ένα μοντέλο διακριτού χρόνου, οι μεταβλητές που περιγράφουν το σύστημα δεν μεταβάλλονται μεταξύ διαδοχικών γεγονότων. Την περισσότερη δουλειά στην (event – driven) εξομοίωση απαιτεί η σωστή κατάστρωση της λογικής του τι προκύπτει από κάθε συμβάν.

Ρολόι Εξομοίωσης

Ο τρέχον χρόνος της εξομοίωσης διακριτού χρόνου αποθηκεύεται σε μια μεταβλητή που ονομάζεται ρολόι εξομοίωσης (simulation clock). Σε αντίθεση με τον πραγματικό χρόνο, το ρολόι εξομοίωσης δεν κυλάει συνεχώς. Αντίθετα, παίρνει τιμές μεταπηδώντας από τη χρονική στιγμή ενός γεγονότος σε αυτή του επόμενου. Όπως είναι λογικό, βρίσκεται σε συνεχή «επικοινωνία» με το χρονοδιάγραμμα συμβάντων.

Στην αρχή της εξομοίωσης και, στη συνέχεια, μετά από κάθε εκτέλεση γεγονότος, το συμβάν που βρίσκεται πρώτο στη λίστα αφαιρείται από αυτήν. Το ρολόι προχωράει στη χρονική στιγμή αυτού του γεγονότος και οι πληροφορίες στην αφαιρεθείσα καταχώρηση χρησιμοποιείται για την εκτέλεσή του συμβάντος. Το πώς ακριβώς γίνεται η εκτέλεση εξαρτάται αποκλειστικά από το είδος του γεγονότος και την κατάσταση του μοντέλου τη συγκεκριμένη στιγμή, αλλά γενικά περιλαμβάνει αναθεώρηση των μεταβλητών και στατιστικών συσσωρευτών, μεταβολή των χαρακτηριστικών οντοτήτων και την τοποθέτηση νέων εγγραφών στο χρονοδιάγραμμα συμβάντων.

Τυχειότητα στην Εξομοίωση

Στην προσομοίωση διακριτού χρόνου χρησιμοποιούνται τυχαίοι αριθμοί για την αναπαράσταση τυχαίων μεταβλητών, που διαμορφώνονται από «συνημμένες» στατιστικές κατανομές, αλλά και στοχαστικών διεργασιών, που ακολουθούν νόμους πιθανοτήτων. Οι ενδιάμεσοι χρόνοι άφιξης πελατών για παράδειγμα, μοντελοποιούνται συνήθως με κατανομή Poisson. Οι χρονικές αυτές τιμές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά μοιράζονται μια κοινή οριακή κατανομή. Οι διεργασίες (processes) που χρησιμοποιούν τέτοιες μεταβλητές ονομάζονται Independent identically distributed (IID) Processes¹ και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην εξομοίωση διακριτού χρόνου.

Οι τυχαίοι αριθμοί παράγονται μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, random number generator (RNG). Η γεννήτρια αυτή παράγει (IID) αριθμούς που είναι

¹ (Altiok & Melamed, 2007)

ομοιόμορφα κατανομημένοι μεταξύ 0 και 1. Συνήθως, και ανάλογα με την περίπτωση, οι αριθμοί έπειτα μετασχηματίζονται ώστε να συμβαδίζουν με την εκάστοτε ζητούμενη κατανομή. Συνεπώς, παρόλο που χρησιμοποιούμε τον όρο «τυχαίοι αριθμοί» για τους αριθμούς που προκύπτουν από RNG, πρέπει να προσδιοριστεί ότι οι παραγόμενοι αριθμοί δεν είναι και τόσο τυχαίοι. Μια RNG γεννήτρια αποτελεί ουσιαστικά μια ντετερμινιστική διαδικασία, της οποίας οι παραγόμενοι αριθμοί μπορούν πάντα να αναδημιουργηθούν¹. Παράλληλα όμως είναι «τυχαία», κατά την έννοια ότι η αριθμητική ακολουθία που δημιουργεί, περνάει τα στατιστικά τεστ τυχαιότητας, στην προκειμένη περίπτωση για την ομοιομορφία των παραγόμενων αριθμών και την μεταξύ τους ανεξαρτησία.

Όταν εκτελείται ένα πείραμα προσομοίωσης, η γεννήτρια RNG ξεκινάει να παράγει αριθμούς και κάθε φορά που καλείται να παράγει ένα νέο, αναγράφει έναν αύξοντα αριθμό δίπλα σε αυτόν, σε ένα μητρώο. Αυτό σημαίνει ότι αν το πείραμα εκτελεστεί ξανά, η γεννήτρια θα παράγει τους ίδιους τυχαίους αριθμούς και τα ίδια τυχαία αποτελέσματα στην έξοδο. Το πλεονέκτημα που προκύπτει είναι η δυνατότητα επανάληψης ενός μεμονωμένου πειράματος εκτέλεσης. Από την άλλη βέβαια, δεν βοηθάει ιδιαίτερα η μελέτη ενός μοναδικού (από πλευράς μεταβλητών) πειράματος.

Για να εκτελεστούν διαφορετικά πειράματα θα πρέπει, μετά το τέλος καθενός, η γεννήτρια να μην μηδενίζεται (initialize), αλλά να συνεχίσει να παράγει τυχαίους (IID) αριθμούς από το σημείο που βρισκόταν. Τα διαδοχικά τρεξίματα – εκτελέσεις ενός μοντέλου που είναι ανεξάρτητα και στατιστικά πανομοιότυπα ονομάζονται επαναλήψεις (replications)². Η εκτέλεση μεγάλου αριθμού επαναλήψεων συνεπάγεται διαφορετικές τιμές εξόδου κάθε φορά. Αυτές τις μελετάμε στατιστικά (ή, συνήθως, το πρόγραμμα για εμάς) για να υπολογισθεί η μέση τιμή, το εύρος, ακραίες τιμές ή και η προσέγγιση από κάποια γνωστή κατανομή, το οποίο άλλωστε συνδέεται άμεσα με τους απώτερους στόχους της μελέτης. Και μιας και τα αποτελέσματα των διαφόρων επαναλήψεων είναι ανεξάρτητα και ίδιας κατανομής, μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε το εύρος εμπιστοσύνης για τις τιμές αυτές:

$$\bar{X} \pm t_{n-1,1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

¹ Γι' αυτό και πολλές φορές αποκαλούνται «ψευδοτυχαίοι».

² (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

Όπου \bar{X} είναι ο μέσος όρος του δείγματος, s η τυπική του απόκλιση, n ο αριθμός των επαναλήψεων, και $t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}}$ είναι το άνω $1 - \alpha/2$ κρίσιμο σημείο της κατανομής Student, με $n - 1$ βαθμούς ελευθερίας.

Μια μελέτη προσομοίωσης συνήθως περιλαμβάνει πολλά σενάρια, περιπτώσεις και καταστάσεις του συστήματος. Η χρήση επαναλήψεων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτίμηση της τυχαιότητας των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση των σεναρίων. Αν και από μια μεμονωμένη επανάληψη μπορεί να διαφαίνονται κάποια χαρακτηριστικά του συστήματος, τα αποτελέσματα είναι συνήθως παραπλανητικά, και η επανάπαυση μόνο σε αυτή θα έχει μοιραίο αντίκτυπο στη μελέτη.

Σύνοψη μιας Μελέτης Προσομοίωσης

Μελετώντας το πώς μπορεί να μοντελοποιηθεί ένα σύστημα αντιλαμβάνεται κανείς ότι τα θέματα σχεδιασμού, ανάλυσης και απεικόνισης του μοντέλου δεν είναι τα μοναδικά που πρέπει να λάβει υπόψη. Αν και δεν υπάρχει (και δεν γίνεται να υπάρξει) κάποια συγκεκριμένη συνταγή επιτυχίας, αναφέρονται κάποια από τα συστατικά που είναι στην πλειοψηφία τους αναπόσπαστα από κάθε μελέτη προσομοίωσης.

- Κατανόηση του Συστήματος. Είτε το σύστημα είναι υπαρκτό, είτε όχι, ο μελετητής πρέπει να έχει μια πλήρη, σαφή και ολοκληρωμένη εικόνα αυτού. Στην κατεύθυνση αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμες οι επισκέψεις στο χώρο και αλληλεπίδραση με τους εργαζόμενους σε αυτό.
- Ξεκάθαροι Στόχοι. Ο μελετητής δεν πρέπει να δώσει υπερβολικά αισιόδοξες υποσχέσεις σε αυτούς που του αναθέτουν το έργο. Πρέπει να κατανοήσει το τι μπορεί να αποκομισθεί από μια μελέτη προσομοίωσης και αναλόγως να ενημερώσει τον εργοδότη για τα προσδοκώμενα οφέλη και αποτελέσματα. Συνίσταται η εξαρχής αποσαφήνιση των στόχων και ο τακτικός επανέλεγχος αυτών ώστε να μην αποσπάται η προσοχή του μελετητή καθ' όλη τη διάρκεια της δημιουργίας του μοντέλου.
- Σχηματισμός ενός Μοντέλου Αναπαράστασης. Ιδιαίτερη προσοχή στο επίπεδο λεπτομέρειας που χρειάζεται στο κάθε σημείο αυτού. Κάποια στοιχεία απαιτούν μεγαλύτερη προγραμματιστική ακρίβεια ενώ άλλα μπορούν να αναπαρασταθούν εύκολα, «χοντρικά» αλλά και αποτελεσματικά με ανώτερα στοιχεία μοντελοποίησης (modules). Επικοινωνία με ηγετικά στελέχη

μπορεί να βοηθήσει ουσιαστικά σε αποφάσεις σχετικά με τη σημαντικότητα κάθε στοιχείου που θα μοντελοποιηθεί.

- Μετάφραση σε Λογισμικό Μοντελοποίησης. Εφόσον τεθούν όλες οι προδιαγραφές, προσδιοριστούν οι ανάγκες και γίνουν οι απαραίτητοι συμβιβασμοί, ο μελετητής πρέπει να αναπαραστήσει όλα αυτά μέσω του προγράμματος προσομοίωσης. Δυσκολίες είναι πολύ πιθανό να υπάρξουν. Πρέπει να αντιμετωπισθούν προσεκτικά και έντιμα, παρά να συγκαλυφθούν. Συνεννόηση και παρουσίαση του προβλήματος σε εργαζόμενους και στελέχη είναι ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης, ενώ η χρήση γραφικών απεικόνισης του μοντέλου (animation) βοηθά στην κατεύθυνση κατανόησης αυτού.
- Επαλήθευση του μοντέλου (Verification). Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή του μοντέλου, πρώτο μέλημα είναι η επαλήθευση ότι αυτό λειτουργεί σύμφωνα με τις προσδοκίες. Αυτό περιλαμβάνει μια σειρά από «πειράματα» στις τιμές εισόδου, παρατηρήσεις των γραφημάτων και του animation, και γενικότερα μελέτη της συμπεριφοράς του ώστε να διαβεβαιωθεί ο μελετητής για τη λειτουργική ακεραιότητα αυτού.
- Επικύρωση του μοντέλου (Validation). Περιλαμβάνει όλους εκείνους τους ελέγχους που αποσκοπούν στην διαβεβαίωση ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου βάσει των τιμών και κατανομών εισόδου είναι ρεαλιστικά και έμπιστα. Τα στατιστικά τεστ αλλά και η κοινή λογική του μελετητή είναι τα κλειδιά στο στάδιο αυτό.
- Σχεδιασμός των Πειραμάτων. Ανάλογα με τις ανάγκες της μοντελοποίησης πρέπει να σχεδιαστούν τα πειράματα που θα προσφέρουν τις απαραίτητες λύσεις στο υπό μελέτη πρόβλημα. Συχνά επιστρατεύονται αρχές κλασικού στατιστικού πειραματικού σχεδιασμού στο βήμα αυτό.
- Εκτέλεση Πειραμάτων και Ανάλυση Αποτελεσμάτων. Η εκτέλεση των πειραμάτων από το πρόγραμμα μοντελοποίησης μπορεί να είναι χρονοβόρα, για το λόγο αυτό απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός στα προηγούμενα στάδια για αποφυγή λαθών που θα οδηγήσουν σε σημαντικό χάσιμο χρόνου. Όταν ολοκληρωθούν ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Εδώ ο μελετητής καλείται να χρησιμοποιήσει τα κατάλληλα στατιστικά τεστ και αναλύσεις ώστε τα συμπεράσματα της μελέτης που θα εξάγει να είναι ασφαλή.
- Γραπτή Τεκμηρίωση και Αναφορά Αποτελεσμάτων. Συνοψίζοντας, πρέπει να καταγραφούν όλα όσα έγιναν από μέρος μελετητή, αφενός για να τεκμηριώσει τα συμπεράσματα και τις προτάσεις του προς τον εργοδότη,

αφετέρου για να είναι εύκολη η κατανόηση της εργασίας του σε μελλοντικό χρόνο από κάποιον άλλο που θα επιχειρήσει αλλαγές ή/και επέκταση στο μοντέλο που κατασκευάστηκε.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ARENA

Εισαγωγή

Rockwell Arena

Το πρόγραμμα εξομοίωσης Arena είναι προϊόν της Rockwell Software¹. Βασίζεται στη γλώσσα προσομοίωσης SIMAN, διατηρεί τη βασική δομή της αλλά προστίθεται σε αυτή ένα πλήρως γραφικό περιβάλλον. Μπορεί εύστοχα να χαρακτηριστεί ως αντικειμενοστραφής έκδοση της SIMAN.

Το πρόγραμμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να συνδυάζεται η ευκολία χρήσης που απαντάται στους εξομοιωτές υψηλού επιπέδου με την ευελιξία που παρέχουν οι γλώσσες εξομοίωσης, αλλά ακόμα και οι πιο γενικευμένες γλώσσες αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού όπως η Visual Basic και η C. Αυτό επιτυγχάνεται παρέχοντας μια σειρά από templates που περιέχουν βασικά δομικά στοιχεία εξομοίωσης και ανάλυσης μοντέλων (modules), τα οποία ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει απρόσκοπτα δημιουργώντας έτσι μια πληθώρα μοντέλων εξομοίωσης. Για λόγους ευχρηστίας, τα δομικά αυτά στοιχεία είναι ομαδοποιημένα σε παράθυρα (panels) συγκροτώντας πρότυπα – templates. Αλλάζοντας πάνελ, ο χρήστης έχει πρόσβαση σε μια πληθώρα νέων δομικών στοιχείων και δυνατοτήτων εξομοίωσης. Η ευελιξία του Arena συνίσταται ακριβώς στο ότι μπορούν να συνδυαστούν modules από διαφορετικά πάνελ (και κατ' επέκταση διαφορετικά επίπεδα προγραμματισμού εξομοίωσης) σε ένα ενιαίο μοντέλο.

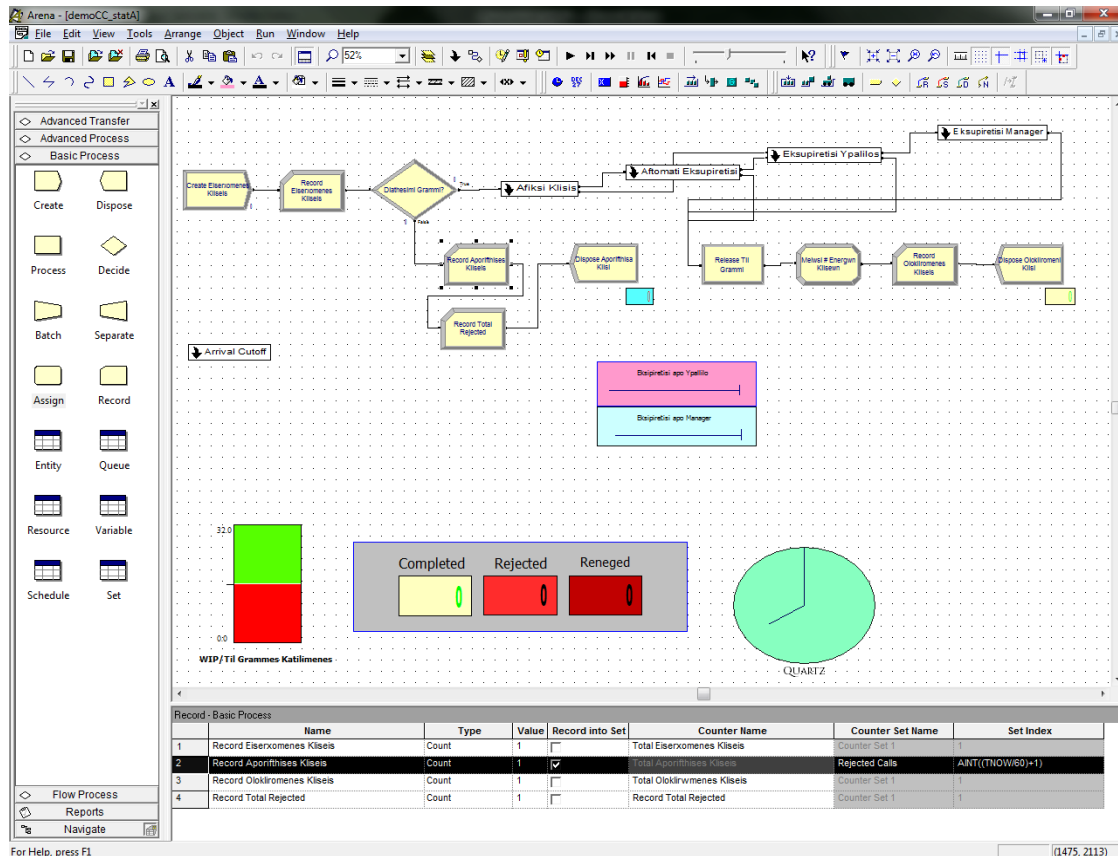
Περιβάλλον Εργασίας

Το Arena είναι σχεδιασμένο για Windows και συνεπώς έχει το σύνηθες παραθυρικό περιβάλλον που έχουν όλες οι εφαρμογές για το λειτουργικό της Microsoft. Υπάρχουν όλες οι βασικές γραμμές εργαλείων και εντολές του λειτουργικού (File, Edit, View – Save, Load, Print κλπ.) Πέρα από αυτές, υπάρχουν πολλές ακόμα γραμμές εργαλείων στο επάνω μέρος της οθόνης που σχετίζονται με την προσομοίωση στις οποίες θα γίνει λεπτομερής αναφορά όπου αυτό είναι απαραίτητο.

Στα αριστερά της οθόνης βρίσκεται η Project Bar. Σε αυτή την επιφάνεια βρίσκονται όλα τα ενεργά πάνελ (Basic Process, Advanced Process κ.ά.). Παράλληλα,

¹ <http://www.rockwellautomation.com/>

υπάρχουν δύο επίσης πολύ σημαντικά πάνελ: Reports και Navigate. Το reports συνοψίζει σε μια δενδρική μορφή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (αφού το μοντέλο ολοκληρωθεί και 'τρέξει') στα οποία ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί και να δει με ευκολία τις αναφορές για συγκεκριμένα σημεία του μοντέλου. Η καρτέλα Navigate επιτρέπει στον χρήστη να αλλάξει οπτικές γωνίες (views) στο μοντέλο και να μεταβεί σε κάποιο υπομοντέλο στη περίπτωση που το μοντέλο είναι ιεραρχικό και υπάρχουν πολλά επίπεδα.



Εικόνα 2: Περιβάλλον εργασίας στο Arena

Το μεγαλύτερο τμήμα της οθόνης αφορά το μοντέλο στο οποίο εργαζόμαστε και χωρίζεται σε δύο τμήματα: Flowchart View και Spreadsheet View. Η πρώτη αποτελεί την διαγραμματική οπτική γωνία, όπου διακρίνονται όλα τα δομικά στοιχεία που εισάγει ο χρήστης, οι μεταξύ τους σύνδεσμοι και γραφικά στοιχεία που έχουν δημιουργηθεί από το μελετητή (διαγράμματα, animation κ.ά.). Κάνοντας διπλό κλικ σε οποιοδήποτε module εμφανίζεται ένα πλαίσιο διαλόγου με τις βασικές επιλογές για το στοιχείο αυτό. Στο κάτω μέρος της οθόνης βρίσκεται η οπτική γωνία spreadsheet. Εκεί υπάρχουν ομαδοποιημένες όλες οι παράμετροι και επιλογές για κάθε δομικό στοιχείο του μοντέλου τις οποίες ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει ανά πάσα στιγμή. Ο μελετητής μπορεί μέσα από σχετική επιλογή να ορίσει αν θα βλέπει μία ή και τις δύο οπτικές γωνίες (View > Split Screen). Αν και ο τρόπος εργασίας ανάγεται

πάντα στις προτιμήσεις του χρήστη, ενδείκνυται η παράλληλη χρήση και των δύο οπτικών γωνιών (flowchart και spreadsheet).

Τέλος, στο κατώτερο μέρος της οθόνης βρίσκεται πάντα η Status Bar. Εκεί απεικονίζονται ποικίλες πληροφορίες, ανάλογα με το τι συμβαίνει την τρέχουσα στιγμή στο πρόγραμμα. Τέτοιες μπορεί να είναι οι συντεταγμένες θέσης του κέρσορα του ποντικιού ή ο χρόνος και ο αριθμός επαναλήψεων στην περίπτωση που το μοντέλο 'τρέχει'.

Θεμελιώδη Modules

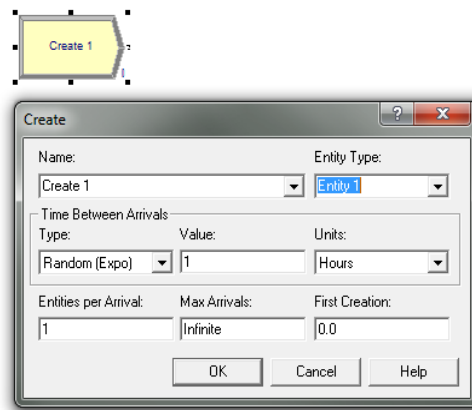
Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία του προγράμματος Arena, επεξηγείται συνοπτικά η λειτουργία και οι δυνατότητες καθενός, ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να κατανοήσει με ευκολία την δομή του μοντέλου που παρουσιάζεται αργότερα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το Arena είναι αντικειμενοστραφές πρόγραμμα εξομοίωσης επιχειρηματικών μοντέλων. Επίκεντρο του τρόπου αυτού προσομοίωσης είναι οι οντότητες (entities). Οι οντότητες δημιουργούνται, αλληλεπιδρούν με τους πόρους του συστήματος και τέλος καταστρέφονται – εξάγονται από το σύστημα. Οι οντότητες μπορεί να αναπαριστούν πελάτες, τηλεφωνικές κλήσεις, προϊόντα και γενικώς οτιδήποτε απαιτεί η περίπτωση που μελετάται.

Basic Process Panel

Create Module

Αρχικό στοιχείο κάθε μοντέλου, το module 'create' φροντίζει τη δημιουργία μιας οντότητας. Στο μενού επιλογών αυτού (διπλό κλικ) ο χρήστης μπορεί να ορίσει το όνομα του στοιχείου – το οποίο εμφανίζεται πάντα στο κέντρο του σχήματος που το απεικονίζει – καθώς και τον τύπο της οντότητας που γεννιέται.



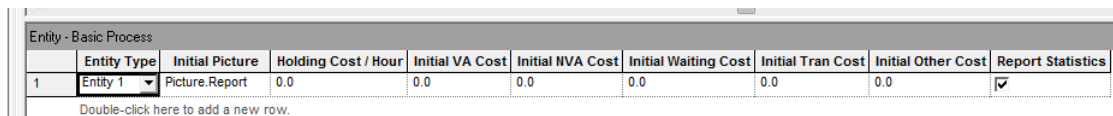
Εικόνα 3: Δομικό στοιχείο Create

Κατόπιν, στο χωρίο "Time Between Arrivals" ο χρήστης μπορεί να ορίσει με λεπτομέρεια το χρόνο μεταξύ αφίξεων – δημιουργίας οντοτήτων. Αυτός μπορεί να είναι βάσει προγράμματος, πιθανότητας, σταθερός ή και τυχαίος (εκθετική κατανομή). Η επιλογή δεν είναι πάντα εύκολη, συνήθως εξαρτάται από τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί για την εν λόγω μελέτη, αλλά πάντα υπόκειται και στην κρίση

του μελετητή. Τέλος ορίζονται ο αριθμός οντοτήτων ανά άφιξη, ο μέγιστος αριθμός αφίξεων και η χρονική στιγμή πρώτης δημιουργίας.

Entity Module

Με την καταχώρηση στοιχείων στο create module το Arena δημιουργεί αυτόματα μια οντότητα με το όνομα το οποίο έδωσε ο χρήστης. Επιλέγοντας το στοιχείο “Entity” στο Basic Process Panel, παρουσιάζονται στο κάτω μέρος της οθόνης (Spreadsheet View) όλες οι επιλογές της οντότητας.



	Entity Type	Initial Picture	Holding Cost / Hour	Initial VA Cost	Initial NVA Cost	Initial Waiting Cost	Initial Tran Cost	Initial Other Cost	Report Statistics
1	Entity 1	Picture.Report	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>

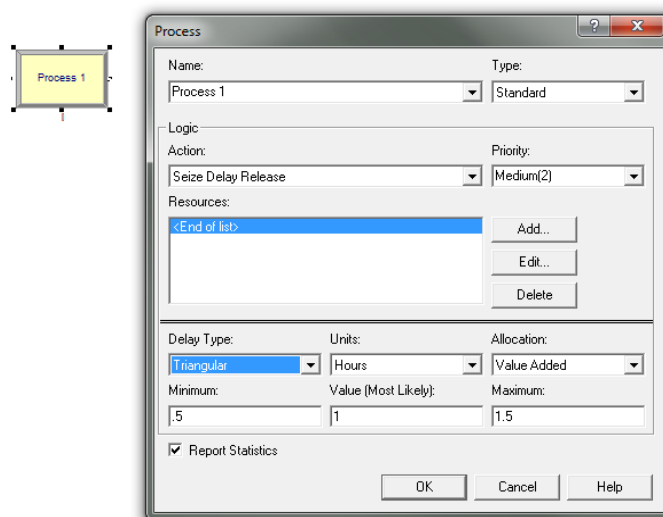
Double-click here to add a new row.

Εικόνα 4: To Entity module

Εκεί ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον τύπο της οντότητας και την εικόνα με την οποία θα παρίσταται γραφικά όταν το μοντέλο τρέχει, αλλά και να εισάγει στοιχεία κόστους αν το απαιτεί η μελέτη.

Process Module

Απεικονίζει την κάθε διεργασία που γίνεται στο πραγματικό σύστημα και περιλαμβάνει τους πόρους που χρησιμοποιούνται, την ουρά αναμονής και την καθυστέρηση της οντότητας μέχρι η τελευταία να εξυπηρετηθεί.



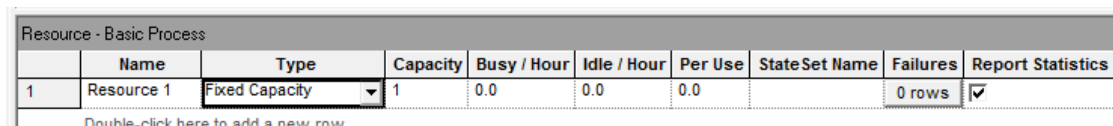
Εικόνα 5: Process module

Ο μελετητής πρέπει εδώ να καθορίσει τη λογική που διέπει την αλληλεπίδραση της οντότητας με τους διαθέσιμους πόρους. Σε μια γραμμή παραγωγής για παράδειγμα, όπου ένα τεμάχιο εισέρχεται για κατεργασία σε μια μηχανή θα χρησιμοποιηθεί (από

τις διαθέσιμες επιλογές στο χωρίο “action”) η Seize Delay Release. Το τεμάχιο καταλαμβάνει μια μονάδα διαθέσιμου πόρου – μηχανή (seize), μένει εκεί όσο χρειάζεται για να εξυπηρετηθεί – κατεργαστεί (delay) και τέλος ελευθερώνει τη μηχανή (release), η οποία είναι πλέον έτοιμη να κατεργαστεί το επόμενο τεμάχιο. Παράλληλα πρέπει να οριστεί η διάρκεια της διεργασίας. Οι επιλογές είναι και εδώ πολλές, καθώς ο χρήστης έχει στη διάθεσή του κάποιες συνήθεις κατανομές (τριγωνική, κανονική κλπ.) αλλά μπορεί να δημιουργήσει και τη δική του έκφραση. Στο πεδίο των πόρων (Resources) εκλέγονται αυτοί που θα εξυπηρετήσουν την οντότητα, ο τύπος και η ποσότητα καθενός εξ αυτών.

Resource Module

Από το στοιχείο αυτό μπορεί ο χρήστης να ελέγξει τις παραμέτρους που σχετίζονται με τους πόρους του συστήματος. Επιλέγεται αν η διαθεσιμότητά τους θα είναι σταθερό μέγεθος ή θα μεταβάλλεται βάσει προγράμματος και υπάρχει δυνατότητα ορισμού πιθανών βλαβών.



	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	State Set Name	Failures	Report Statistics
1	Resource 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	<input checked="" type="checkbox"/>

Double-click here to add a new row

Εικόνα 6: Δομικό στοιχείο Resource

Τέλος ο μελετητής μπορεί να ορίσει στοιχεία κόστους λειτουργίας αν απαιτούνται αντίστοιχα αποτελέσματα στην έρευνα.

Queue Module

Το συγκεκριμένο στοιχείο εμφανίζει στο Spreadsheet View τις επιλογές των ουρών αναμονής του μοντέλου. Ουρές περιλαμβάνονται σε κάθε στοιχείο process. Ο μελετητής πρέπει να ορίσει τον κανόνα αναμονής (FIFO, LIFO κτλ.), ενώ επίσης έχει τη δυνατότητα να φτιάξει μια «κοινόχρηστη» ουρά αναμονής αν οι συνθήκες επιβάλλουν κάτι ανάλογο.

Λοιπά Στοιχεία

Όλα τα προαναφερθέντα modules βρίσκονται στο πάνελ “Basic Process” του Arena. Αναφέρονται επιγραμματικά τα υπόλοιπα στοιχεία που ανήκουν στο ίδιο template.

Το Decide module επιτρέπει την μοντελοποίηση επιλογών, είτε αυτές είναι τυχαίες είτε όχι. Ο χρήστης ορίζει τον αριθμό εξόδων και τον κανόνα της επιλογής. Ο κανόνας μπορεί να είναι βάσει τύχης (chance) ή συνθήκης. Στην πρώτη περίπτωση ο

αναλυτής εισάγει την πιθανότητα % για κάθε έκβαση, ενώ στην τελευταία καλείται να ορίσει τη συνθήκη, και την έκβαση για κάθε αποτέλεσμα αυτής.

Το στοιχείο Dispose αποτελεί την κατάληξη κάθε οντότητας, το σημείο που αυτή εξάγεται από το σύστημα και κατ' επέκταση παύει να υπάρχει. Ο «κύκλος της ζωής» μιας οντότητας ξεκινάει πάντα από το δομικό στοιχείο Create και ολοκληρώνεται στο Dispose.

Τα στοιχεία Separate και Batch αναλαμβάνουν να διαχωρίσουν («κλωνοποιήσουν») και να ξαναενώσουν μια οντότητα όπου αυτό είναι απαραίτητο.

Το Assign module είναι αυτό που επιτρέπει στο χρήστη να τροποποιήσει μεταβλητές, ιδιότητες και γενικότερα τις διάφορες τιμές και παραμέτρους του συστήματος αντικαθιστώντας την προηγούμενη τιμή με μια καινούρια. Εξαιρετικά σημαντικό σε κάθε μοντέλο.

Το στοιχείο Record από την άλλη είναι ο «πρωταγωνιστής» στην διαμόρφωση και εξαγωγή στατιστικών στοιχείων από το μοντέλο. Περνώντας μια οντότητα από αυτό, ο μελετητής μπορεί να ορίσει την τροποποίηση κάποιου μετρητή, αναλόγως πάντα των απαιτήσεων της μελέτης.

Μέσα από το module "Variable" μπορούν να ελεγχθούν όλες οι παράμετροι των μεταβλητών που υπάρχουν στο σύστημα, ενώ μέσω του "Schedule" να διαμορφωθούν χρονοδιαγράμματα. Τα τελευταία είναι πολλές φορές απαραίτητα για των προσδιορισμό αφίξεων οντοτήτων (πρόγραμμα αφίξεων κ.ά.) ή και διαθεσιμότητας πόρων (λ.χ. βάρδιες υπαλλήλων).

Πολλά επιπλέον modules βρίσκονται στα υπόλοιπα templates του προγράμματος (Advanced Process, Advanced Transfer, Blocks κ.ά.). Αυτά αποτελούν δομικά απλούστερα στοιχεία από τα προαναφερθέντα παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία και περισσότερες επιλογές στο χρήστη. Στον αντίποδα, χρειάζεται μεγαλύτερη εμπειρία στη μοντελοποίηση από μεριάς μελετητή. Ως εκ τούτου συνίσταται η χρήση βασικών (απλών) δομικών στοιχείων όσο οι συνθήκες το επιτρέπουν και η προσφυγή σε χαμηλότερα επίπεδα μοντελοποίησης μόνο όταν αυτό είναι απολύτως απαραίτητο. Παρόλα αυτά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα περιεχόμενα των πάνελ Advanced Process και Advanced Transfer.

Στην παρουσίαση του μοντέλου θα επεξηγηθούν αναλυτικότερα σημεία όπου έχει γίνει χρήση προχωρημένων (προγραμματιστικά) δομικών στοιχείων και θα σχολιαστεί η ανάγκη χρήσης αυτών.

Advanced Process Panel

Τα δομικά στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτή την ομάδα έχουν μεγάλη συγγένεια ως προς τη λογική και τη λειτουργία τους με αυτά του Basic Process Panel. Παρουσιάζονται συνοπτικά τα χρησιμότερα εξ αυτών.

Το Delay module αναλαμβάνει να καθυστερήσει μια οντότητα που εισέρχεται σε αυτό. Ο χρόνος της καθυστέρησης αυτής μπορεί να είναι μια σταθερά ή να υπακούει σε κάποια στατιστική κατανομή.

Τα στοιχεία Seize και Release επιτρέπουν την μοντελοποίηση της κατάληψης και απελευθέρωσης ενός, ή και περισσότερων πόρων. Μια ομάδα modules με τη σειρά Seize – Delay – Release απεικονίζει πλήρως τη λειτουργία ενός Process module.

Τα modules Store και Unstore αναλαμβάνουν την αποθήκευση μιας οντότητας και, αντίστοιχα, την έξοδο αυτής από την συγκεκριμένη κατάσταση. Η χρησιμότητά τους έγκειται συνήθως στην δυνατότητα που παρέχουν για γραφική απεικόνιση μιας οντότητας που είναι αποθηκευμένη σε κάποιο σημείο του μοντέλου. Η απεικόνιση αυτή γίνεται μέσω της επιλογής Storage, που βρίσκεται στη γραμμή εργαλείων Animate Transfer. Συχνά χρησιμοποιούνται ομαδικά μαζί με ένα Delay module με τη σειρά Store – Delay – Unstore.

Τα δομικά στοιχεία Hold – Signal επίσης λειτουργούν συνεργατικά. Το module Hold αναλαμβάνει να παρακρατήσει μια οντότητα. Υπάρχουν δύο επιλογές για τη διάρκεια αυτής της καθυστέρησης: μέχρι μια ορισμένη έκφραση να γίνει αληθής, ή μέχρις ότου ληφθεί κάποιο σήμα. Η έκφραση μπορεί να είναι οτιδήποτε ορίσει ο χρήστης και ελέγχεται η ισχύς της στην αρχή κάθε βήματος του διακριτού χρόνου. Το σήμα «εκπέμπεται» από το στοιχείο Signal τη στιγμή που κάποια άλλη οντότητα εισέλθει σε αυτό.

Εξαιρετικά χρήσιμα στοιχεία που βρίσκονται σε αυτό το πάνελ είναι τα modules Expression και Statistic. Το πρώτο επιτρέπει τον ορισμό εκφράσεων που μπορούν να ανακληθούν οποτεδήποτε εντός άλλων στοιχείων του μοντέλου. Οι εκφράσεις αυτές ποικίλουν από μοναδικές τιμές μέχρι μητρώα πολλών κελιών, και από σταθερές τιμές μέχρι πολύπλοκες στατιστικά εκφράσεις. Το στοιχείο Statistic

επιτρέπει τη διαμόρφωση και έκδοση στατιστικών στοιχείων πέρα από αυτά που δημιουργεί αυτόματα το πρόγραμμα με το πέρας κάθε εκτέλεσης. Καθοριστική η σημασία του στην πλειοψηφία των μοντέλων.

Advanced Transfer Panel

Στην ομάδα αυτή δομικών στοιχείων περιλαμβάνονται modules που επιτρέπουν την ακριβέστερη μοντελοποίηση των μετακινήσεων των οντοτήτων μέσα στο σύστημα. Το Arena επιτρέπει την μοντελοποίηση τεσσάρων τρόπων μετακινήσεων:

- **Route.** Αφορά διαδρομές, στις οποίες η οντότητα μετακινείται «μόνη της».
- **Transport.** Αφορά μετακινήσεις στις οποίες η οντότητα μεταφέρεται με τη βοήθεια ενός transporter, ενός οχήματος δηλαδή. Τέτοιο μπορεί να είναι κάποιο καροτσάκι, περνοφόρο, AGV, κλπ.
- **Convey.** Απεικονίζει τη μεταφορά οντοτήτων με χρήση μεταφορικών ταινιών.
- **Network.** Οι οντότητες μεταφέρονται σε προκαθορισμένο δίκτυο διαδρομών και αποστάσεων είτε με transporters είτε μόνες τους.

Σε συνδυασμό με τη γραμμή εργαλείων Animate Transfer το επίπεδο ρεαλισμού της γραφικής απεικόνισης ενός μοντέλου μπορεί κυριολεκτικά να εκτοξευθεί. Αποτελεί μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά στην παρουσίαση. Το ενδιαφέρον του animation μετατοπίζεται από την κίνηση των οντοτήτων μεταξύ των modules σε μια παράπλευρη περιοχή, όπου ο χρήστης έχει σχεδιάσει σταθμούς και διαδρομές που αναπαριστούν τις μετακινήσεις αυτές πολύ ακριβέστερα.

Κομβικής σημασίας σε αυτή την προσέγγιση είναι το δομικό στοιχείο Station. Τέτοιοι σταθμοί τοποθετούνται μέσα στο χώρο και αποτελούν πύλες από τις οποίες διέρχονται οι οντότητες. Οι βασικές μετακινήσεις μεταξύ αυτών περιγράφονται στα modules “Route”, όπου προσδιορίζεται ο σταθμός προορισμού και ο χρόνος μεταφοράς. Όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κάποιος άλλος τρόπος μεταφοράς, με την χρήση δηλαδή κάποιου μέσου, επιστρατεύονται τα στοιχεία Leave και Enter. Τα modules αυτά εμπεριέχουν την απαιτούμενη λογική για να κληθεί κάποιο transporter, ή να γίνει πρόσβαση σε κάποια μεταφορική ταινία. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης καλείται να μελετήσει το Κεφ. 8 “Entity Transfer”, (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010).

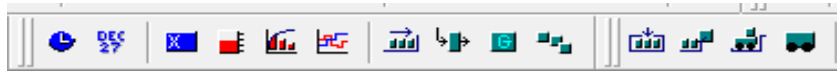
Ανεξάρτητα πάντως από την ανάγκη για ακρίβεια μοντελοποίησης στις μετακινήσεις, η χρήση Stations και Routes μπορεί να αλλάξει πλήρως την διαμόρφωση

οποιοδήποτε μοντέλου. Επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων χωρίς τον περιορισμό της χαρακτηριστικής γραμμικής κίνησης των οντοτήτων μεταξύ δομικών στοιχείων, πράγμα που καθιστά πολύπλοκη την παρουσίασή τους, ειδικά όσο αυξάνεται το μέγεθός τους.

Εκτέλεση, Αναφορές και Παρουσίαση Μοντέλου

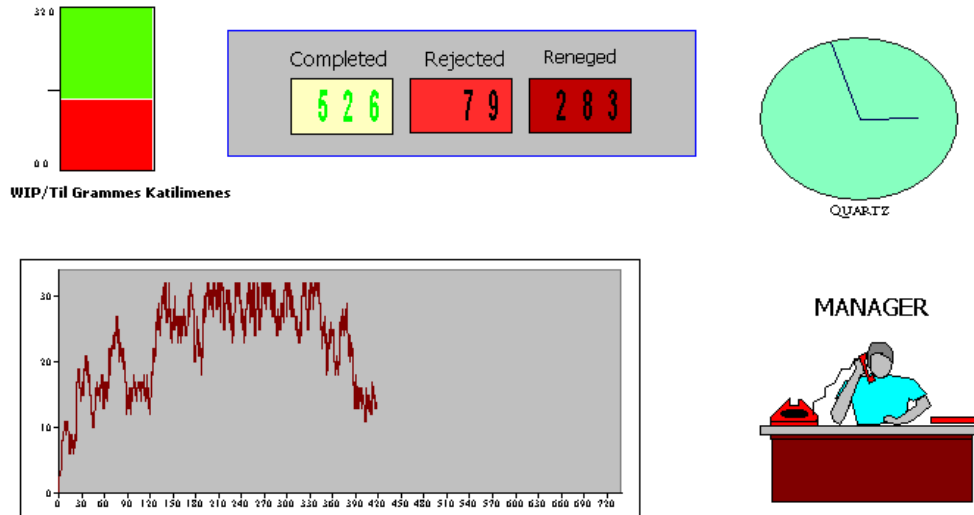
Γραφικά και Γραφήματα

Το Arena παρέχει στο χρήστη μια πληθώρα επιλογών και δυνατοτήτων σχετικά με την οπτική αναπαράσταση στοιχείων του μοντέλου όταν αυτό τρέχει. Τα γραφικά αλλά και τα διάφορα γραφήματα έχουν πρωταρχικό στόχο την ευκολότερη κατανόηση του μοντέλου από τα άτομα στα οποία (συνήθως) απευθύνεται η μελέτη, αλλά μπορούν επίσης να βοηθήσουν σημαντικά στη διαπίστωση της προγραμματιστικά σωστής (ή και όχι) λειτουργίας του μοντέλου (verification & validation όπως έχει αναφερθεί). Πρόσβαση στις σχετικές επιλογές παρέχεται από τη γραμμή εργαλείων Animation.



Εικόνα 7: Γραμμή εργαλείων Animation

Ο μελετητής μπορεί από εκεί να τροποποιήσει την εμφάνιση των ουρών, των οντοτήτων, να δημιουργήσει γραφήματα ποικίλων ειδών, να μοντελοποιήσει συστήματα μεταφοράς αγαθών και πρώτων υλών (transporters, conveyors), ακόμα και να εισάγει κάποιο ρολόι στο μοντέλο που να αναδείχνει το πέρασμα του χρόνου καθώς αυτό εκτελείται. Το πρόγραμμα παρέχει αρκετά έτοιμα σχέδια προς χρήση σε οργανωμένες «βιβλιοθήκες» (picture libraries), που επιπλέον τροποποιούνται πολύ εύκολα για να καλύψουν τις ανάγκες κάθε μοντέλου.



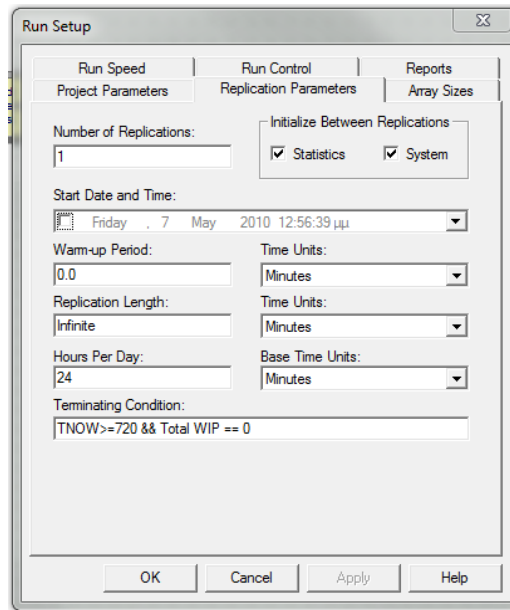
Εικόνα 8: Animation ενός μοντέλου. Γραφήματα, μετρητές και κινούμενα γραφικά.

Δεν θα προβούμε σε περαιτέρω ανάλυση του animation, αφενός γιατί είναι σχετικά πολύπλοκο, αφετέρου διότι στόχος είναι η κατανόηση από τον αναγνώστη των βασικών δομών του προγράμματος και αργότερα του μοντέλου που παρουσιάζεται, και όχι η εκμάθηση του Arena.

Παράμετροι Εκτέλεσης

Όλες οι επιλογές γύρω από την εκτέλεση του πειράματος και των επαναλήψεων βρίσκονται στο μενού Run > Setup του ARENA. Ο αναλυτής μπορεί από εδώ να ορίσει τη διάρκεια κάθε “τρέξιματος”, τον αριθμό των επαναλήψεων που θα γίνουν, αλλά και να κάνει ρυθμίσεις απαραίτητες για την σωστή λειτουργία κάθε μοντέλου, όπως οι μονάδες χρόνου και η συνθήκη τερματισμού των επαναλήψεων. Ακολουθεί μια πιο αναλυτική περιγραφή των διαθέσιμων επιλογών στο υπομενού αυτό.

Στην καρτέλα Project Parameters ο χρήστης μπορεί να εισάγει στοιχεία όπως τίτλος μελέτης και περιγραφή αυτής, καθώς και το όνομα του αναλυτή. Παράλληλα μπορούν να επιλεγθούν τα βασικά χωρία στα οποία θα επικεντρωθούν τα στατιστικά στην αναφορά μετά την εκτέλεση του μοντέλου (ουρές, κόστη, διεργασίες κ.ά.).



Εικόνα 9: Πλαίσιο διαλόγου "Run Setup"

Στην καρτέλα Replication Parameters, που διακρίνεται και στην εικόνα, ο μελετητής μπορεί να επιλέξει τον αριθμό των επαναλήψεων. Επίσης έχει μια σειρά επιλογών που αφορούν την εκτέλεση του πειράματος: μονάδες χρόνου, περίοδος «ζεστάματος» εκτέλεσης και χρονική διάρκεια επανάληψης, καθώς και να ορίσει – αν το επιθυμεί – συγκεκριμένη ώρα και ημερομηνία για το «τρέξιμο» του μοντέλου. Σημειώνεται ότι η χρησιμότητα της περιόδου «ζεστάματος» της εκτέλεσης (warm-up period) έγκειται στην χρήση και εκκαθάριση με το πέρας αυτής της περιόδου των στατιστικών συσσωρευτών και μετρητών, αφήνοντας την επίδραση τυχόν άτυπων αρχικών συνθηκών να εξαφανιστεί σταδιακά. Το χωρίο της συνθήκης τερματισμού (Terminating Condition) επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει πολύπλοκους ή και ανεξαρτήτως χρόνου κανόνες τερματισμού. Είναι βασικό συστατικό της μοντελοποίησης ο σχεδιασμός του τρόπου που λήγει μια επανάληψη και ο μελετητής πρέπει πάντα να δίνει αρκετή προσοχή στη θέσπιση των κανόνων τερματισμού. Στην εικόνα για παράδειγμα, το μοντέλο αναπαριστά τηλεφωνικό κέντρο που λειτουργεί 12 ώρες την ημέρα και κλείνει αφού εξυπηρετηθεί και ο τελευταίος πελάτης που «έπιασε» τηλεφωνική γραμμή πριν το πέρας της 12^{ης} ώρας. Επομένως η συνθήκη τερματισμού είναι ο χρόνος να είναι μεγαλύτερος από 720min (12hrs) και ο τρέχον φόρτος εργασίας (κατειλημμένες τηλ. γραμμές) μηδενικός.

Στις υπόλοιπες καρτέλες οι επιλογές που παρέχονται χρησιμοποιούνται σπανιότερα, σε ειδικές περιπτώσεις. Αξίζει να αναφερθούμε στην επιλογή Run Speed που επιτρέπει στο χρήστη να μεταβάλει τον χρονικό πολλαπλασιαστή του προγράμματος κατά το «τρέξιμο» ενός μοντέλου. Μειώνοντας την ταχύτητα αυτή γίνονται

ευκολότερα αντιληπτά όλα τα συστατικά των γραφικών και γραφημάτων που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια των εκτελέσεων.

Εκτέλεση και Αναφορές

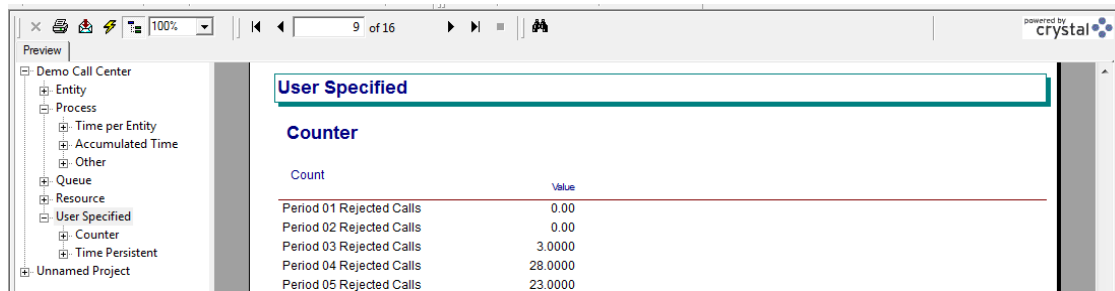
Αφού έχει ολοκληρωθεί η βασική δομή του μοντέλου, πρέπει να ελεγχθεί η δομική του ακεραιότητα. Το Arena εκτελεί αυτόματα τον έλεγχο αυτό την πρώτη φορά που ο χρήστης επιχειρεί να τρέξει ένα μοντέλο, παρόλα αυτά γίνεται πολύ εύκολα ανά πάσα στιγμή από την επιλογή Run > Check Model ή με το πλήκτρο F4. Αν υπάρχουν σφάλματα, το πρόγραμμα τα εντοπίζει και ενημερώνει το χρήστη σχετικά, ενώ παρέχει και βοήθεια για την επίλυσή τους. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως debugging.



Εικόνα 10: Γραμμή εργαλείων "Run Interaction"

Στην εργαλειοθήκη Run Interaction βρίσκονται τα πλήκτρα ελέγχου της εκτέλεσης του πειράματος. Μοιάζουν αρκετά με κουμπιά που απαντώνται σε συσκευές (ή και προγράμματα) αναπαραγωγής μουσικής αφενός γιατί εκτελούν αντίστοιχες λειτουργίες και αφετέρου για λόγους ευκολίας. Ο χρήστης μπορεί να εκκινήσει τις επαναλήψεις, να παύσει την εξέλιξη ανά πάσα στιγμή και, φυσικά, να τερματίσει την εκτέλεση (πρώωρα). Παράλληλα έχει την επιλογή βηματικής μετάβασης μεταξύ γεγονότων (ένα κλικ αντιστοιχεί σε ένα event) ή και να μεταβεί γρήγορα στο τέλος των επαναλήψεων. Η τελευταία επιλογή διακόπτει την εξέλιξη των γραφικών και γίνονται «κρυφά» όλοι οι υπολογισμοί ώστε να εκδοθούν τα αποτελέσματα του πειράματος το γρηγορότερο δυνατό.

Με το πέρας μιας εκτέλεσης επαναλήψεων το Arena δημιουργεί αυτόματα αναφορές που περιέχουν όλα τα στατιστικά στοιχεία που ο χρήστης επέλεξε από τις επιλογές Run > Control > Project Parameters, καθώς και εκείνα που προκύπτουν από μετρητές και στατιστικούς συσσωρευτές (counters, tallies) που τοποθετήθηκαν στο μοντέλο. Το πρόγραμμα δημιουργεί εξ ορισμού κάποιες αναφορές για τις οντότητες, τους πόρους, τις ουρές αναμονής και τις διεργασίες, όπως ο μέσος χρόνος αναμονής σε ουρά, απασχόληση πόρων κ.ά. Τα στοιχεία που προκύπτουν από «παρεμβάσεις» του μελετητή αναρτώνται σε ξεχωριστή ενότητα με τίτλο "User specified".



Count	Value
Period 01 Rejected Calls	0.00
Period 02 Rejected Calls	0.00
Period 03 Rejected Calls	3.0000
Period 04 Rejected Calls	28.0000
Period 05 Rejected Calls	23.0000

Εικόνα 11: Αναφορά μιας εκτέλεσης

Οι αναφορές εκδίδονται με τη βοήθεια της πλατφόρμας Crystal Reports¹, προϊόν της SAP. Αυτές εμφανίζονται σε ένα νέο παράθυρο (εντός του προγράμματος) και είναι οργανωμένες σε δενδρική μορφή όπως φαίνεται στην εικόνα. Ο χρήστης μπορεί πολύ εύκολα να περιηγηθεί και να δει τα αποτελέσματα στις διάφορες ενότητες «ενδιαφέροντος» του μοντέλου: οντότητες, διεργασίες, ουρές, πόροι κ.ά. Επίσης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει την αναφορά σε μια πληθώρα τύπων αρχείου και να την εκτυπώσει.

Διάκριση Στατιστικών Στοιχείων

Πολλοί από τους αριθμούς στις αναφορές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως στατιστικά tally, time persistent ή counter. Ακολουθεί ορισμός και διάκριση των ειδών αυτών, ώστε να αποφεύγεται η σύγχυση τους.

Στατιστικά τύπου tally (συσσωρευτές) αποκαλούνται αυτά που προκύπτουν από την μέση, ελάχιστη, ή μέγιστη τιμή ενός συνόλου αριθμών. Για παράδειγμα, ο μέσος και μέγιστος συνολικός χρόνος παραμονής στο σύστημα είναι στατιστικά tally, καθώς είναι η μέση και μέγιστη τιμή αντίστοιχα, των συνολικών χρόνων παραμονής οντοτήτων, που εξήχθησαν του συστήματος κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης. Πολλές φορές αποκαλούνται και στατιστικά διακριτού χρόνου (discrete time statistics), αφού οι κατηγοριοποίηση των τιμών από τις οποίες προκύπτουν είναι διακριτή, ακολουθώντας τη σειρά με την οποία έγιναν οι παρατηρήσεις (γεγονότα).

Time persistent, ή αλλιώς στατιστικά συνεχούς χρόνου. Είναι αυτά που προκύπτουν παίρνοντας το χρονικό μέσο, ελάχιστο ή μέγιστο του γραφήματος μιας μεταβλητής κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, όπου ο χρόνος είναι συνεχής και απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα. Ο μέγιστος και μέσος αριθμός οντοτήτων που βρίσκονται σε

¹ <http://www.sap.com/solutions/sapbusinessobjects/sme/reporting-dashboarding/index.epx>

μια ουρά είναι μεταβλητές συνεχούς χρόνου, όπως επίσης και η στιγμιαία χρησιμοποίηση – εκμετάλλευση πόρων¹.

Τα στατιστικά τύπου counter, ή απλούστερα μετρητές, αποτελούν αθροιστικά σύνολα. Συχνά είναι απλά απαρίθμηση συμβάντων, για παράδειγμα πόσες οντότητες εξήχθησαν συνολικά από το σύστημα, μπορεί όμως να είναι και άθροισμα άλλων μεγεθών (πέραν της μονάδας), όπως ο αθροιστικός χρόνος αναμονής σε μια ουρά (accumulated waiting time), που προκύπτει από την πρόσθεση των χρόνων αναμονής κάθε οντότητας στην ουρά αυτή.

Τέλος, ένα λιγότερο χρησιμοποιούμενο στατιστικό, αλλά άξιο αναφοράς είναι οι συχνότητες, frequencies. Οι συχνότητες καταγράφουν την συχνότητα εμφάνισης σε βάθος χρόνου μιας έκφρασης ή μιας κατάστασης πόρου (αδρανής, κατειλημμένος, εκτός λειτουργίας), στα πλαίσια που ορίζει ο χρήστης για την έκφραση ή την κατάσταση. Όλες οι συχνότητες ορίζονται από σχετικό module στο πάνελ Advanced Process του Arena.

¹ Στο Arena απαντάται ως Instantaneous Utilization και προκύπτει από το λόγο Time Busy / Time.

Ανάλυση Δεδομένων

Η στοχαστικότητα που διακρίνει κάθε μοντέλο εξομοίωσης ενός πραγματικού συστήματος καθιστά απαραίτητη την εξονυχιστική αξιολόγηση και ανάλυση των δεδομένων που τροφοδοτούν το μοντέλο, αλλά και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση. Στο κεφάλαιο αυτό θα σχολιαστεί η ανάλυση των δεδομένων αυτών και θα παρουσιαστούν τα εργαλεία που περιλαμβάνονται στο πακέτο Arena που διευκολύνουν τον αναλυτή στην αποστολή αυτή.

Input Analysis

Τα δεδομένα εισόδου είναι βασικά συστατικά μιας μελέτης εξομοίωσης. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση των παραμέτρων και μεταβλητών, ή και για την κατασκευή μοντέλων των διαφόρων συστατικών του υπό μελέτη συστήματος. Κάποια δεδομένα εισόδου είναι εύκολα στον προσδιορισμό τους, όπως ο αριθμός των πόρων, το επιθυμητό επίπεδο αποθέματος, ποσότητες αναπαραγγελιών κ.ά. Χρόνοι εξυπηρέτησης, και ενδιάμεσοι χρόνοι μεταξύ βλαβών από την άλλη, είναι πιο τυχαία μεγέθη από τη φύση τους, και για τη μοντελοποίηση τους χρησιμοποιούνται στατιστικές κατανομές και πιθανότητες. Τέτοια τυχαία δεδομένα πρέπει πρώτα να μοντελοποιηθούν ως μεταβλητές και έπειτα οι τιμές τους προκύπτουν από γεννήτριες τυχαίων αριθμών (RNGs), όπως περιγράφηκε νωρίτερα.

Η διαδικασία μοντελοποίησης τυχαίων συνιστωσών του συστήματος καλείται input analysis (ανάλυση δεδομένων εισόδου)¹. Από μεθοδολογικής σκοπιάς, είναι πολλές φορές εύχρηστος ο διαχωρισμός της ανάλυσης αυτής σε μια σειρά από βασικά στάδια:

1. Συλλογή δεδομένων. Περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων για τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Απαραίτητη για την αποτελεσματική μοντελοποίηση, αλλά παράλληλα και το πρώτο στάδιο που περιλαμβάνει ρίσκο, απορρέων είτε από την έλλειψη διαθέσιμων δεδομένων, είτε από παρωχημένα ή λανθασμένα υπάρχοντα.
2. Ανάλυση δεδομένων, που ακολουθεί τη συλλογή. Ο μελετητής μπορεί να ελέγξει τα δεδομένα πριν την δημιουργία του μοντέλου. Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνεται ανάλυση μέσω διαφόρων εμπειρικών στατιστικών μεθόδων,

¹ (Altiook & Melamed, 2007)

- όπως ιστογράμματα, μέση και τυπική απόκλιση καθώς και συσχετισμός με κατανομές.
3. Μοντελοποίηση δεδομένων. Αποτελεί το επίκεντρο της ανάλυσης δεδομένων εισόδου. Στο στάδιο αυτό, ένα μοντέλο πιθανοτήτων προσαρμόζεται στα εμπειρικά δεδομένα που συλλέχθηκαν. Παραδείγματα εμπειρικών παρατηρήσεων είναι ο ρυθμός άφιξης οντοτήτων σε μια ουρά και η συχνότητα βλαβών σε μία μηχανή. Ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων που θα μοντελοποιηθούν το στάδιο αυτό χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανεξάρτητες και εξηρημένες παρατηρήσεις. Οι ανεξάρτητες παρατηρήσεις του συστήματος μοντελοποιούνται ως σειρές IID τυχαίων μεταβλητών. Τα εξηρημένα δεδομένα μοντελοποιούνται ως τυχαίες διεργασίες με χρονική εξάρτηση. Όσον αφορά το «ταίριασμα» κατανομών στα εμπειρικά δεδομένα, είναι στην ευχέρεια του μελετητή η επιλογή μεθόδου προσέγγισης¹.
 4. Έλεγχος καλής εφαρμογής των επιλεχθέντων κατανομών. Η καλή εφαρμογή εκτιμάται μέσα από μια σειρά στατιστικών ελέγχων. Τα τεστ χ^2 και *Kolmogorov – Smirnov* είναι τα δημοφιλέστερα για τον έλεγχο αυτό, και χρησιμοποιούνται από το Arena Input Analyzer, που θα παρουσιασθεί παρακάτω.

To Arena Input Analyzer

Αποτελεί συνοδευτικό πρόγραμμα στο πακέτο λογισμικού εξομοίωσης Arena και η λειτουργία του έγκειται στη παροχή βοήθειας στο μελετητή, για τη διεκπεραίωση των δύο τελευταίων σταδίων της ανάλυσης δεδομένων εισόδου που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αναλαμβάνει την προσαρμογή των δεδομένων σε κατανομές, καθώς και τον έλεγχο αυτής μέσω σχετικών τεστ².

Ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει συγκεκριμένες κατανομές και να ζητήσει από το Input Analyzer να επιλέξει τις ορθότερες παραμέτρους αυτών ή, εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να ζητήσει την επιλογή και της κατανομής και των παραμέτρων αυτής. Το Input Analyzer είναι συμβατό με όλες της κατανομές που χρησιμοποιεί το Arena και τις παραμέτρους τους.

¹ Ιστογράμματα, Μέθοδος Στιγμών, βλ. (Altiok & Melamed, 2007) για περισσότερα.

² βλ. και (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

Πίνακας 1: Στατιστικές κατανομές στο Arena

Κατανομή	Όνομασία Arena	Παράμετροι Arena
Εκθετική	EXPO	Mean
Κανονική	NORM	Mean, StdDev
Τριγωνική	TRIA	Min, Mode, Max
Ομοιόμορφη	UNIF	Min, Max
Erlang	ERLA	ExpoMean, k
Beta	BETA	Beta, Alpha
Γάμμα	GAMM	Beta, Alpha
Johnson	JOHN	G, D, L, X
Λογαριθμική κανονική	LOGN	LogMean, LogStdDev
Poisson	POIS	Mean
Weibull	WEIB	Beta, Alpha
Συνεχής	CONT	P1, V1, ...
Διακριτή	DISC	P1, V1, ...

Για να εκτελέσει τις διεργασίες αυτές το Input Analyzer ο χρήστης πρέπει αρχικά να τροφοδοτήσει τις τιμές στο πρόγραμμα. Αυτό γίνεται μέσω ενός αρχείου κειμένου ASCII, που να περιέχει όλα τα δεδομένα. Οποιοσδήποτε κειμενογράφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό, αρκεί να υπάρχει ένα κενό ανάμεσα σε κάθε τιμή, και να επιλεγθεί το ανάλογο format αποθήκευσης. Για μεγαλύτερη ευκολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Notepad των Windows.

Το πρόγραμμα εκκινεί είτε από το αρχικό μενού του λειτουργικού συστήματος, είτε μέσα από το Arena (μέσω Tools > Input). Επιλέγοντας «New» στο Input Analyzer και ανοίγοντας το αρχείο των δεδομένων δημιουργείται ένα νέο παράθυρο με πληροφορίες και στατιστική ανάλυση των δεδομένων που μόλις εισήχθησαν καθώς και ένα ιστόγραμμα των τιμών τους.

Στο μενού Fit του προγράμματος, υπάρχουν επιλογές για την προσαρμογή συγκεκριμένων στατιστικών κατανομών στα δεδομένα. Μετά την επιλογή μιας κατανομής, το Input Analyzer σχεδιάζει την συνάρτησή της πάνω στο ιστόγραμμα και υπολογίζει τις καταλληλότερες μεταβλητές για την εφαρμογή της. Στο κάτω μέρος του παραθύρου εμφανίζονται οι μεταβλητές μαζί με την πλήρη έκφραση που χρειάζεται για την αναπαράσταση της κατανομής. Ο χρήστης μπορεί πολύ εύκολα να τη μεταφέρει εύκολα στο Arena επιλέγοντας Edit > Copy Expression. Παράλληλα, το Input Analyzer εφαρμόζει τα στατιστικά χ^2 και *Kolmogorov – Smirnov*, και εμφανίζει τα αποτελέσματά τους ώστε να κρίνει ο αναλυτής για την καταλληλότητα της επιλεγμένης κατανομής.

Αν από την άλλη ο χρήστης δεν έχει προτίμηση στην κατανομή που θα εφαρμοστεί, το Input Analyzer αναλαμβάνει να μελετήσει την εφαρμογή όλων των διαθέσιμων (θεωρητικών) κατανομών και να αποφανθεί για την καταλληλότερη. Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής Fit > Fit All και εμφανίζει στο τέλος μια σύνοψη με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κάθε κατανομής.

Ποτέ δεν υπάρχει «καλύτερη» κατανομή. Τα διαφορετικά στατιστικά τεστ μπορεί να αναδεικνύουν διαφορετικά αποτελέσματα καταλληλότητας. Στην προσπάθεια επιλογής ο μελετητής πρέπει να λάβει υπόψη έναν αριθμό παραγόντων. Τέτοιοι είναι η ανάγκη (ή όχι) για φραγμένη κατανομή και η ευκολία στην μετέπειτα μεταβολή των παραμέτρων μιας κατανομής¹.

Output Analysis

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων εξόδου ασχολείται με το σχεδιασμό των επαναλήψεων, τον υπολογισμό στατιστικών από αυτές και την γραπτή και εικονική παρουσίασή τους. Εκτός από ελάχιστες απλές περιπτώσεις, όπως το πείραμα του Monte Carlo, οι σχέσεις των πιθανοτήτων και οι κανόνες που εφαρμόζονται σε ένα μοντελοποιημένο σύστημα είναι πολύ πολύπλοκοι για να καταγραφούν και να αναλυθούν τα αποτελέσματά τους με κλασικές αναλυτικές μεθόδους. Συνεπώς, εφαρμόζεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εξομοίωση, γνωστή ως Output Analysis. Τα βασικά ζητήματα στα οποία απευθύνεται αυτή η ανάλυση είναι τα εξής:

- *Σχεδιασμός επαναλήψεων.* Ένας σωστός σχεδιασμός των replications σε μια μελέτη εξομοίωσης επιτρέπει στον αναλυτή να αποκομίσει το βέλτιστο αριθμό πληροφοριών με το λιγότερο υπολογιστικό κόστος. Εν τω προκειμένω, στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού επαναλήψεων αλλά με παράλληλη εξασφάλιση αξιόπιστων στατιστικών.
- *Εκτίμηση μέτρων απόδοσης.* Τα στατιστικά από τις επαναλήψεις παρέχουν τα δεδομένα για τον υπολογισμό εκτιμήσεων και διαστήματος εμπιστοσύνης για σημαντικές παραμέτρους του συστήματος. Κρίσιμοι παράγοντες της εκτίμησης αυτής είναι το μέγεθος του δείγματος και η ανεξαρτησία των παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό στατιστικών.
- *Ανάλυση συστήματος και πειραματισμός.* Στόχος των στατιστικών μελετών και εκτιμήσεων είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος και η δημιουργία προβλέψεων απόδοσης σε διαφορετικές συνθήκες – σενάρια

¹ (Altiook & Melamed, 2007)

λειτουργίας. Ο πειραματισμός με διαφορετικούς σχεδιασμούς του συστήματος μπορεί να αποσαφηνίσει τα σχετικά τους οφέλη και να τονίσει πιθανά μειονεκτήματά τους.

Όσον αφορά τη στατιστική ανάλυση των εκτελέσεων και τον υπολογισμό της απόδοσης των στοιχείων του συστήματος, το Arena υπολογίζει πολλά στατιστικά στοιχεία και μετρητές «αυτόματα» κατά την έκδοση αναφορών, όπως έχει σημειωθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Πολλές φορές η αναλύσεις αυτές δεν είναι αρκετές, ειδικά στην σύγκριση διαφορετικών σεναρίων, οπότε και ο μελετητής μπορεί να χρησιμοποιήσει επιπλέον εργαλεία για την ανάλυση του συστήματος.

To Arena Output Analyzer

Είναι και αυτό μια ξεχωριστή εφαρμογή που περιλαμβάνεται στο πακέτο λογισμικού εξομοίωσης Arena. Το Output Analyzer χρησιμοποιεί αρχεία εξόδου που δημιουργούνται αυτόματα από το Statistics module του Arena¹. Ενώ κάποιες από τις λειτουργίες του γίνονται και στο περιβάλλον του βασικού προγράμματος (όπως ο καθορισμός εύρους εμπιστοσύνης και εκτίμηση μέτρων απόδοσης), το Output Analyzer προσφέρει επιπλέον δυνατότητες, και η στατιστική σύγκριση δύο σεναρίων είναι μία από τις βασικότερες.

Ανοίγοντας το Output Analyzer και επιλέγοντας File > New μπορούμε να επιλέξουμε τα αρχεία δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν. Αυτά αποθηκεύονται σε ομάδες δεδομένων και ο χρήστης μπορεί να σώσει την κάθε ομάδα ώστε να μη χρειάζεται η επιλογή τους κάθε φορά που εκκινεί το πρόγραμμα. Για κάθε ομάδα δεδομένων που προστίθεται (μέσω της επιλογής Add) υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης δύο αρχείων, τα οποία να ανήκουν σε διαφορετικά μοντέλα (ή σενάρια του ίδιου): Data File A και Data File B. Έπειτα, ο χρήστης έχει μια πληθώρα επιλογών από το μενού Analyze του προγράμματος.

Η επιλογή Batch / Truncate μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ομαδοποίηση δεδομένων που προέκυψαν από ανεξάρτητες παρατηρήσεις. Για κάθε τέτοια ενέργεια το Output Analyzer δημιουργεί μια αναφορά που ενημερώνει το χρήστη για τις παραμέτρους της ομαδοποίησης και την εκτιμώμενη διακύμανση μεταξύ batches.

Η εκτίμηση του απαιτούμενου εύρους εμπιστοσύνης των (ομαδοποιημένων) δεδομένων μπορεί να γίνει μέσω της επιλογής “Confidence Interval On Mean”. Το

¹ Τύπου .dat

Output Analyzer διαθέτει δύο τρόπους για την επίτευξη αυτού: Classical ή Standardized Time Series.

Το μενού Analyze παρέχει επίσης τις επιλογές “Compare Means” και “Compare Variances” (Σύγκριση Μέσων & Διακύμανσης). Εξαιρετικά χρήσιμες για την μελέτη μέσων όρων και διακυμάνσεων μεταξύ δεδομένων από διαφορετικούς πληθυσμούς (και κατ’ επέκταση σενάρια), προσφέρουν στατιστική σύγκριση αυτών. Το Output Analyzer παρέχει αριθμητικές πληροφορίες αλλά και γραφική αναφορά για τα αποτελέσματα της σύγκρισης.

Τέλος, για να μετρηθεί η στατιστική εξάρτηση μεταξύ των τιμών ενός δείγματος, ο αναλυτής μπορεί να χρησιμοποιήσει την επιλογή “Correlogram”. Αυτή υπολογίζει την αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) του δείγματος και εμφανίζει τις αριθμητικές τιμές των σημείων αυτοσυσχέτισης, καθώς και το γράφημά τους.

Παραμετρική Ανάλυση Σεναρίων – Process Analyzer (PAN)

Ο όρος παραμετρική ανάλυση αφορά στη διαδικασία πολλαπλών εκτελέσεων ενός μοντέλου με διαφορετικές παραμέτρους και μεταβλητές σε κάθε «τρέξιμο», και η μετέπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων. Σκοπός της παραμετρικής ανάλυσης είναι η κατανόηση του αντίκτυπου της αλλαγής παραμέτρων στη συμπεριφορά του συστήματος. Είναι συχνά απαραίτητη η ανάλυση αυτή κατά την προσπάθεια εύρεσης μιας βέλτιστης λύσης – σεναρίου, ή ένας συνδυασμός αυτών, στο πρόβλημα το οποίο μελετάται.¹

Το Arena έρχεται με ένα ακόμα εργαλείο, το Process Analyzer (PAN), το οποίο βοηθάει τον χρήστη στα εξής:

- Πρακτική και εύκολη αλλαγή μεταβλητών του μοντέλου για την απεικόνιση διαφορετικών σεναρίων. Υπό κανονικές συνθήκες, οι αλλαγές σε ένα μοντέλο και η όλη διεργασία αποθήκευσης ξεχωριστών αρχείων για κάθε σενάριο είναι διαδικασία επίπονη και σχοινοτενής.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με στατιστικά έγκυρες μεθόδους, ώστε να διαγνωσθούν αδυναμίες και πλεονεκτήματα σε κάθε περίπτωση, καθώς και αναπαράσταση των αποτελεσμάτων με χρήση γραφημάτων.²

¹ (Altiook & Melamed, 2007)

² βλ. και (Kelton, Sadowski, & Swets, 2010)

Το PAN χρησιμοποιεί αρχεία Arena με την κατάληξη «.p». Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται αυτόματα την πρώτη φορά που εκτελείται έλεγχος¹ του μοντέλου. Ένα σενάριο για το Process Analyzer είναι ο συνδυασμός ενός τέτοιου αρχείου με μια σειρά τιμών για τον έλεγχο εισόδων (input controls) και μια ομάδα μεταβλητών απόκρισης εξόδου (output responses). Μια συλλογή από τέτοια σενάρια αποτελεί ένα PAN project, και αποθηκεύεται σε ξεχωριστά αρχεία με την κατάληξη «.pan».

Ο ορισμός των input controls γίνεται από τις υπάρχουσες μεταβλητές και τους πόρους του μοντέλου (variables & resources). Η επιλογή των αποκρίσεων εξόδου γίνεται από τα αποτελέσματα του μοντέλου (outputs), όπως αυτά διαμορφώνονται από το Arena. Αφού ο χρήστης ορίσει τις μεταβλητές εισόδου και τα θεμιτά αποτελέσματα που θα μελετηθούν το PAN «τρέχει» το μοντέλο και υπολογίζει τα ζητούμενα για κάθε σενάριο. Έτσι για παράδειγμα μπορεί να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής του αριθμού υπαλλήλων που εξυπηρετούν, των μηχανημάτων που είναι διαθέσιμα σε ένα σύστημα κ.ά.

Αφού ο αναλυτής εκτελέσει όσα διαφορετικά σενάρια κρίνει απαραίτητο, μπορεί να δημιουργήσει γραφήματα των αποτελεσμάτων για ευκολότερη απεικόνιση. Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής Insert > Chart. Οι διαθέσιμοι τύποι γραφημάτων είναι πολυάριθμοι, ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων και τις ανάγκες της παρουσίασης.

OptQuest

Το εργαλείο OptQuest, προϊόν της OptTek Systems Inc. παρέχεται μαζί με την πλήρη έκδοση του λογισμικού Arena. Αφορά στην παραμετρική ανάλυση σεναρίων και έχει μεγάλη συγγένεια με το Process Analyzer όσον αφορά το έργο που επιτελεί.

Η ουσιαστική διαφορά, και παράλληλα ανυπολόγιστη βοήθεια προς το μελετητή, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το OptQuest προσεγγίζει τη βέλτιστη κατάσταση του συστήματος. Αντίθετα με το PAN, όπου ο χρήστης πρέπει ο ίδιος να «παίξει» με τις μεταβλητές και να συγκρίνει μόνος του τα αποτελέσματα, το OptQuest αναλαμβάνει να μεταβάλει το ίδιο όσες παραμέτρους επιλεχθούν, σε ότι εύρη τιμών οριστούν και, λαμβάνοντας υπόψη τους εισαχθέντες περιορισμούς, να αναδείξει μια βέλτιστη λύση.

Σκόπιμα αναφέρεται «μια» βέλτιστη λύση και όχι «η» βέλτιστη λύση. Κύριο πρόβλημα στην παραμετρική ανάλυση πολύπλοκων μοντέλων είναι ο χρόνος που

¹ Run > Check Model ή πατώντας F4

απαιτείται για την εκτέλεση. Όταν ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγάλος και το εύρος των πιθανών τιμών των παραμέτρων αμβλύ, μπορεί να χρειαστούν ώρες, μέρες ή και μήνες για την πλήρη διερεύνηση όλων των πιθανών σεναρίων. Το OptQuest χρησιμοποιεί ιδιαίτερα heuristics, γνωστά ως tabu search και scatter search για να μεταβαίνει «έξυπνα» μεταξύ τιμών, προσπαθώντας να βρει γρήγορα μια καλή λύση για το σύστημα. Πράγματι, μπορεί να «βρει» μια καλή λύση σε διάστημα λεπτών.

Ανοίγοντας την εφαρμογή,¹ το OptQuest εξετάζει το υπάρχον μοντέλο στο Arena. Πατώντας New ο χρήστης καλείται να ορίσει πρώτα τα σημεία ελέγχου, απόρροια των μεταβλητών του συστήματος. Για κάθε ένα control εισάγεται ανώτερη και κατώτερη τιμή, καθώς και ο τύπος της μεταβλητής, διακριτή ή συνεχής. Έπειτα ο μελετητής μπορεί να εισάγει περιορισμούς μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου. Στη συνέχεια και από τα δεδομένα εξόδου (outputs) του μοντέλου, πρέπει να ορισθεί ο στόχος της ανάλυσης και τυχόν επιπλέον περιορισμοί, οι οποίοι να αφορούν τα responses. Τέλος, ο χρήστης επιλέγει συγκεκριμένο αριθμό εξομοιώσεων ή χρονική διάρκεια για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης. Ορίζεται επίσης η ακρίβεια κάθε εκτέλεσης, μέσω του αριθμού επαναλήψεων.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, το OptQuest παρουσιάζει τη βέλτιστη κατάσταση όσων αφορά τις μεταβλητές και τις αποκρίσεις. Σε ένα ξεχωριστό διάγραμμα εμφανίζεται κάθε εξομοίωση που βελτιστοποίησε την κατάσταση, συναρτήσει του χρόνου (αριθμός εκτέλεσης). Ο αναλυτής μπορεί να ζητήσει ανάλυση ευαισθησίας του αποτελέσματος, οπότε παρουσιάζονται όλες οι κοντινές καλές λύσεις από τη βέλτιστη που βρέθηκε.

Συνεπώς, το OptQuest μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο σε δύο περιπτώσεις. Πρώτον, όταν η πολυπλοκότητα του συστήματος και το μέγεθός του είναι τέτοια που καθιστούν χρονοβόρα την παραμετρική ανάλυση όλων των πιθανών σεναρίων, ή σε περιπτώσεις που δεν είναι ξεκάθαρο το εύρος των τιμών στο οποίο πρέπει να κινηθούν οι μεταβλητές για να υπάρξει κάποιο καλό αποτέλεσμα.

¹ Tools > OptQuest for Arena, από το περιβάλλον του Arena.

Μέρος Β'

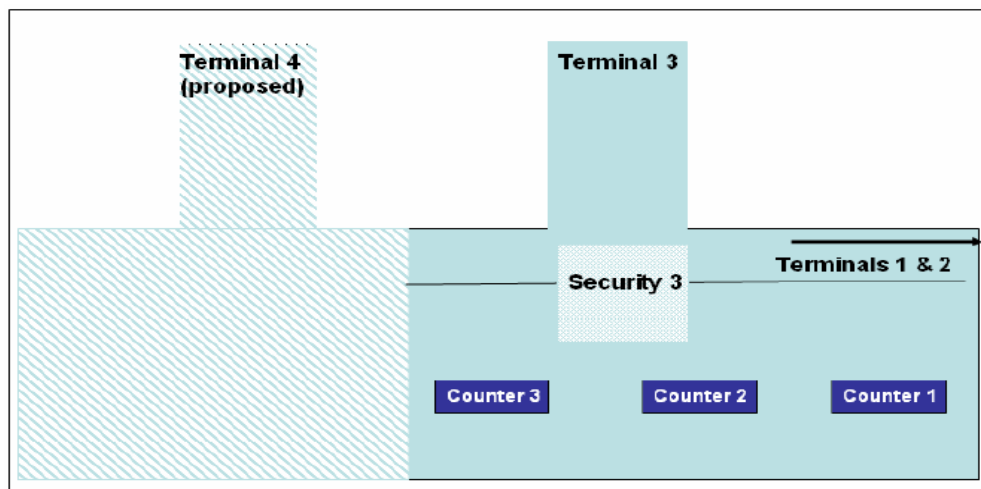
*Εφαρμογή της
Προσομοίωσης σε
Μελέτη Επέκτασης
Αεροδρομίου. Ανάπτυξη
Μοντέλου – Πορίσματα
Μελέτης.*

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η παρούσα μελέτη αφορά στην επέκταση ενός αεροδρομίου, με το άνοιγμα ενός νέου τερματικού σταθμού εξυπηρέτησης επιβατών (terminal). Η μελέτη γίνεται με τη χρήση εξομοίωσης και του προγράμματος Rockwell Arena. Αν και φανταστικό, τα στοιχεία βασίζονται σε πραγματικό αεροδρόμιο της πόλης του Σικάγο (Η.Π.Α.) και το θέμα ήταν μέρος παγκοσμίου διαγωνισμού εξομοίωσης¹.

Τρέχουσα Διαρρύθμιση και Χώρος Επέκτασης

Το νέο terminal πρόκειται να τοποθετηθεί στον υπάρχοντα χώρο του αεροδρομίου. Υπάρχει ακριβώς όσος χώρος χρειάζεται δίπλα στο Terminal 3 (T3) για τις εγκαταστάσεις του Terminal 4 (T4). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η προτεινόμενη τοποθέτηση του νέου τερματικού σταθμού. Κύριο μέλημα της ομάδας διαχείρισης του αεροδρομίου είναι ο σχεδιασμός των χώρων ελέγχου επιβατών και αποσκευών – security areas. Τα σημεία αυτά προκαλούν συμφόρηση στο σύστημα εξαιτίας των αυξημένων μέτρων ασφαλείας. Με την τρέχουσα διαρρύθμιση, κάθε terminal έχει το δικό του security area. Οι ταξιδιώτες συχνά παραπονούνται για τις μεγάλες ουρές αναμονής και το συνωστισμό στα σημεία ελέγχου. Η μελέτη πρέπει πρωτίστως να αποφανθεί για το αν θα χρειαστεί νέος σταθμός ελέγχου για το τέταρτο terminal, ή αν επαρκεί ο τρέχων σταθμός στο terminal 3 για την εξυπηρέτηση και των δύο. Το terminal 3 εξυπηρετεί τρεις αεροπορικές εταιρίες: Fabulous Flights, Premium Planes και Jolly Jets. Το νέο terminal T4 θα εξυπηρετήσει δύο νέες εταιρίες: Wild Wings και Airborne Airlines.



Εικόνα 12: Διαρρύθμιση χώρου στο αεροδρόμιο

¹ Thirteenth Annual IIE/Rockwell Automation Simulation Contest.

Διαδικασία Check-In

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι επιβατών, που χρήζουν διαφορετικού τρόπου εξυπηρέτησης, ανάλογα πάντα και με την αερογραμμή. Οι «κοινοί» επιβάτες πρέπει να περάσουν πρώτα από την έκδοση εισιτηρίων και μετά από τον έλεγχο. Κάποιες εταιρίες ορίζουν τους συχνούς τους πελάτες και τους επιβάτες Α' θέσης ως «elite», παρέχοντάς τους ταχύτερη εξυπηρέτηση κατά το check-in. Τέλος, κάποιες εταιρίες επιτρέπουν στους επιβάτες «express» να παραλάβουν το boarding pass νωρίτερα (εφόσον έχουν μόνο χειραποσκευές) και να παρακάμψουν πλήρως το check-in.

Πίνακας 2: Πληροφορίες έκδοσης εισιτηρίων ανά εταιρία

	Fabulous Flights	Premium Planes	Jolly Jets	Airborne Airlines	Wild Wings
Standard χρόνος εξυπ.*	1,15,45	1,10,30	2,17,35	3,15,30	1,10,35
Elite χρόνος εξυπ.*	1,10,20,	1,5,20	-	1,20,25	-
Ποσοστό elite επιβατών	25%	20%	0%	23%	0%
Ποσοστό express επιβατών που παρακάμπτουν το check-in	15%	10%	0%	10%	15%
Συνιστώμενος χρόνος άφιξης	120min πριν την αναχώρηση	120min πριν την αναχώρηση	120min πριν την αναχώρηση	120min πριν την αναχώρηση	120min πριν την αναχώρηση

* Οι αριθμοί αναφέρονται σε ελάχιστο, μέσο και μέγιστο χρόνο σε λεπτά.

Υποθέτοντας ότι οι επιβάτες καταφτάνουν όπως συνίσταται, 2 ώρες πριν την αναχώρηση, ο τυπικός ρυθμός έλευσης ταξιδιωτών (επιβάτες ανά ώρα) είναι ως εξής:

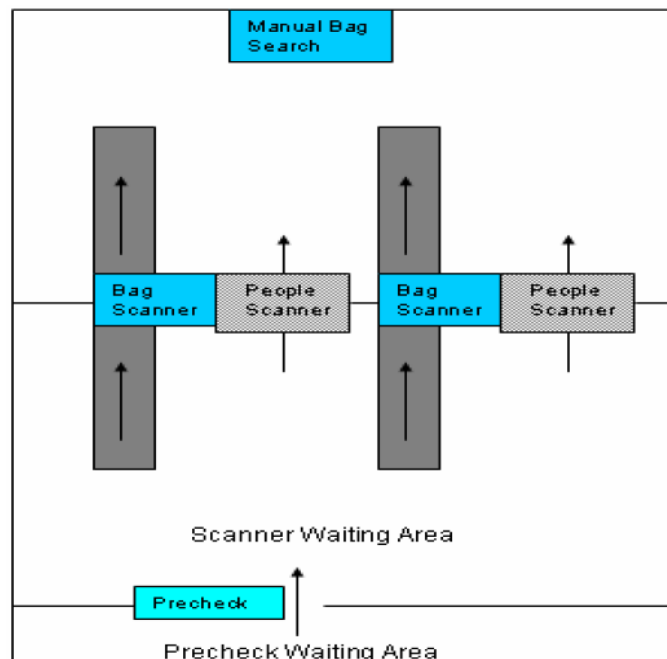
Πίνακας 3: Ρυθμός άφιξης επιβατών ανά ώρα

Ώρα ημέρας	Fabulous Flights	Premium Planes	Jolly Jets	Airborne Airlines	Wild Wings
0:00-4:00	0	0	0	0	0
4:00-6:00	393	129	175	0	198
6:00-9:00	375	135	354	150	195
9:00-12:00	156	174	150	144	330
12:00-15:00	156	183	138	153	339
15:00-18:00	153	327	183	345	156
18:00-21:00	165	318	150	303	141
21:00-24:00	90	135	123	0	161

Οι περισσότερες αερογραμμές έχουν 40% μειωμένη κίνηση το Σάββατο και την Κυριακή, η Jolly Jets όμως ειδικεύεται σε εκδρομές σαββατοκύριακου, πράγμα που προκαλεί τον διπλασιασμό των επιβατών της τις μέρες Παρασκευή έως και Δευτέρα. Οι Fabulous Flights και Premium Planes έχουν αντίστοιχα 35% και 27% αύξηση στον αριθμό επιβατών τους τις μέρες Δευτέρα και Παρασκευή.

Διαδικασία Ελέγχου

Πριν οι ταξιδιώτες μπορέσουν να πάνε στην πύλη τους πρέπει να περάσουν από έλεγχο. Ένα παράδειγμα τυπικού σημείου ελέγχου φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Κάθε τέτοιο σημείο έχει μια ουρά αναμονής για τον έλεγχο διαβατηρίων και boarding pass (precheck), που πραγματοποιείται από έναν ή περισσότερους υπαλλήλους. Επίσης περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα μηχανήματα που ανιχνεύουν αποσκευές (bag scanners) και ένα ή περισσότερα μηχανήματα που ανιχνεύουν ανθρώπους (people scanners). Αυτά τοποθετούνται πάντα σε ζεύγη. Στην τρέχουσα κατάσταση το κέντρο ελέγχου περιλαμβάνει οκτώ τέτοια ζεύγη. Τέλος, ένα security area έχει και τουλάχιστον ένα σταθμό για χειρωνακτικό ψάξιμο αποσκευών (manual bag search).



Εικόνα 13: Τυπική διαρρύθμιση χώρου ελέγχου

Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Αρχικά ένας υπάλληλος ασφαλείας πρέπει να ελέγξει την ταυτότητα / διαβατήριο και την κάρτα επιβίβασης του ταξιδιώτη. Αν είναι εντάξει, ο επιβάτης μπορεί να προχωρήσει στο επόμενο βήμα. Έρευνες έχουν δείξει ότι

το 96% των ταξιδιωτών περνάει τον πρώτο αυτό έλεγχο, έχοντας τα ζητούμενα στοιχεία. Από αυτούς που δεν τα έχουν, το 90% επιστρέφει στο χώρο έκδοσης εισιτηρίων και διορθώνει τυχόν λάθη στην κάρτα επιβίβασης, ενώ το 10% δεν έχει κάποια ταυτότητα και εγκαταλείπει το αεροδρόμιο χάνοντας την πτήση του.

- Μετά το rcheck, ο υπάλληλος κατευθύνει τον επιβάτη στον ανιχνευτή με τη μικρότερη ουρά αναμονής. Ο χώρος αναμονής για τους επιβάτες που περιμένουν να υπάρξει ελεύθερος διάδρομος ελέγχου είναι περιορισμένος. Αν ο ταξιδιώτης δεν έχει χώρο να προχωρήσει πρέπει να περιμένει με τον υπάλληλο ασφαλείας μέχρι να μπορέσει να εισέλθει στο χώρο αυτό. Η μελέτη πρέπει επίσης να ερευνήσει το μέγεθος αυτού του χώρου αναμονής. Ο υπάρχων χώρος αναμονής στο T3 Security μπορεί να δεχθεί 20 άτομα. Για την κάθε ουρά στα security checkpoints δε, αν και υπάρχει κάποιο περιθώριο, για λόγους ασφαλείας δεν μπορούν να περιμένουν πάνω από 8 άτομα σε κάθε μία.
- Κατόπιν, ο ταξιδιώτης πρέπει να στείλει όλα τα προσωπικά αντικείμενα και χειραποσκευές στον σχετικό ανιχνευτή. Όταν είναι διαθέσιμο, οι επιβάτες τοποθετούν όλα τους τα αντικείμενα σε καλάθια πάνω σε ταινιόδρομο – bag scanner conveyor. Υπάρχει χώρος για τα αντικείμενα 3 ανθρώπων.
- Μόλις τοποθετήσει τα πράγματά του στην μεταφορική ταινία ο ταξιδιώτης μπορεί να προχωρήσει στον παραπλήσιο ανιχνευτή – reopple scanner. Οι δύο αυτές διεργασίες μπορούν να γίνουν παράλληλα. Μόλις τα αντικείμενα ελεγχθούν, μεταφέρονται πάλι με τον ταινιόδρομο στο χώρο παραλαβής. Υπάρχει χώρος για τα αντικείμενα 2 ατόμων στην παραλαβή. Αν γεμίσει το τελευταίο κομμάτι, καθυστερείται ο ανιχνευτής αποσκευών. Όταν πάλι ο ανιχνευτής αποσκευών είναι κατειλημμένος, «μπλοκάρει» η πρώτη μεταφορική ταινία, όπου οι επιβάτες εναποθέτουν τα αντικείμενά τους.
- 8% των αποσκευών που περνούν από τον ανιχνευτή πρέπει να ψαχτούν χειρονακτικά. Υπάρχει ένας επιπλέον υπάλληλος που κάνει τη δουλειά αυτή, δίπλα ακριβώς στον ανιχνευτή. Τσάντες που «αναμένουν» χειρονακτικό ψάξιμο παραμένουν στον ταινιόδρομο.
- 10% των επιβατών που ελέγχονται στο reopple scanner αναγκάζονται σε επανέλεγχο. Τυπικά, μετά το δεύτερο πέρασμα εντοπίζονται όλα τα ύποπτα αντικείμενα.

- Μετά την ολοκλήρωση και των δύο ελέγχων, σε τσάντα και άνθρωπο αντίστοιχα, οι επιβάτες ενώνονται πάλι με τα αντικείμενά τους, βγάζοντάς τα από τη μεταφορική ταινία.
- Περίπου 7% των αποσκευών χρειάζονται ξεχωριστό επανέλεγχο χειροκίνητα. Αυτό γίνεται σε παραπλήσιο χώρο, από έναν υπάλληλο ασφαλείας.
- Με την ολοκλήρωση του ελέγχου κάθε επιβάτης οδεύει προς την αντίστοιχη πύλη.

Η διαδικασία ελέγχου είναι αρκετά τυποποιημένη και κοινή μεταξύ αεροδρομίων, και κάποια αρκετά αξιόπιστα στοιχεία έχουν συλλεχθεί για τις επιμέρους διεργασίες. Έχει επίσης βρεθεί ότι προσθέτοντας έναν επιπλέον υπάλληλο σε μια ουρά αναμονής για precheck ή έλεγχο, η εν λόγω διεργασία μειώνεται κατά 13%. Στην περίπτωση του precheck, ο εν λόγω υπάλληλος μπορεί να διευκολύνει και άτομα που είναι καθυστερημένα για την πτήση τους, δίνοντας προτεραιότητα στην εξυπηρέτησή τους.

Πίνακας 4: Χρόνοι διεργασιών ελέγχου

Διεργασία - Process	Process Time (seconds)
1. Precheck	Ελ.: 7, Μ.: 15, Μεγ.:45
2. Τοποθέτηση αντικειμένων στη Μεταφορική Ταινία	Ελ.: 15, Μ.: 70, Μεγ.: 240
3. Χρόνος Bag Scanner Process	Ελ.: 10, Μ.: 15, Μεγ.: 45
4. Χρόνος People Scanner Process (ανά πέρασμα)	Ελ.: 3, Μ.: 5, Μεγ.: 7
5. Παραλαβή αντικειμένων	Ελ.: 3, Μεγ.: 9
6. Χειρονακτικό Ψάξιμο Αποσκευών	Ελ.: 15, Μ.: 90, Μεγ.: 120

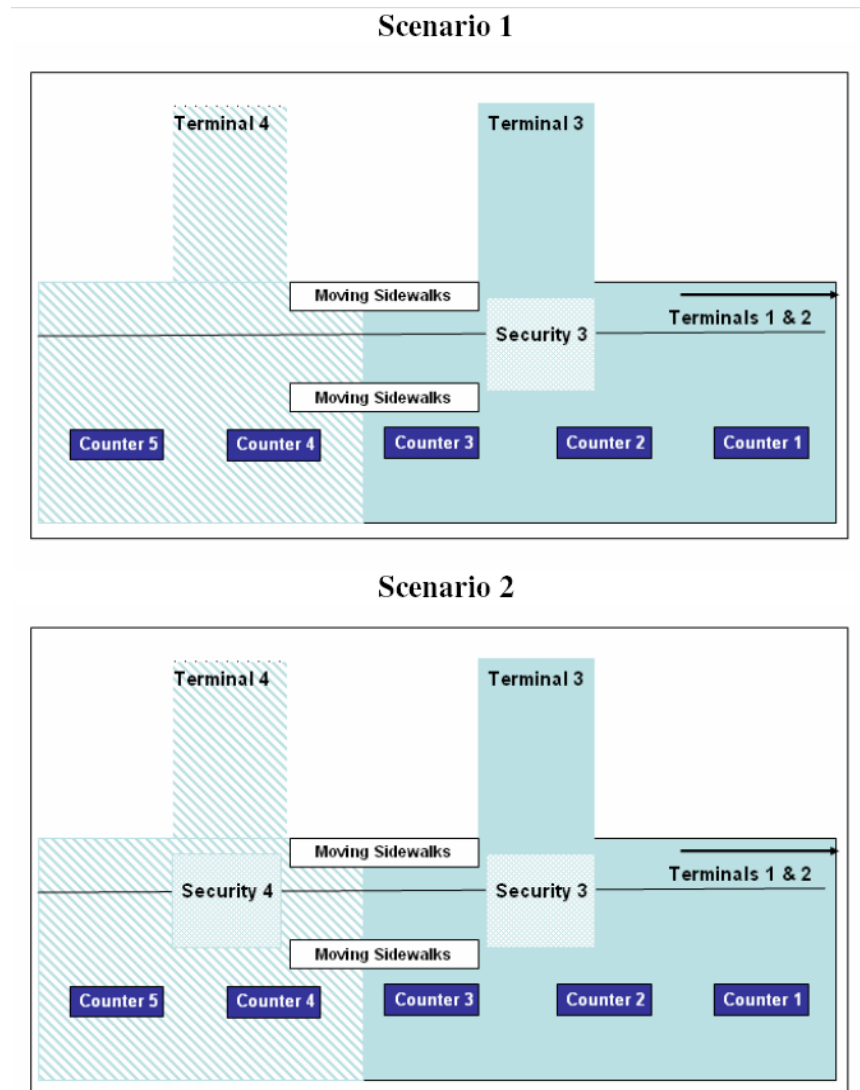
Το τρέχον σύστημα ασφαλείας έχει τους εξής πόρους:

Πίνακας 5: Πόροι συστήματος. Περιορισμοί & Κόστος.

Πόρος	Περιορισμοί	Κόστος
Standard Security	Οι υπάλληλοι αυτοί μπορούν να κάνουν όλες τις δουλειές εκτός από την επάνδρωση του ανιχνευτή αποσκευών.	18\$/ώρα
Bag Scan Security	Οι υπάλληλοι αυτοί μπορούν να κάνουν όλες τις δουλειές και την επάνδρωση του ανιχνευτή αποσκευών.	28\$/ώρα
Bag Scanner	Αυτό είναι το πλήρες σύστημα ελέγχου αποσκευών και περιλαμβάνει τις μεταφορικές ταινίες. Απαιτεί οπωσδήποτε 2 κατάλληλα άτομα για την λειτουργία του.	45.000\$ και επιπλέον 0,17\$/σάρωση
People Scanner	Απαιτεί τουλάχιστον ένα άτομο για τη λειτουργία του.	34.500\$ και επιπλέον 0,23\$/σάρωση
Manual Bag Search	Ο σταθμός αυτός απαιτεί ένα άτομο για την λειτουργία, αλλά μόνο όταν εκτελείται ψάξιμο. Το προσωπικό μπορεί να κάνει άλλα πράγματα τον υπόλοιπο χρόνο.	800\$/σταθμό

Σενάρια Διαρρύθμισης

Βάσει της μορφής του διαθέσιμου χώρου προς επέκταση, υπάρχουν δύο διαφορετικά σενάρια που είναι εφικτά. Κατά το πρώτο, θα επεκταθεί το υπάρχον κέντρο ελέγχου (Security Area 3) όσο χρειάζεται για να ανταπεξέλθει στην αυξημένη κίνηση. Στη δεύτερη επιλογή, θα δημιουργηθεί ένα επιπλέον area (Security 4), αποκλειστικά για το νέο terminal.



Εικόνα 14: Εναλλακτικά σενάρια επέκτασης Αεροδρομίου

Κάθε ταμείο (counter) έχει 50 μέτρα μήκος και απέχει 40 μέτρα από το παραπλήσιο. Η είσοδος στα security areas είναι περίπου 50 μέτρα πίσω από τα counters. Οι επιβάτες περπατούν με ρυθμό 40-110 μέτρα/λεπτό. Τα κυλιόμενα πεζοδρόμια (Moving Sidewalks) κινούνται με 40 μέτρα/λεπτό. Το 45% των επιβατών κάθετα ακίνητο σε αυτά, ενώ οι υπόλοιποι κινούνται στο 75% της κανονικής τους ταχύτητας. Μετά τον έλεγχο, οι επιβάτες χρειάζονται 5 με 16 λεπτά για να μεταβούν στις πύλες

τους. Σημειώνεται ότι οι ταξιδιώτες που κινδυνεύουν να χάσουν την πτήση τους τρέχουν με ρυθμό αυξημένο κατά 50% της κανονικής τους ταχύτητας.

Ζητούμενα μελέτης

Απαιτείται μελέτη και ανάλυση εναλλακτικών προτάσεων με χρήση εξομοίωσης για την αξιολόγησή τους. Το αεροδρόμιο ενδιαφέρεται κατεξοχήν για την σχέση κόστους – αποτελεσματικότητας και την ικανοποίηση των πελατών αλλά και για την ευελιξία του συστήματος, καθώς εισάγονται νέες τεχνολογίες και πρότυπα ασφαλείας συνεχώς.

Η ικανοποίηση των πελατών μετράται αρχικά με το **Security Time**. Είναι η χρονική διάρκεια που οι επιβάτες «ενοχλούνται» από την ασφάλεια του αεροδρομίου. Υπολογίζεται από τη στιγμή που αφήνουν τα εκδοτήρια μέχρι που εξέρχονται του security checkpoint. Το πρότυπο είναι λιγότερο από 45 λεπτά για το 90% των επιβατών και γενικός μέσος όρος στα 24 λεπτά το πολύ.

Ένα δεύτερο μέτρο της ικανοποίησης των πελατών είναι τα **Missed Flights** – το ποσοστό των πελατών που χάνουν την πτήση τους. Οι αεροπορικές εταιρίες θα ήθελαν να διαβεβαιώνουν ότι το 99% των επιβατών που ακολουθούν τις οδηγίες προσέλευσης θα φτάσουν στο αεροπλάνο 15 λεπτά πριν την προγραμματισμένη αναχώρηση, που είναι και το ζητούμενο.

Η σχέση κόστους – αποτελεσματικότητας μετριέται με το **Average Cost per Passenger** – μέσο κόστος ανά επιβάτη. Εξαιτίας φθοράς και τεχνολογικής ανεπάρκειας, μπορεί να θεωρηθεί ότι όλος ο εξοπλισμός ανανεώνεται κάθε δύο χρόνια, και ότι ο υπάρχων αντικαθίσταται άμεσα.

Προκειμένου να αξιολογηθεί ο σχεδιασμός, ζητούνται τα εξής για την τρέχουσα (3 αερογραμμές στο T3) αλλά και την μελλοντική (T3 & T4 να εξυπηρετούν 5 εταιρίες) κατάσταση:

- Η βέλτιστη κατανομή εξοπλισμού και ανθρωπίνου δυναμικού.
- Το μέγεθος του χώρου αναμονής (security waiting area) σε κάθε checkpoint.
- Ποια εταιρία πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθε εκδοτήριο – εξέταση αν υπάρχει κάποια διαφορά.
- Η διαφορά κόστους αν μειωθούν ή αυξηθούν τα πρότυπα ασφαλείας κατά 20%.

- Το πόσο πρέπει να χρεώνεται κάθε εταιρία για την παροχή της υπηρεσίας αυτής.
- Η επίπτωση στους δείκτες απόδοσης αν δημιουργούνταν μια ξεχωριστή γραμμή για elite επιβάτες στη διαδικασία precheck και η επίπτωση στο κόστος αν αυτοί οι επιβάτες έχρηζαν παράλληλα 20% μειωμένων χρόνων στον έλεγχο.
- Ο προτεινόμενος χρόνος άφιξης για τους επιβάτες ανά εταιρία.
- Η επίπτωση στο δείκτη Missed Flights υποθέτοντας ότι το 70% των επιβατών θα συμμορφωθούν με το συνιστώμενο χρόνο άφιξης και το υπόλοιπο 30% θα καθυστερήσει κατά 20%-40% του χρόνου αυτού.

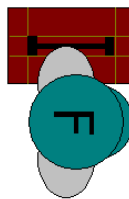
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιηθεί το αεροδρόμιο. Το μοντέλο που αναφέρεται ως παράδειγμα είναι αυτό της τρέχουσας κατάστασης, όπου τρεις αερογραμμές εξυπηρετούνται στο terminal 3 δηλαδή. Το αρχείο¹ βρίσκεται στο φάκελο «AirSec_T3_ASIS» και, όπως όλα τα αρχεία, συνάπτεται στην εργασία αυτή σε ηλεκτρονική μορφή. Γίνεται λεπτομερής αναφορά στην λογική που διέπει το κάθε σημείο αλλά και στην λειτουργία που επιτελούν κάποια πολύπλοκα modules, όπου αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί.

Γενικά Στοιχεία

Οντότητες

Το όλο σύστημα αφορά στην εξυπηρέτηση των επιβατών στο χώρο του αεροδρομίου. Οι οντότητες του συστήματος δεν θα μπορούσαν να είναι άλλες από τους επιβάτες. Μάλιστα, έχοντας συνολικά πέντε αερογραμμές (τρεις στην αρχική κατάσταση), οι ταξιδιώτες διαχωρίζονται σε τύπους, ανάλογα με την εταιρία που εξυπηρετεί τον καθένα. Έτσι έχουμε τα Entity Types: FF Passenger, PP Passenger κ.ο.κ. Κάθε οντότητα απεικονίζεται γραφικά με τη μορφή ενός επιβάτη με βαλίτσα, του οποίου το καπέλο έχει διαφορετικό χρώμα ανάλογα με την αερογραμμή στην οποία 'ανήκει'.



Εικόνα 15: Επιβάτης των αερογραμμών Fabulous Flights

Πόροι

Πόροι του συστήματος είναι ουσιαστικά όλο το προσωπικό το οποίο εργάζεται στο χώρο ελέγχου του αεροδρομίου και ο τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται.

Το προσωπικό χωρίζεται στις εξής ειδικότητες:

¹ AirSec_T3_ASISq1_WeekPlusSchedule.doe

- Precheck Security – απασχολούνται στον έλεγχο εισιτηρίων και καρτών επιβίβασης. Αν και έχουν κοινές ικανότητες με τους Standard Security officers, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθούν χωριστά καθώς η διαδικασία του Precheck αποτελεί σημαντική στένωση (bottleneck) του συστήματος. Μισθός 18\$/ώρα.
- Standard Security – επιτελούν όλες τις εργασίες πλην της λειτουργίας του ανιχνευτή αποσκευών (bag scanner). Μισθός 18\$/ώρα.
- Bag Scan Security – επιτελούν όλες τις εργασίες περιλαμβανόμενης της λειτουργίας των bag scanners. Μισθός 28\$/ώρα.

Παράλληλα, ο τεχνικός εξοπλισμός χωρίζεται σε τρία είδη:

- Bag Scanners – ανιχνευτές αποσκευών. Περιλαμβάνουν και τον ταινιόδρομο όπου οι επιβάτες εναποθέτουν τα αντικείμενά τους και απαιτούν δύο άτομα για την λειτουργία τους. Μοντελοποιούνται ανεξάρτητα σε κάθε σταθμό (security checkpoint) ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική λεπτομέρεια στη γραφική απεικόνισή τους. Κόστος 45,000\$ και 0.17\$ ανά ανίχνευση.
- People Scanners – ανιχνευτές μετάλλου για ανθρώπους. Επίσης μοντελοποιούνται ανεξάρτητα σε κάθε checkpoint. Κόστος 34,500\$ και 0.23\$ ανά ανίχνευση.
- Manual Bag Search Station – είναι ο σταθμός / θρανίο που γίνεται η χειρωνακτική ανίχνευση των αποσκευών. Κόστος 800\$ / σταθμό.

Όλοι οι πόροι του συστήματος είναι ορισμένοι και καταγεγραμμένοι στο module “Resources” του Basic Process Panel.

Χρονοδιαγράμματα

Έχοντας την πολυτέλεια της ακρίβειας των αφίξεων επιβατών σε μορφή ρυθμού ανά ώρα, η απλούστερη αλλά και ακριβέστερη μέθοδος μοντελοποίησης είναι αυτή του χρονοδιαγράμματος αφίξεων.

Στο σχετικό module (Schedules – Basic Process Panel) βρίσκονται τα χρονοδιαγράμματα ρυθμού άφιξης για κάθε εταιρία. Εξαιτίας της ανάγκης για ανεξάρτητη μελέτη ανάμεσα στις μέρες τις εβδομάδας, εκτός από εβδομαδιαία χρονοδιαγράμματα έχουν αναπτυχθεί και ημερήσια. Οι ημέρες της εβδομάδας

μπορούν να διαχωριστούν σε ζεύγη – ομάδες, καθώς μοιράζονται κοινό όγκο επιβατών. Οι ομάδες αυτές είναι οι εξής:

- MF – Δευτέρα και Παρασκευή
- TWT – Τρίτη, Τετάρτη, Πέμπτη
- WE – Σάββατο και Κυριακή

Έτσι για παράδειγμα, εξετάζοντας τη λίστα των schedules, το χρονοδιάγραμμα “FF Passenger Arrival” αναφέρεται στην εταιρία Fabulous Flights και καλύπτει όλη την εβδομάδα. Αντιθέτως, το “JJ Passenger Arrival TWT” αναφέρεται στην Jolly Jets και συγκεκριμένα στις αφίξεις των ημερών Τρίτη ως Πέμπτη της εταιρίας αυτής.

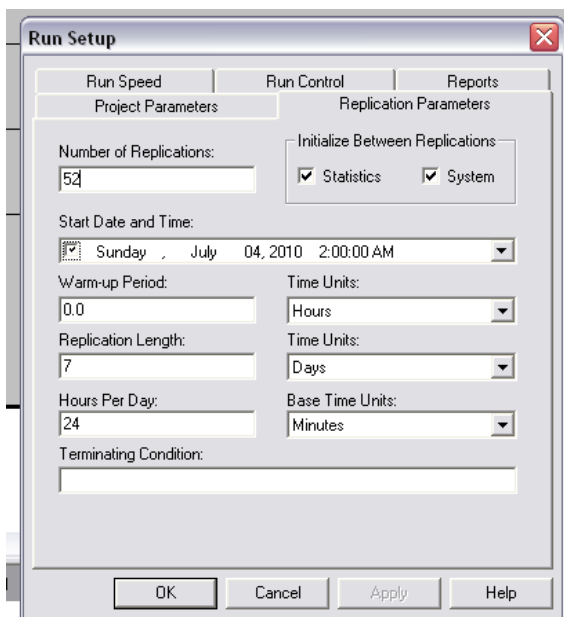
Εκτός από χρονοδιαγράμματα αφίξεων έχουν χρησιμοποιηθεί και εβδομαδιαία schedules για το προσωπικό, που ρυθμίζουν τον αριθμό των εργαζόμενων (διαθέσιμοι πόροι) ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας. Τα προγράμματα αυτά προέκυψαν ύστερα από την βελτιστοποίηση του συστήματος για κάθε ημέρα της εβδομάδας ξεχωριστά.

Run Setup

Στο μενού Run > Setup του προγράμματος βρίσκονται όλες οι παράμετροι που αφορούν τον προγραμματισμό και την εκτέλεση του μοντέλου.

Στην τελική, ολοκληρωμένη κατάσταση, μια επανάληψη διαρκεί μία εβδομάδα – 10080 λεπτά. Ο λόγος είναι εμφανής, η διάρκεια μιας εβδομάδας περιλαμβάνει έναν ολοκληρωμένο κύκλο στα διαφορετικά προγράμματα αφίξεων οντοτήτων που ορίζονται από τα ζητούμενα του προβλήματος. Συγκεκριμένα, μια επανάληψη ξεκινά Κυριακή και τελειώνει επίσης την ίδια μέρα (έχει να κάνει με το πώς ορίστηκαν τα εβδομαδιαία προγράμματα αφίξεων). Βασική μονάδα χρόνου είναι τα λεπτά.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί το εξής, παρατηρώντας τα δεδομένα των αφίξεων, κάθε μέρα τις ώρες 00:00 με 04:00 δεν υπάρχουν αφίξεις επιβατών.



Εικόνα 16: Το πλαίσιο Run Setup του μοντέλου

Είναι το χρονικό διάστημα που το σύστημα ‘καθαρίζει’, καθώς εξυπηρετούνται όλοι οι επιβάτες που είχαν προσέλθει μέχρι τα μεσάνυχτα της προηγούμενης μέρας και ‘ετοιμάζεται’ για τις αφίξεις της επόμενης. Στην περίπτωση που μια επανάληψη ξεκινούσε και τελείωνε μεσάνυχτα Κυριακής (ή οποιασδήποτε άλλης μέρας) δεν θα υπολογιζόταν η εξυπηρέτηση των επιβατών που κατέφτασαν τα τελευταία λεπτά της εβδομάδας – επανάληψης. Επομένως κρίθηκε αναγκαία η ‘ολίσθηση’ του χρόνου έναρξης και λήξης κάθε επανάληψης κατά δύο ώρες, ώστε να βρίσκεται στα πλαίσια αυτού του χρόνου εκκαθάρισης. Έτσι κάθε replication ξεκινά χρονικά ημέρα Κυριακή και ώρα 02:00 τα ξημερώματα, και τερματίζει έπειτα από μία εβδομάδα, ίδια ημέρα και ώρα.

Ο αριθμός των επαναλήψεων ορίζεται στις 52. Εφόσον μία επανάληψη αντιστοιχεί σε μια εβδομάδα, οι 52 επαναλήψεις καλύπτουν τη λειτουργία του αεροδρομίου για έναν ολόκληρο χρόνο, και επιτρέπουν την ασφαλή (στατιστικά) έκδοση αποτελεσμάτων. Σε περιπτώσεις διερεύνησης αν μια κατάσταση είναι αποδεκτή βάσει των περιορισμών του συστήματος επαρκούν λιγότερες επαναλήψεις (10 – 20). Ο λόγος της εκτέλεσης λιγότερων επαναλήψεων δεν είναι άλλος από τον απαιτούμενο χρόνο. Η εξομοίωση για έναν χρόνο χωρίς την κίνηση των γραφικών απαιτεί 30 – 40 λεπτά σε ένα σύγχρονο προσωπικό υπολογιστή. Στις περιπτώσεις παραμετρικής ανάλυσης, όπου πρέπει να γίνει μεγάλος αριθμός εξομοιώσεων κάτι τέτοιο θα ήταν απίστευτα χρονοβόρο. Άλλωστε, στόχος στις περιστάσεις αυτές δεν είναι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων¹, αλλά ο έλεγχος αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί δεδομένων εξόδου – %Missed Flights, Security Time, %Served in less than 45 min. Η εικόνα για τις παραμέτρους αυτές είναι ξεκάθαρη έπειτα από 10 ως 20 επαναλήψεις. Σε κάθε περίπτωση εξετάζεται η τυπική απόκλιση των μεγεθών που παράγονται και αν είναι οριακές οι τιμές αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων ώστε να είναι ακριβέστερα τα αποτελέσματα.

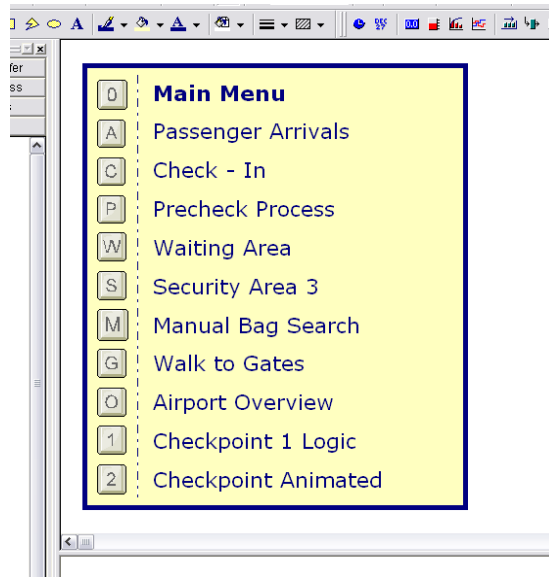
Το Βασικό Μοντέλο

Αρχικό Μενού

Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του μοντέλου καθιστά απαραίτητη μια υποτυπώδη ταξινόμηση και ομαδοποίηση των δομικών του στοιχείων. Ανάλογα με τη διαδικασία στην οποία αναφέρονται, τα modules συγκεντρώνονται σε προκαθορισμένα σημεία στο χώρο απεικόνισης. Ο χρήστης μπορεί να έχει άμεση πρόσβαση στα σημεία αυτά

¹ Και λέγοντας «ακρίβεια αποτελεσμάτων» υπονοούνται διαφορές της τάξης του 0,5% και λιγότερο.

πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται δίπλα στην περιγραφή, στο 'αρχικό μενού' του μοντέλου. Για να μεταβεί κανείς στην οπτική γωνιά (view) του μενού αυτού αρκεί να πατήσει κανείς 0 (μηδέν).

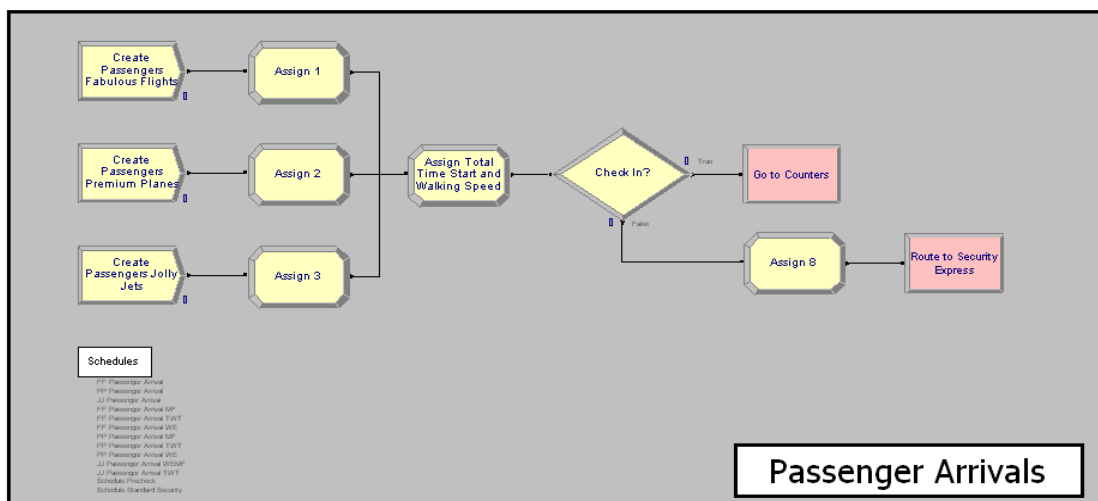


Εικόνα 17: Το βασικό "μενού" του μοντέλου

Αποσαφηνίζεται ότι το μενού δεν είναι προγραμματιστικά λειτουργικό, είναι απλά μια τεχνική μετάβασης σε προκαθορισμένες οπτικές γωνίες (predefined views) με πλήκτρα συντόμευσης (hotkeys) που έχουν οριστεί από το μελετητή.

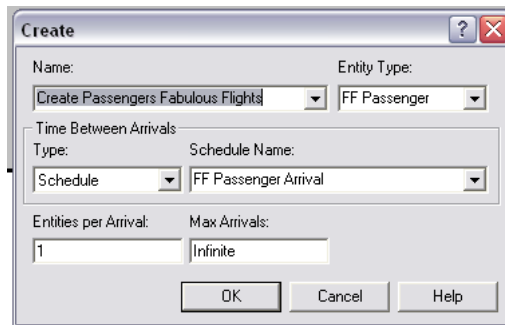
Αφίξεις Επιβατών

Στο αρχικό αυτό τμήμα δημιουργούνται οι οντότητες – επιβάτες, τους ανατίθενται όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά και παράμετροι και κατόπιν μεταβαίνουν στον πρώτο σταθμό εξυπηρέτησής τους.



Εικόνα 18: Τμήμα μοντέλου - Αφίξεις επιβατών

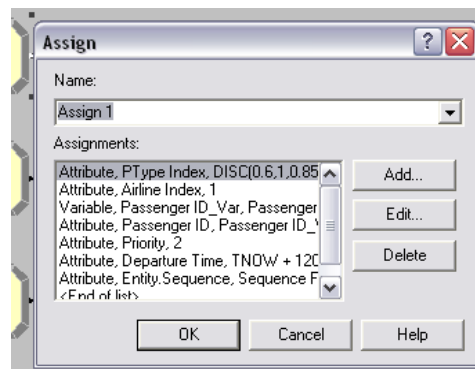
Τρία Create Modules αναλαμβάνουν τη δημιουργία των επιβατών. Καθένα από αυτά παράγει ένα entity type, ανάλογα με την εταιρία, και με συχνότητα ίση με αυτή που ορίζει ο ρυθμός αφίξεων όπως αυτός καταγράφεται στα Arrival Schedules.



Εικόνα 19: Δομικό στοιχείο "δημιουργίας" επιβατών

Κατόπιν στα Assign Modules 1 – 3 γίνεται η ανάθεση attributes και variables. Συγκεκριμένα σε κάθε οντότητα ορίζονται τα εξής:

- PType Index, Attribute. Αντιστοιχεί σε ένα μητρώο τριών κελιών που περιλαμβάνει τους τύπους των επιβατών (1-standard, 2-elite, 3-express). Ανάλογα με την αερογραμμή οι τύποι των επιβατών ορίζονται σε μορφή attribute μέσω διακριτής κατανομής.
- Airline Index, Attribute. Αντιστοιχίζει τον επιβάτη στην εταιρία μέσω ενός μητρώου με τιμές 1-3 για τις τρεις αερογραμμές. Εξαιρετικά χρήσιμο στη συνέχεια.
- Passenger ID, Attribute. Είναι η 'ταυτότητα' του επιβάτη, ένας αύξων αριθμός που τον καθιστά μοναδικό. Χρησιμεύει στην εναπόθεση και παραλαβή της σωστής χειραποσκευής στη διαδικασία έλεγχου. Παράλληλα η μεταβλητή Passenger ID αυξάνεται κατά μία μονάδα.
- Departure Time, Attribute. Είναι ο χρόνος αναχώρησης της πτήσης. Ορίζεται στα 120 λεπτά (μέσω της εντολής $TNOW + 120$) από τη στιγμή που φτάνει ο επιβάτης στο αεροδρόμιο. Χρησιμεύει σαν τιμή σύγκρισης στο τέλος για να ελεγχθεί αν πρόλαβε την πτήση του.
- Entity Sequence, Attribute. Είναι μια σειρά σταθμών τους οποίους πρέπει να επισκεφθεί ο επιβάτης στο αεροδρόμιο. Ουσιαστικά διαφέρει ο πρώτος σταθμός για όλους τους επιβάτες, που είναι το εκδοτήριο (counter) και ο τελικός

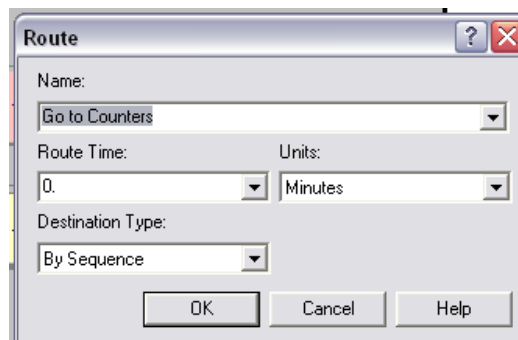


Εικόνα 20: Απόδοση Attributes στις οντότητες

σταθμός στην περίπτωση των δύο terminals, που είναι οι πύλες (gates). Εξαιρετικά χρήσιμο για την εύκολη μελέτη αλλαγών, όσων αφορά στο ποιο counter ανατίθεται στην κάθε εταιρία.

Ακολουθεί ένα Assign Module, κοινό για όλους τους επιβάτες, που καθορίζει το χρόνο άφιξής τους στο αεροδρόμιο και την ταχύτητα που κινείται καθένας. Η ταχύτητα ορίζεται με την ίση κατανομή μεταξύ 40 και 110 μέτρων/λεπτό – UNIF(40,110).

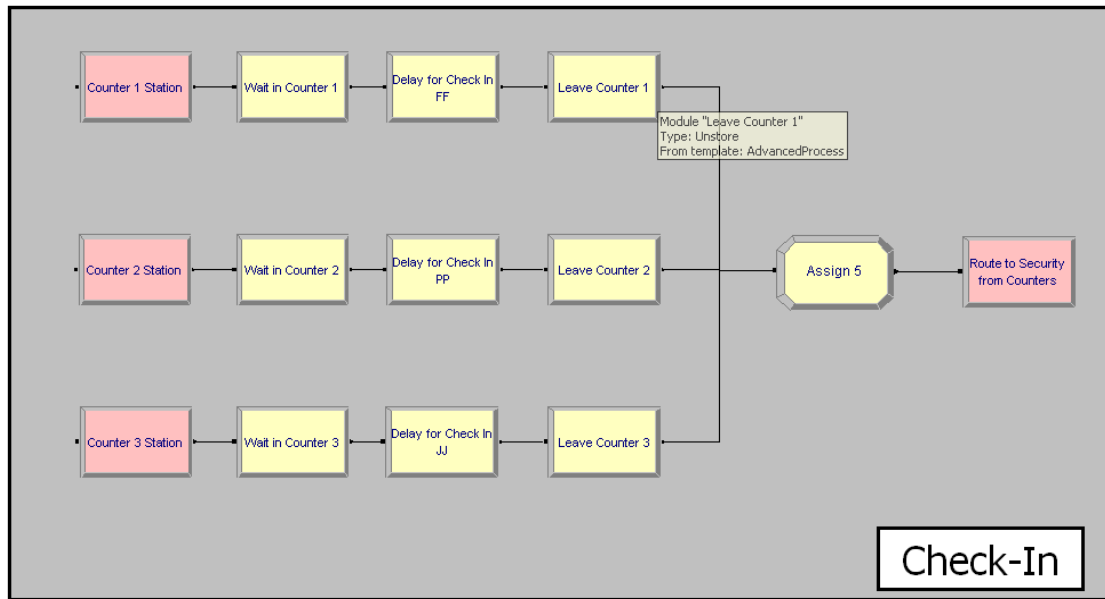
Κατόπιν ελέγχεται στο στοιχείο Decide, αν ο ταξιδιώτης είναι express (PType Index == 3) ή θα πρέπει να πάει κανονικά στα εκδοτήρια. Στην περίπτωση που έχει ήδη το εισιτήριό του, μεταβαίνει άμεσα στο χώρο ελέγχου μέσω του module “Route to Security Express”. Προτού συμβεί αυτό καθορίζεται από ένα Assign module η έναρξη του χρόνου Security Time και προσαυξάνεται κατά ένα βήμα η σειρά των σταθμών που πρέπει να επισκεφθούν, καθώς παραλείπουν τα εκδοτήρια (Entity.Jobstep + 1). Για τους υπόλοιπους ταξιδιώτες, ένα Route module αναλαμβάνει τη μεταφορά τους στα counters.



Εικόνα 21: Route module - Μετάβαση στα εκδοτήρια εισιτηρίων

Το Route module βρίσκεται στο πάνελ «Advanced Transfer». Επιτρέπει τη μοντελοποίηση της μεταφοράς των οντοτήτων από ένα σημείο του μοντέλου σε ένα άλλο, περιλαμβανομένου του χρόνου της μεταφοράς και τη δυνατότητα απεικόνισης της διαδρομής αυτής γραφικά. Στο συγκεκριμένο, οι οντότητες μεταφέρονται στον επόμενο σταθμό που ορίζεται στην αλληλουχία Sequence, που αποτελεί χαρακτηριστικό κάθε μιας. Δεν υπάρχει διάρκεια στη μεταφορά αυτή, καθώς η άφιξη των πελατών στο σύστημα ισοδυναμεί με τη χρονική στιγμή άφιξής τους στα εκδοτήρια.

Διαδικασία Check-In



Εικόνα 22: Τμήμα μοντέλου - Διαδικασία check-in

Στην ενότητα αυτή οι επιβάτες φθάνουν στο κατάλληλο εκδοτήριο ανάλογα με την εταιρία και εξυπηρετούνται.

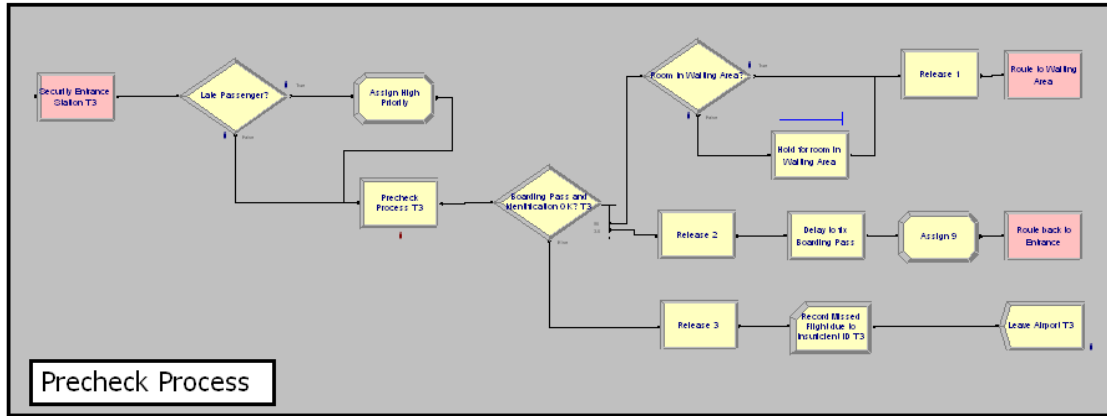
Με τη χρήση Station modules για τη γραφική απεικόνιση κάθε counter οι επιβάτες εισέρχονται και περιμένουν για ορισμένο χρονικό διάστημα την εξυπηρέτησή τους. Η διάρκεια αυτή είναι μεταβλητή, και ορίζεται με τριγωνική κατανομή ανάλογα με την εταιρία και τον τύπο του επιβάτη. Για να επιτευχθεί αυτό στο Delay module «Delay for Check In» του κάθε εκδοτηρίου δίνεται η χρονική διάρκεια που είναι αποθηκευμένη σε ένα μητρώο 3x3 με την εντολή: `Check In Time (PType Index, Airline Index)`.

Καθαρά για λόγους γραφικής απεικόνισης, χρησιμοποιείται ένα ζεύγος module Store (Wait in Counter) – Unstore (Leave Counter), πριν και μετά το στοιχείο Delay.

Έχοντας παραλάβει το εισιτήριό τους, οι επιβάτες πρέπει να προχωρήσουν στο χώρο ασφαλείας. Ορίζεται (Assign 5) η έναρξη του χρόνου Security Time και οι οντότητες εισέρχονται σε ένα Route module (Route to Security from Counters). Από εδώ κατευθύνονται στο Security Area. Η απόσταση όμως του εκδοτηρίου που χρησιμοποιεί η κάθε εταιρία από το χώρο ελέγχου διαφέρει. Έτσι, στο πεδίο route time εντός του δομικού στοιχείου, ορίζεται ο χρόνος μετάβασης: `Distance C123 to S3 (Airline Index,1) / Walking Speed`. Το μητρώο 3x1 “Distance C123 to S3” περιλαμβάνει τις αποστάσεις από τα τρία εκδοτήρια μέχρι το χώρο ασφαλείας. Το

πρόγραμμα διαβάζει την τιμή που αντιστοιχεί στο counter κάθε εταιρίας και διαιρεί την απόσταση αυτή με την παράμετρο Walking Speed που έχει προσδοθεί ως χαρακτηριστικό στην κάθε οντότητα – επιβάτη προηγουμένως.

Διαδικασία Precheck



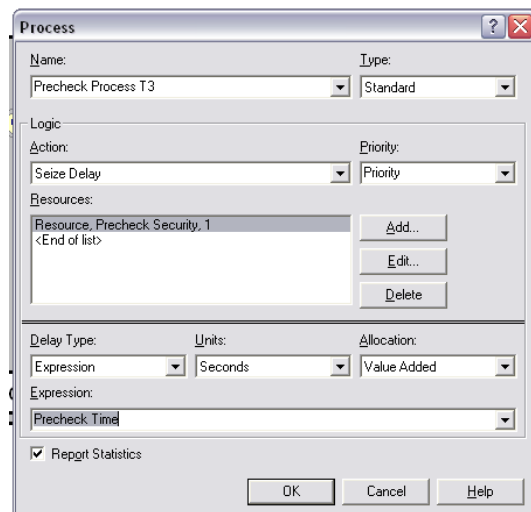
Εικόνα 23: Τμήμα μοντέλου - Έλεγχος διαβατηρίων & καρτών επιβίβασης

Πρώτος σταθμός στο χώρο ασφαλείας είναι το precheck, ο έλεγχος δηλαδή των εισιτηρίων και καρτών επιβίβασης.

Φτάνοντας στο χώρο αυτό οι επιβάτες υπόκεινται στη διαδικασία precheck. Μάλιστα, αν για κάποιο λόγο έχουν καθυστερήσει, τους αποδίδεται προτεραιότητα (Assign High Priority). Το κριτήριο για την καθυστέρηση είναι να απομένει μόνο μία ώρα μέχρι τη στιγμή που πρέπει να βρίσκονται στην πύλη αναχώρησης¹ και να υπάρχουν πάνω από 100 άτομα στην ουρά τη συγκεκριμένη στιγμή που φτάνουν στο precheck.

`Departure Time - 75 <= TNOW && NQ(Precheck Process T3.Queue) >= 100.`

Στο process module που αναπαρίσταται η διαδικασία, ο επιβάτης καταλαμβάνει μια μονάδα πόρου «Precheck Security». Καθυστερεί τον πόρο αυτό για προκαθορισμένο χρόνο που δίνεται με τριγωνική κατανομή στην έκφραση Precheck Time, αλλά δεν τον απελευθερώνει αμέσως, θα επεξηγηθεί παρακάτω το γιατί.

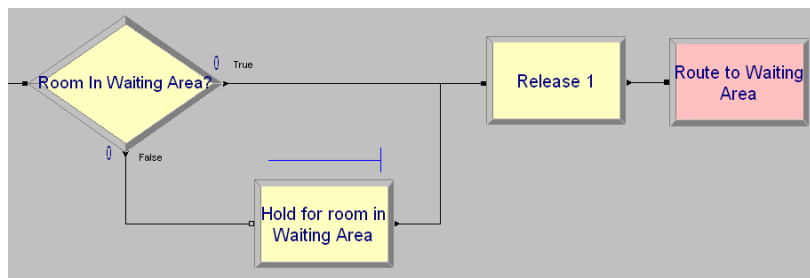


Εικόνα 24: Precheck Process

¹ Άρα 75 λεπτά πριν την αναχώρηση της πτήσης.

Από τη διαδικασία του ελέγχου υπάρχουν τρεις πιθανές εκβάσεις, με πιθανότητες 96%, 3.6% και 0.4% αντίστοιχα¹. Ακολουθεί η λογική καθημίας.

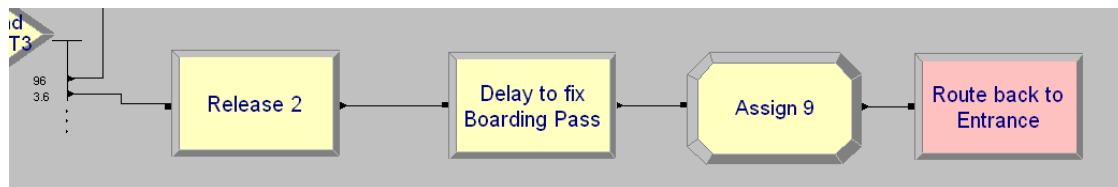
Διαβατήριο και κάρτα επιβίβασης είναι εντάξει. Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται αν υπάρχει χώρος στον ειδικά σχεδιασμένο χώρο αναμονής που έπεται του ελέγχου αυτού. Ο χώρος αναμονής μπορεί να δεχτεί συγκεκριμένο αριθμό ατόμων και ορίζεται από την έκφραση «Room in Waiting Area».



Εικόνα 25: Μετάβαση στο χώρο αναμονής

Αν ναι ο επιβάτης ελευθερώνει τον ελεγκτή (Release module) και προχωράει. Αν όχι παραμένει σε ένα Hold module, μέχρι να υπάρξει χώρος για να προχωρήσει, χωρίς να ελευθερώσει τον υπάλληλο. Το Hold module αναμένει ένα σήμα που ισοδυναμεί με την ύπαρξη ελεύθερου χώρου και μόνο όταν το δεχθεί αφήνει – ελευθερώνει μία οντότητα από αυτές που αναμένουν στο «εσωτερικό» του. Κατόπιν, η ελευθερωμένη οντότητα αποδεσμεύει τον πόρο και προχωράει.

Πρόβλημα στην κάρτα επιβίβασης. Στην περίπτωση αυτή ο επιβάτης πρέπει να επιστρέψει στα εκδοτήρια για να επιδιορθωθεί το πρόβλημα. Από πλευράς μοντελοποίησης, η οντότητα αποδεσμεύει τον υπάλληλο και καθυστερείται σε ένα Delay module για χρόνο ίσο με δύο φορές την απόσταση από το χώρο ασφαλείας μέχρι το counter συν 5 λεπτά².



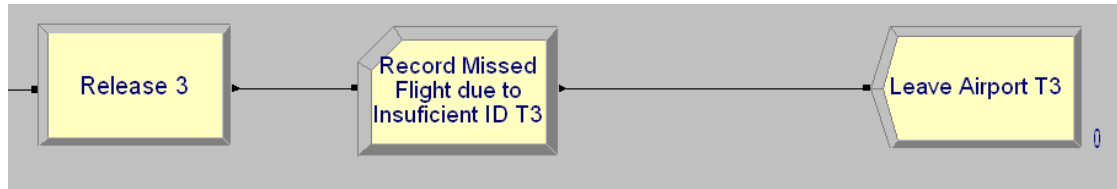
Εικόνα 26: Επιδιόρθωση κάρτας επιβίβασης

¹ Decide module – N way by chance.

² $5 + 2 * (\text{Distance C123 to S3 (Airline Index,1)} / \text{Walking Speed})$. Τα 5 επιπλέον λεπτά έχουν επιλεγεί αυθαίρετα για την επιδιόρθωση της κάρτας επιβίβασης.

Κατόπιν γίνεται εκ νέου ανάθεση της έναρξης του χρόνου Security Time και οδηγείται στο σταθμό εισόδου στο χώρο ασφαλείας με τη βοήθεια ενός Route module.

Ανεπάρκεια στην ταυτοποίηση του επιβάτη. Ο ταξιδιώτης αποδεσμεύει τον πόρο, καταγράφεται μέσω ενός Record module ότι έχασε την πτήση λόγω λειψούς ταυτοποίησης και εγκαταλείπει το σύστημα (Leave module).

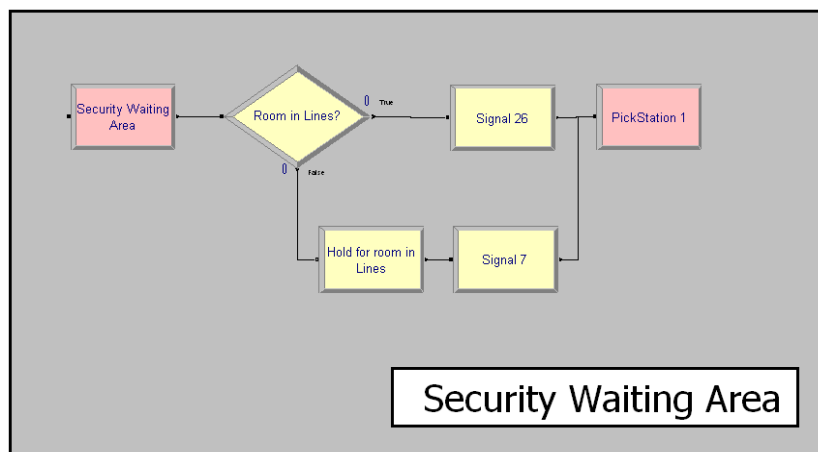


Εικόνα 27: Αναχώρηση λόγω ελλειπούς ταυτοποίησης

Σημειώνεται ότι ο αριθμός των υπαλλήλων «Precheck Security» είναι σαφώς πεπερασμένος, οπότε σε περίπτωση συμφόρησης στην επόμενη περιοχή ελέγχου, και κατ' επέκταση στο χώρο αναμονής που έπεται, οι precheck officers αδυνατούν να εξυπηρετήσουν το κοινό. Αυτό διότι αν δεν υπάρχει χώρος να προχωρήσουν οι επιβάτες, οι υπάλληλοι δεν αποδεσμεύονται, όπως ρητά αναφέρεται στην περιγραφή του προβλήματος.

Χώρος Αναμονής

Στο σημείο αυτό οι επιβάτες αναμένουν να υπάρξει ελεύθερος χώρος στα security checkpoints, που περιλαμβάνουν την ανίχνευση χειραποσκευών και ανθρώπων.



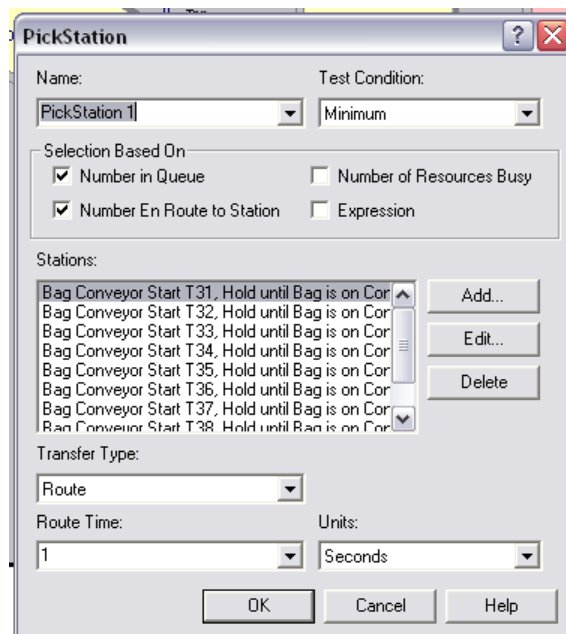
Εικόνα 28: Τμήμα μοντέλου - Χώρος αναμονής

Αρχικά οι επιβάτες εισέρχονται στο σταθμό από τον προηγούμενο χώρο του ελέγχου «precheck». Κατόπιν ελέγχεται αν υπάρχει χώρος στις ουρές των security checkpoints μέσω ενός Decide module. Υπενθυμίζεται ότι σε κάθε ζεύγος bag –

people scanner μπορούν να περιμένουν για λόγους ασφαλείας το πολύ οκτώ επιβάτες. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει, οι οντότητες αναμένουν σε ένα Hold module, μέχρι να δοθεί σήμα ότι δημιουργήθηκε χώρος. Στο στοιχείο αυτό αντιστοιχεί μια ουρά αναμονής, το μέγεθος της οποίας συγκρίνεται κατά την προηγούμενη διαδικασία (precheck) και αποτελεί το κριτήριο για το αν θα προχωρήσουν στο χώρο αναμονής οι επιβάτες.

Σε κάθε περίπτωση – είτε αν υπάρχει χώρος στα security checkpoints, είτε αν η οντότητα περίμενε μέχρι να ελευθερωθεί χώρος – και πριν προχωρήσει η οντότητα στο σημείο επιλογής security checkpoint, δίνει ένα σήμα καθώς περνάει από ένα Signal module. Το σήμα αυτό έχει συγκεκριμένη τιμή και είναι ακριβώς το σήμα που «περιμένει» το στοιχείο «Hold for room in Waiting Area» που υπάρχει στο χώρο precheck και καθυστερεί τους επιβάτες σε περίπτωση κορεσμού του χώρου αναμονής.

Έχοντας δώσει το σήμα, η οντότητα εισέρχεται στο module PickStation¹. Αυτό το αρκετά ιδιαίτερο δομικό στοιχείο δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ ορισμένων σταθμών βάσει επίσης ορισμένων κριτηρίων. Με απλά λόγια, διαλέγει ποιο security checkpoint έχει το λιγότερο κόσμο και στέλνει εκεί τον επιβάτη.



Εικόνα 29: Το module PickStation

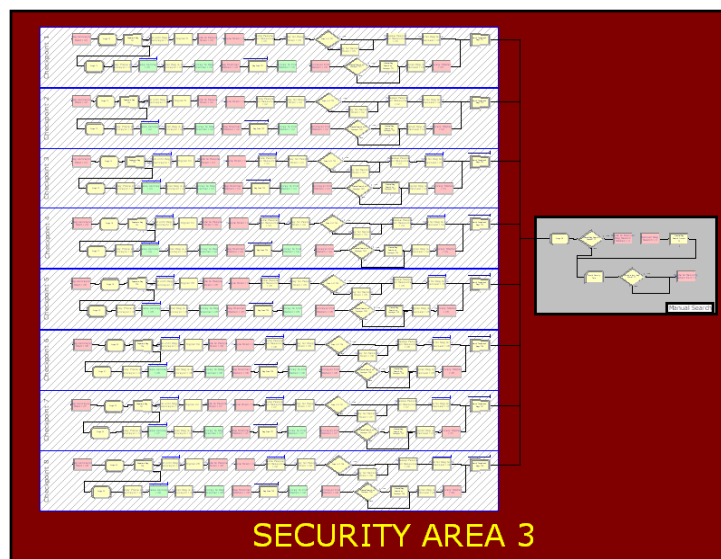
Αναλυτικά, εισάγεται το σύνολο των σταθμών που μπορεί να μεταβεί η οντότητα. Για κάθε σταθμό αντιστοιχίζεται μια ουρά αναμονής, η οποία να έχει ουσιαστικό

¹ Βρίσκεται στο Advanced Transfer Panel.

αντίκτυπο στην επιλογή σταθμού. Προσδιορίζονται τα κριτήρια βάσει των οποίων θα γίνει η επιλογή. Εν τω προκειμένω έχει επιλεχτεί ο αριθμός οντοτήτων στην ουρά και ο αριθμός οντοτήτων που οδεύουν προς τον σταθμό αυτό. Τέλος ορίζεται το μέτρο σύγκρισης, που εδώ φυσικά είναι το minimum – ελάχιστο.

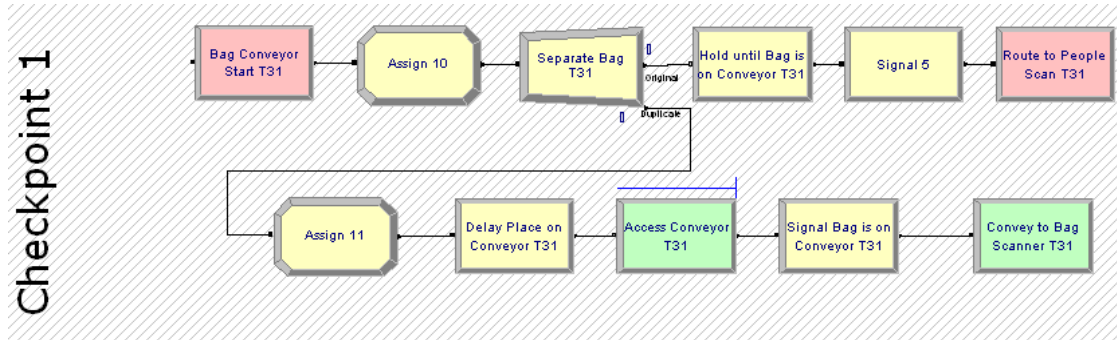
Χώρος Ελέγχου – Security Checkpoints

Πυρήνας όλης της διαδικασίας ελέγχου στο αεροδρόμιο και συνεπώς κύριο τμήμα του μοντέλου είναι τα security checkpoints, σημείο όπου οι επιβάτες ελέγχονται για τυχόν επικίνδυνα αντικείμενα πάνω τους και στις αποσκευές τους. Αποτελείται από πολλά (8 στην τρέχουσα κατάσταση) ζεύγη People Scanner και Bag Scanner. Κάθε ζεύγος εξοπλισμού μαζί με το προσωπικό συνιστά ένα security checkpoint. Θα παρουσιασθεί αναλυτικά ένα μόνο security checkpoint, καθώς δεν υπάρχει διαφορά στη λογική μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι σε κάθε δομικό στοιχείο, το όνομα που έχει δοθεί αντικατοπτρίζει την λειτουργία του, ενώ η κατάληξή του «T31» υπονοεί ότι ανήκει στο checkpoint 1, που βρίσκεται στο χώρο ασφαλείας του Terminal 3.



Εικόνα 30: Τμήμα μοντέλου - Χώρος ελέγχου Security Area 3, Οκτώ checkpoints

Οι οντότητες καταφθάνουν στο κάθε checkpoint όπως ορίσθηκε προηγουμένως, από το Pickstation module. Αρχικός σταθμός (Station module) σε κάθε σημείο ελέγχου είναι η αρχή της μεταφορικής ταινίας, στην οποία κάθε επιβάτης πρέπει να βάλει τα προσωπικά του αντικείμενα σε ένα καλάθι.



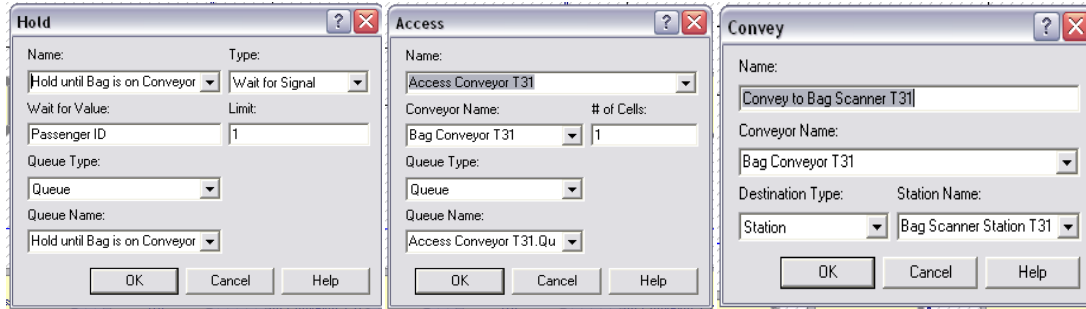
Εικόνα 31: Λογική Checkpoint 1 - Αρχή

Φθάνοντας στο σταθμό αυτό, η οντότητα αποκτά μια νέα εικόνα, αυτή ενός επιβάτη χωρίς τη βαλίτσα του, μέσω ενός Assign module. Καθώς η βαλίτσα¹ πρέπει να διαχωριστεί από τον ιδιοκτήτη της και να περάσει από ξεχωριστή διαδικασία, είναι απαραίτητο αυτή να έχει τη μορφή οντότητας. Μοναδικός τρόπος για να γίνει αυτό είναι να «κλωνοποιηθεί» η αρχική οντότητα μέσω ενός Separate module και την επιλογή «Duplicate Original». Οι δύο οντότητες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και μεταβλητές, τα attributes δηλαδή διατηρούνται.

Κατόπιν ο επιβάτης πρέπει να εναποθέσει τα αντικείμενα και τη χειραποσκευή του στο ειδικό καλάθι, διαδικασία η οποία έχει κάποια χρονική διάρκεια. Όσο γίνεται αυτό η αυθεντική οντότητα – επιβάτης περιμένει σε ένα Hold module (Hold until Bag is on Conveyor). Η οντότητα αντίγραφο – βαλίτσα αφού αποκτήσει νέα entity picture (Assign module) καθυστερείται για προκαθορισμένο χρόνο² σε ένα Delay Module. Κατόπιν προσπαθεί να αποκτήσει πρόσβαση στον ταινιόδρομο με το Access Conveyor module και μόλις το επιτύχει αυτό δίνει σήμα στην αυθεντική οντότητα – επιβάτη ότι είναι στο δρόμο για τον έλεγχο της (Signal Bag is on Conveyor module). Το σήμα αυτό είναι ίσο με την τιμή της μεταβλητής Passenger ID, που είναι μοναδική για κάθε ζεύγος επιβάτη – χειραποσκευής. Επομένως ο ταξιδιώτης θα συνεχίσει μόνο όταν η δική του χειραποσκευή έχει μπει στη μεταφορική ταινία.

¹ Και λέγοντας βαλίτσα εννοούνται όλα τα προσωπικά αντικείμενα που πρέπει να ελεγχθούν από τον αντίστοιχο ανιχνευτή.

² Place Bag on Conveyor Time – έκφραση στην οποία αντιστοιχεί τριγωνική κατανομή: TRIA(15,70,240)



Εικόνα 32: Λογική Checkpoint 1 - Τα δομικά στοιχεία Hold, Access, Convey

Η οντότητα – βαλίτσα μεταφέρεται μέσω του module Convey στον επόμενο σταθμό του ταινιόδρομου που είναι το Bag Scanner. Ο επιβάτης αφού ελευθερωθεί από το Hold module «δίνει» ένα σήμα (Signal 5). Το σήμα αυτό αφορά την περίπτωση που έχουν γεμίσει οι ουρές αναμονής των οκτώ ατόμων στα security checkpoints και υπάρχουν επιβάτες που περιμένουν στο χώρο αναμονής που προηγείται αυτών. Τέλος, μεταβαίνει στο χώρο που υπάρχει το people scanner, ακριβώς δίπλα ουσιαστικά, μέσω ενός Route module.

Πριν προχωρήσουμε στην επεξήγηση του υπόλοιπου σκέλους ενός σταθμού ασφαλείας, μια σημείωση για τους ταινιόδρομους και την μοντελοποίηση τους στο Arena.

Στην περίπτωση που εξετάζεται, η μεταφορική ταινία του bag scanner είναι χαρακτηριστική περίπτωση conveyor¹. Για τη μοντελοποίηση καθεμιάς χρειάζεται αρχικά να οριστεί ένα segment. Στο segment module προσδιορίζονται οι σταθμοί της μεταφορικής ταινίας και οι μεταξύ τους αποστάσεις σε αριθμό κελιών – cells του ταινιόδρομου. Έτσι στην περίπτωση του πρώτου bag scanner, ο ταινιόδρομος έχει τους εξής σταθμούς:

Name	Beginning Station	Next Stations
Bag Conveyor T31.Segment	Bag Conveyor Start T31	2 rows

Next Station	Length
1 Bag Scanner Station T31	4
2 Conveyor End Station T31	2

Double-click here to add a new row.

Εικόνα 33: Segment module - Οι σταθμοί της μεταφορικής ταινίας T31

¹ Έχει γίνει αναφορά των διαθέσιμων τρόπων μοντελοποίησης μετακινήσεων σε προηγούμενο εδάφιο.

Ο σταθμός όπου βρίσκεται το Bag Scanner απέχει τρία κελιά από την αρχή της μεταφορικής ταινίας και ο ίδιος καταλαμβάνει ένα κελί. Ο τελικός σταθμός απέχει δυο κελιά από τον δεύτερο.

Έχοντας ορίσει τους σταθμούς, επιλέγουμε της παραμέτρους της μεταφορικής ταινίας στο module conveyor, πάντα στο Advanced Transfer Panel:

Conveyor - Advanced Transfer										
	Name	Segment Name	Type	Velocity	Units	Cell Size	Max Cells Occupied	Accumulation Length	Initial Status	Report Statistics
1	Bag Conveyor T31	Bag Conveyor T31.Segment	Accumulating	1	Per Second	1	1	1	Active	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Bag Conveyor T32	Bag Conveyor T32.Segment	Accumulating	1	Per Second	1	1	1	Active	<input type="checkbox"/>

Εικόνα 34: Conveyor module

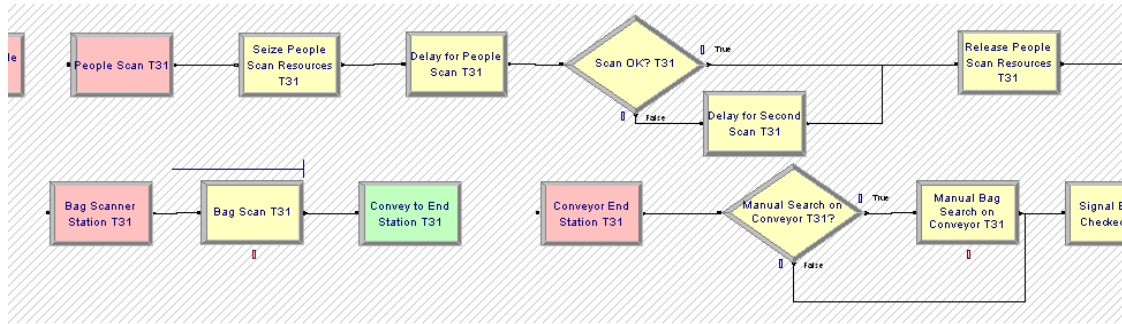
Στις επιλογές συγκαταλέγονται η ταχύτητα, το μέγεθος του κελιού και ο τύπος της μεταφοράς. Οι ταινιόδρομοι χωρίζονται σε accumulating και non-accumulating. Στην πρώτη περίπτωση, αν υπάρχει φραγμός κάπου τα μεταφερόμενα τεμάχια έρχονται και «κολλάνε» στα μπροστινά, εξαλείφοντας τυχόν κενά που υπάρχουν μεταξύ τους. Στη δεύτερη περίπτωση αυτό δεν συμβαίνει, αλλά αν φράξει ή σταματήσει για κάποιο λόγο ο ταινιόδρομος τα τεμάχια παραμένουν στη θέση τους, προσεγγίζει δηλαδή τη λειτουργία μεταφορικών μηχανών με σκαφίδια.

Για τους ταινιόδρομους των bag scanners έχει επιλεγθεί μέγεθος κελιού 1 (μονάδα), ταχύτητα 1 κελί ανά δευτερόλεπτο¹, τύπος accumulating, και ελάχιστη απόσταση μεταξύ των αντικειμένων επίσης 1. Συνεπώς, κάθε βαλίτσα που τοποθετείται καταλαμβάνει ένα κελί, μεταφέρεται με ταχύτητα 1 κελί/sec και σε περίπτωση φραγμού – το bag scanner είναι κατειλημμένο – οι βαλίτσες πλησιάζουν η μία την άλλη σε απόσταση 1 κελιού. Οπότε σύμφωνα και με τη δεδομένη κατάσταση, η μεταφορική ταινία:

- ✓ Χωράει 3 βαλίτσες πριν το μηχάνημα ανίχνευσης.
- ✓ Το bag scanner καταλαμβάνει μία θέση – cell στον ταινιόδρομο.
- ✓ Χωράει 2 βαλίτσες μετά το μηχάνημα ανίχνευσης.
- ✓ Έχει συνολικό μήκος 6 κελιών.

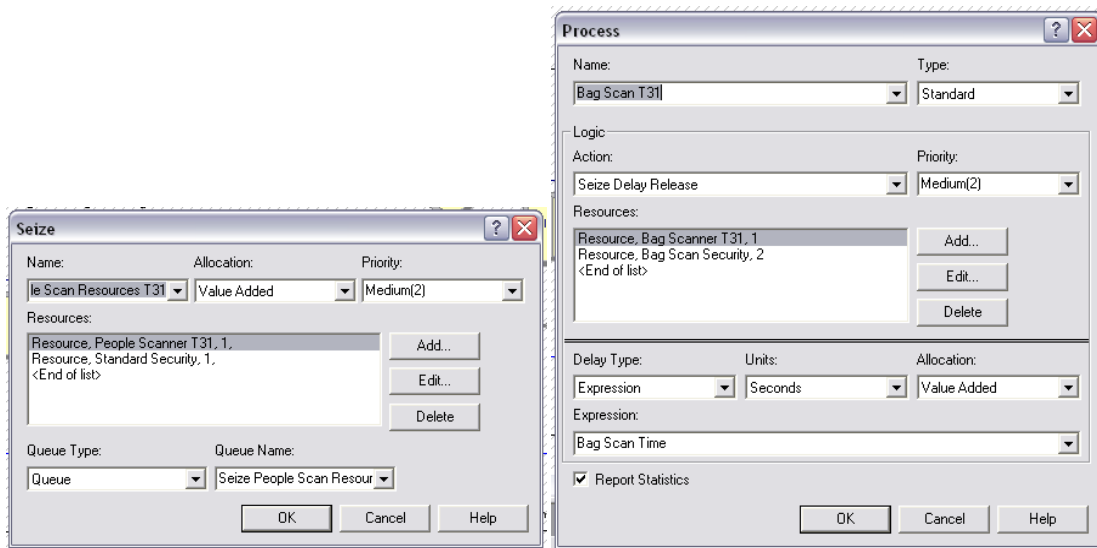
Συνεχίζοντας στην περιγραφή της λειτουργίας ενός security checkpoint, οι δύο οντότητες επιβάτης και βαλίτσα, είναι πλέον πλήρως ανεξάρτητες και η καθεμιά ακολουθεί τη δική της διαδρομή.

¹ Το μέγεθος και η ταχύτητα δεν είναι πραγματικά μεγέθη με μονάδες αλλά σχετικά με το μέγεθος του cell size που ορίζεται στο κάθε conveyor.



Εικόνα 35: Λογική Checkpoint 1 – Μεσαίο τμήμα

Ο επιβάτης καταλαμβάνει τους απαραίτητους πόρους για να γίνει ο έλεγχός του. Αυτοί είναι ένας security officer και το μηχάνημα People Scanner («Seize People Scan Resources»). Η οντότητα καθυστερείται σε ένα Delay module για τον προκαθορισμένο χρόνο ελέγχου και στην περίπτωση που δεν είναι επιτυχής (Decide module: «Scan OK?»), επαναλαμβάνεται. Μόλις ολοκληρωθεί η ανίχνευση του επιβάτη, απελευθερώνονται οι πόροι που απασχολήθηκαν μέσω του Release module.

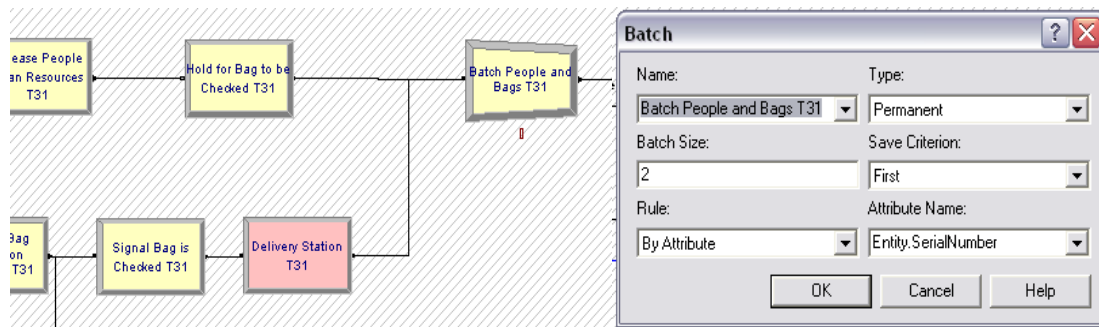


Εικόνα 36: Seize και Process modules - έλεγχος επιβατών και αποσκευών

Παράλληλα, η χειραποσκευή έχει μεταφερθεί στο σταθμό Bag Scanner, όπου ελέγχεται από το μηχάνημα σε ένα Process module (Bag Scan). Κατόπιν μεταφέρεται στο τέλος μέσω του στοιχείου Convey. Φθάνοντας στο χώρο παραλαβής υπάρχει η πιθανότητα ο δεύτερος ελεγκτής Bag Scan Security να θελήσει να ψάξει χειρωνακτικά την τσάντα. Αν αυτό συμβεί (8% πιθανότητα), η οντότητα καθυστερείται για προκαθορισμένο χρόνο.

Έχοντας ελεγχθεί ο επιβάτης περιμένει υπομονετικά να παραλάβει την αποσκευή του. Είναι απίθανο να συμβεί το αντίθετο, δηλαδή να εξυπηρετηθεί ταχύτερα η

βαλίτσα. Ο ταξιδιώτης αναμένει σε ένα Hold module ένα σήμα το οποίο δίνεται όταν η βαλίτσα περάσει τον έλεγχο. Φτάνοντας στο σταθμό Delivery Station, η οντότητα – χειραποσκευή εισέρχεται σε ένα Enter module, το οποίο την καθυστερεί για τον προκαθορισμένο χρόνο παραλαβής της από τον ταινιόδρομο¹ προτού εισαχθεί στο σταθμό αυτό. Τέλος, οι δύο οντότητες επανενώνονται στο module Batch. Ο κανόνας για την ομαδοποίηση εδώ είναι οι οντότητες που εισέρχονται να έχουν το ίδιο Entity.SerialNumber. Η μεταβλητή αυτή αποδίδεται αυτόματα από το Arena σε κάθε οντότητα κατά τη δημιουργία της, είναι μοναδική αλλά μεταφέρεται στην διπλότυπη οντότητα στο separate module. Παράλληλα, ο κανόνας για τις υπόλοιπες μεταβλητές και χαρακτηριστικά είναι να διατηρούνται αυτές της πρώτης οντότητας που εισήλθε στο batch module. Πρώτα φτάνει πάντα η οντότητα – επιβάτης, αφού η βαλίτσα καθυστερεί για κάποια δευτερόλεπτα καθώς εξέρχεται του conveyor.



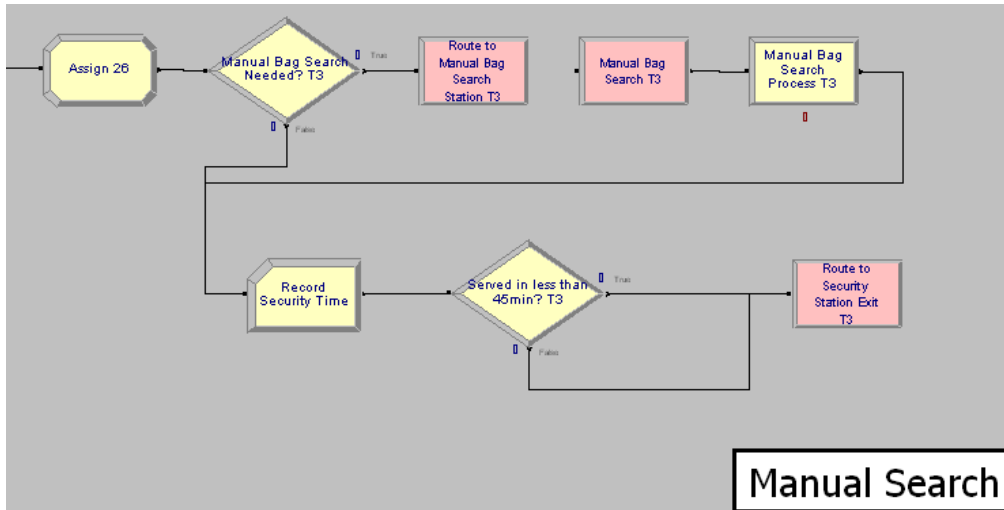
Εικόνα 37: Λογική Checkpoint 1 - Τελικό τμήμα, Batch module

Έτσι κλείνει η διαδικασία του ελέγχου επιβάτη και αποσκευής στο security checkpoint. Όλα τα υπόλοιπα checkpoints έχουν την ίδια ακριβώς λογική. Αλλάζουν απλά οι ονομασίες των modules, οι πόροι – μηχανήματα που χρησιμοποιούνται και ορίζεται ξεχωριστά η μεταφορική ταινία κάθε checkpoint.

Χειρωνακτικός Έλεγχος

Πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία ελέγχου και μπορέσει να φύγει ο επιβάτης για την πύλη της πτήσης του, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα να γίνει χειρωνακτικός έλεγχος της βαλίτσας του.

¹ Pick up Bag from Conveyor Time: UNIF(3,9) .



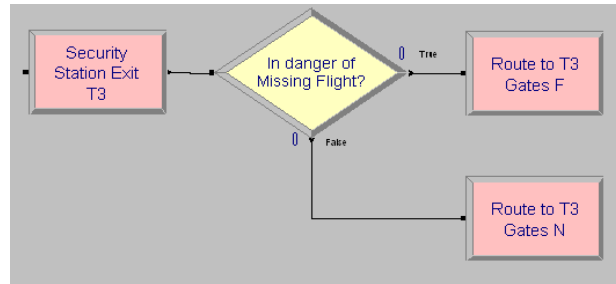
Εικόνα 38: Τμήμα μοντέλου - Χειρωνακτικός έλεγχος αποσκευών

Η πιθανότητα αυτή είναι 7% και καθορίζεται από ένα Decide module. Αν αληθεύει, ο επιβάτης πρέπει να μεταβεί στο σταθμό όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος αυτός – «Route to Manual Bag Search Station». Εκεί η διαδικασία είναι ξεκάθαρη, ένας security officer ψάχνει χειρωνακικά την τσάντα (Process module) για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

Σε κάθε περίπτωση, έπειτα και από αυτή τη διαδικασία ο επιβάτης είναι έτοιμος να προχωρήσει προς την έξοδο του χώρου ελέγχου. Καταγράφεται το χρονικό διάστημα που παρεμβλήθηκε από τη στιγμή που άφησε τα εκδοτήρια με τη βοήθεια ενός Record module. Παράλληλα, ένα Decide module ελέγχει αν η όλη διαδικασία ολοκληρώθηκε σε λιγότερο από 45 λεπτά, για στατιστικούς λόγους. Τέλος και μέσω ενός Route module η οντότητα μεταβαίνει στην έξοδο.

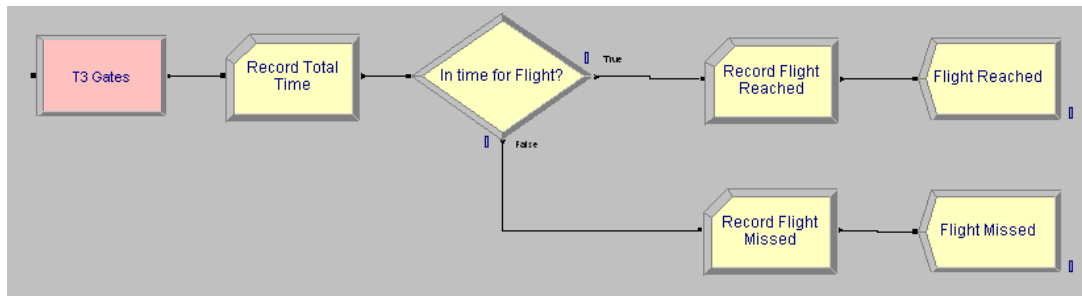
Έξοδος από το Σύστημα

Φτάνοντας στην έξοδο του security area, εξετάζεται από ένα Decide module πόσος χρόνος απομένει στον ταξιδιώτη για να προλάβει την πτήση του. Αν είναι λιγότερος από 15 λεπτά (30 λεπτά πριν την αναχώρηση του αεροπλάνου) τότε θα αρχίσει να τρέχει προς την πύλη, με ταχύτητα μεγαλύτερη της κανονικής του. Αν έχει χρόνο στη διάθεσή του, θα περπατήσει κανονικά, ρυθμός που απαιτεί 5 έως 16 λεπτά για να φτάσει στην πύλη.



Εικόνα 39: Μετάβαση προς τις πύλες αναχώρησης

Οι δύο διαφορετικές αυτές περιπτώσεις μοντελοποιούνται με δύο διαφορετικά Route modules («Route to T3 Gates F» και «-N»), στα οποία η μόνη διαφορά είναι ο χρόνος μετάβασης: UNIF(5,16) για κανονική ταχύτητα και UNIF(3.75,12) για γρήγορη.



Εικόνα 40: Έξοδος από το σύστημα

Φτάνοντας στην πύλη αναχώρησης καταγράφεται ο συνολικός χρόνος σε ένα Record module. Μάλιστα, επιλέγοντας “record into set” στο μενού του στοιχείου, έχει οριστεί ο συνολικός χρόνος να καταγράφεται ανάλογα με την εταιρία, ώστε να εκδίδονται ξεχωριστά αποτελέσματα. Κατόπιν ελέγχεται αν ο επιβάτης πρόλαβε την πτήση του. Σημειώνεται ότι για να θεωρηθεί «στην ώρα του» ο ταξιδιώτης πρέπει να βρίσκεται στην πύλη 15 λεπτά πριν την αναχώρηση του αεροπλάνου. Επομένως η εντολή στο Decide module είναι: $Departure\ Time - 15 \geq TNOW$. Ανάλογα διαμορφώνονται δύο μετρητές και κατόπιν οι οντότητες εξέρχονται του συστήματος.

Δεδομένα Εξόδου

Όπως έχει αναφερθεί, το Arena αυτομάτως εξάγει πολλά στατιστικά για τα σημεία ενδιαφέροντος του μοντέλου στην αναφορά που εκδίδεται στο τέλος κάθε εκτέλεσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτούνται κάποια επιπλέον, βάσει της περιγραφής του προβλήματος, τα οποία ορίζονται στο Statistics module του Advanced Process Panel, και θα σχολιασθεί η λειτουργία τους.

% Missed Flights

Αφορά το ποσοστό των επιβατών που δεν προλαβαίνουν να φτάσουν έγκαιρα στην πτήση τους. Για τον ορισμό αυτού του μεγέθους χρησιμοποιείται ο λόγος των ψευδών εκβάσεων του Decide module «In time for Flight?» προς το σύνολο των οντοτήτων. Η ακριβής έκφραση είναι:

```
100*(In time for Flight?.NumberOut False / (In time for  
Flight?.NumberOut False + In time for Flight?.NumberOut True))
```

% Served in less than 45min

Με παρόμοιο τρόπο, εκμεταλλευόμενοι δηλαδή τις εξόδους ενός Decide module διερευνάται το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετήθηκαν από την ασφάλεια σε λιγότερο από 45 λεπτά. Το module στο οποίο αναφέρεται η έκφραση βρίσκεται στην έξοδο από το χώρο ασφαλείας, στο σημείο όπου γίνεται και ο χειρωνακτικός έλεγχος αποσκευών. Η πλήρης έκφραση είναι:

```
100*(Served in less than 45min? T3.NumberOut True / (Served in less  
than 45min? T3.NumberOut False + Served in less than 45min?  
T3.NumberOut True))
```

Total Variable Cost

Το συνολικό μεταβλητό κόστος είναι ανάλογο του αριθμού των ανιχνεύσεων που έγιναν στα μηχανήματα του συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι το κόστος για κάθε scan είναι 0,23\$ στο People Scanner και 0,17\$ στο Bag Scanner. Συνεπώς, κάθε επιβάτης «κοστίζει» οπωσδήποτε 0,40\$ και όσοι υπέστησαν δεύτερη ανίχνευση στο People Scanner επιπλέον 0,23\$. Για τη μορφοποίηση αυτού του στατιστικού χρησιμοποιείται ο ολικός αριθμός των επιβατών με την εντολή NC και οι έξοδοι των decide modules στα checkpoints, όπου ελέγχεται αν κάποιος ταξιδιώτης θα εξετασθεί δεύτερη φορά. Ολοκληρωμένη η έκφραση έχει ως εξής:

```
0.4*(NC(Flight Missed Counter) + NC(Flight Reached Counter)) +  
0.23*(Scan OK? T31.NumberOut False + Scan OK? T32.NumberOut False +  
Scan OK? T33.NumberOut False + Scan OK? T34.NumberOut False + Scan  
OK? T35.NumberOut False + Scan OK? T36.NumberOut False + Scan OK?  
T37.NumberOut False + Scan OK? T38.NumberOut False)
```

Staffing Cost per Hour

Το κόστος απασχόλησης του προσωπικού ανά ώρα δεν είναι κάτι που χρειάζεται απαραίτητα να υπολογίζεται από το μοντέλο, καθώς μπορεί πολύ εύκολα να

λογαριαστεί ανεξάρτητα. Ο λόγος που εισήχθη αυτή η μεταβλητή είναι για την παραμετρική μελέτη που απαιτείται αργότερα. Κατά τη διάρκεια αυτής της βελτιστοποίησης με το εργαλείο OptQuest εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μεταβάλλοντας τον αριθμό των εργαζομένων. Τα εργατικά κόστη λοιπόν χρησιμοποιούνται σαν παράμετρος ελαχιστοποίησης, με την παράλληλη φυσικά εισαγωγή περιορισμών. Η έκφραση είναι:

$$18*MR(\text{Precheck Security}) + 18*MR(\text{Standard Security})$$

Η εντολή MR αποδίδει τον αριθμό των διαθέσιμων βάσει προγράμματος πόρων. Το προσωπικό Bag Scan Security δεν θεωρείται μεταβλητό, καθώς είναι πάντα διπλάσιο του αριθμού των Bag Scanners.

Επέκταση Μοντέλου

Μελλοντικά Σενάρια (To-Be)

Το μοντέλο που περιγράφηκε στις προηγούμενες σελίδες αποτελεί την τωρινή κατάσταση του αεροδρομίου όπου λειτουργεί ένα terminal και στεγάζονται τρεις εταιρίες. Βασικός στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση των δύο πιθανών σεναρίων επέκτασης του αεροδρομίου με την παράλληλη φιλοξενία δύο επιπλέον αερογραμμών στο terminal 4.

Για τη μελέτη αυτή ήταν αναγκαία φυσικά η επέκταση του μοντέλου. Η λογική σε όλες σχεδόν τις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν παραμένει η ίδια, κρίνεται σκόπιμο όμως να αναφερθούν σημεία στα οποία υπήρξε σημαντική αλλαγή του τρόπου προσέγγισης, ή εισήχθησαν άλλες τεχνικές, προκειμένου να μοντελοποιηθούν τα νέα δεδομένα.

Αρχικά αναφέρονται αλλαγές που είναι κοινές και για τα δύο μελλοντικά σενάρια, και έπειτα αυτές που αφορούν κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

- Νέα Schedules για τις αερογραμμές Airborne Airlines και Wild Wings. Εβδομαδιαία αλλά και ημερήσια, με ομαδοποίηση των ημερών που παρουσιάζουν κοινό πρόγραμμα αφίξεων.
- Τροποποίηση όλων των απαραίτητων Expressions, μεταβλητών και πινάκων, ώστε να περιέχουν στοιχεία για τις νέες εταιρίες. Αντιστοίχιση της AA στον αριθμό αερογραμμής (Airline Index) 4 και της WW στο 5.

- Δημιουργία και αντιστοίχιση ξεχωριστών εικόνων Entity Pictures για τους επιβάτες των AA, WW.
- Νέοι σταθμοί και διαδρομές, ώστε να αναπαρίστανται πιστά οι μετακινήσεις των νέων επιβατών από τα Counters 4, 5 στους υπόλοιπους χώρους του αεροδρομίου.
- Τροποποίηση της λογικής του μοντέλου, ώστε να επιτρέπεται η διαφοροποίηση στον αριθμό ενεργών security checkpoints ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας. Η αλλαγή αυτή είναι η ουσιαστικότερη και μακράν η πιο πολύπλοκη, για το λόγο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις στο ρυθμό άφιξης ανάλογα με την ημέρα οδήγησαν στη σκέψη αυτή. Μιας και γίνεται ένας νέος προγραμματισμός στη λειτουργία του αεροδρομίου κρίθηκε σκόπιμο να μην λειτουργούν καθημερινά όλα τα security checkpoints, καθώς οι ανάγκες διαφέρουν σημαντικά και μπορούν να εξοικονομηθούν μεγάλα ποσά με τον τρόπο αυτό.

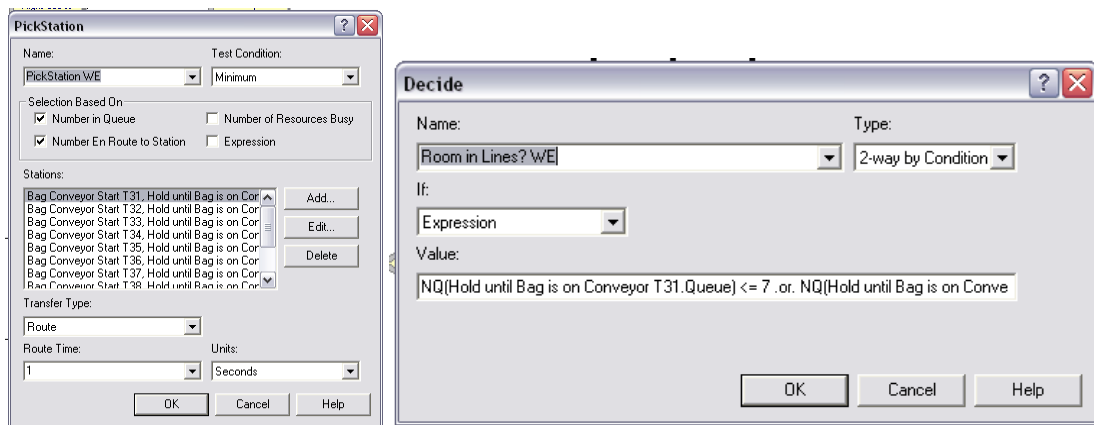
Στην παρούσα κατάσταση, λειτουργούν καθημερινά 8 security checkpoints στο χώρο ελέγχου Security 3. Στην επέκταση του αεροδρομίου και με την εισαγωγή περίπου 50% περισσότερου επιβατικού κοινού, ο αριθμός των απαιτούμενων security checkpoints φτάνει μέχρι και τα 14 τις πολυάσχολες ημέρες¹. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι απαραίτητο το σαββατοκύριακο για παράδειγμα, που η κίνηση είναι σημαντικά μειωμένη.

Τι χρειάζεται λοιπόν για να αλλάξει ο αριθμός των security checkpoints που είναι διαθέσιμα στους ταξιδιώτες; Αρχικά αποσαφηνίζεται ότι το κάθε τέτοιο σημείο ελέγχου είναι κομμάτι ολόκληρης της λογικής, και όχι απλά ένας πόρος (resource) που μπορεί να αυξομειωθεί. Δεν αρκεί δηλαδή μόνο να αφαιρέσουμε τους πόρους Bag Scanner T39, People Scanner T39 και να μειωθεί ο αριθμός των υπαλλήλων για να θεωρηθεί «κλειστό» το Security Checkpoint T39². Αν γίνει αυτό οι οντότητες θα συνεχίσουν να αποστέλλονται στο σημείο αυτό και απλά δεν θα εξυπηρετούνται, απουσία των κατάλληλων πόρων. Επομένως πρέπει να γίνει αλλαγή στη λογική ανάθεσης σημείου ελέγχου στον κάθε επιβάτη. Όπως και στην πραγματικότητα, αν ένα checkpoint είναι εκτός λειτουργίας, ο υπάλληλος στο precheck δεν θα κατευθύνει τους επιβάτες στο σημείο αυτό.

¹ Όπως βρέθηκε κατά την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της περίπτωσης του ενός Security Area για τα 2 terminals, η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

² Τυχαίο παράδειγμα για το T39, ισχύει το ίδιο για οποιοδήποτε checkpoint.

Η λογική αυτή περιλαμβάνεται στο module Pickstation, που χρησιμοποιείται στο τμήμα που μοντελοποιείται ο χώρος αναμονής, πριν τα σημεία ελέγχου (Security Waiting Area). Προσθαφαιρώντας σταθμούς στο στοιχείο αυτό μπορούμε να αλλάξουμε τους δυνατούς προορισμούς ελέγχου. Και πάλι όμως δεν αρκεί μόνο αυτό καθώς, λίγα στοιχεία πιο πριν, υπάρχει ένα Decide module που αποφαινεται αν υπάρχει χώρος στις ουρές σε κάθε checkpoint (υπενθυμίζεται μέγιστος αριθμός ατόμων – 8). Αν δεν αλλαχθεί και εκεί ο αριθμός των σταθμών που «εξετάζει» το εν λόγω στοιχείο για ελεύθερο χώρο, θα υπάρχουν προβλήματα στην εκτέλεση.



Εικόνα 41: Modules PickStation & Decide, λογική αποστολής επιβατών στα checkpoints

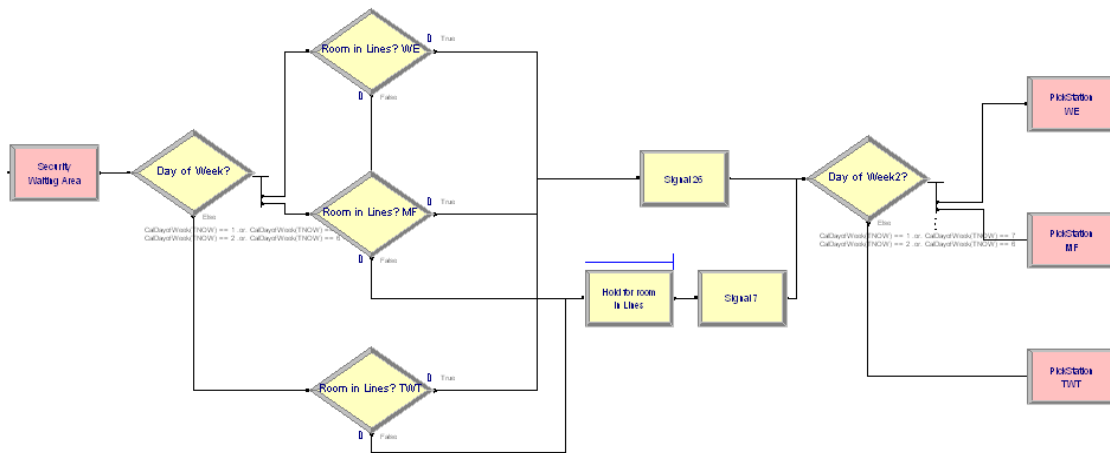
Αλλάζοντας λοιπόν τις παραμέτρους στα δύο στοιχεία αυτά δίνεται η δυνατότητα πλήρους χειροκίνητης αλλαγής των ενεργών σημείων ελέγχου και να αποστέλλονται οι επιβάτες ανάλογα σε αυτά. Πολύ πρακτική εφαρμογή όταν διερευνάται η βελτιστοποίηση ανά ημέρα της εβδομάδας. Έχοντας «φορτώσει» το κατάλληλο πρόγραμμα αφίξεων στα στοιχεία Create, μεταβάλλουμε τον αριθμό των checkpoints και παρατηρούμε τις αποκρίσεις του συστήματος.

Τι γίνεται όμως όταν έχουμε αποφανθεί για τις ημερήσιες απαιτήσεις σε ενεργούς σταθμούς ελέγχου και χρειάζεται να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια μιας ολόκληρης εβδομάδας; Είναι εμφανές ότι η τρέχουσα διαρρύθμιση δεν επιτρέπει κάποιου είδους «αυτόματη» επέμβαση στα δύο αυτά modules κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του μοντέλου και ανάλογα με την ημέρα¹.

Για την αντιμετώπιση της δυσκολίας αυτής επιστρατεύτηκαν δύο πανομοιότυπα (λειτουργικά) Decide modules, τα οποία εξετάζουν τι μέρα είναι τη χρονική στιγμή που εισέρχεται μια οντότητα σε αυτά, και αναλόγως τη στέλνουν στην κατάλληλη έξοδο. Καθένα από τα στοιχεία αυτά τοποθετήθηκε αμέσως πριν τα δύο modules για τα οποία έγινε λόγος προηγουμένως. Τα τελευταία πολλαπλασιάστηκαν, ώστε

¹ Ή, τουλάχιστον, ο συγγραφέας δεν είναι γνώστης τέτοιας δυνατότητας.

καθένα να ανταποκρίνεται για μια διαφορετική ημέρα. Έτσι, έχουμε 3 Decide “Room In Queues?” modules και 3 αντίστοιχα Pickstation, κάθε ζεύγος των οποίων είναι συγκεκριμενοποιημένο για κάποιες μέρες τις εβδομάδας. Υπενθυμίζεται ότι οι ομάδες ημερών Δευτέρα – Παρασκευή (MF), Τρίτη – Τετάρτη – Πέμπτη (TWT) και το Σαββατοκύριακο (WE), μοιράζονται κοινό όγκο επιβατών. Έτσι, με τα στοιχεία Decide «Day of Week?» που περιλαμβάνουν την έκφραση: $CalDayofWeek(TNOW)$, οι οντότητες αποστέλλονται στα σωστά modules, ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας. Στην εικόνα¹ που ακολουθεί φαίνεται ολόκληρη η λογική που σχολιάστηκε σε αυτό το σημείο.



Εικόνα 42: Επέκταση μοντέλου - Διαφοροποίηση διαθέσιμων checkpoints ανά ημέρα

T3, T4 – S3

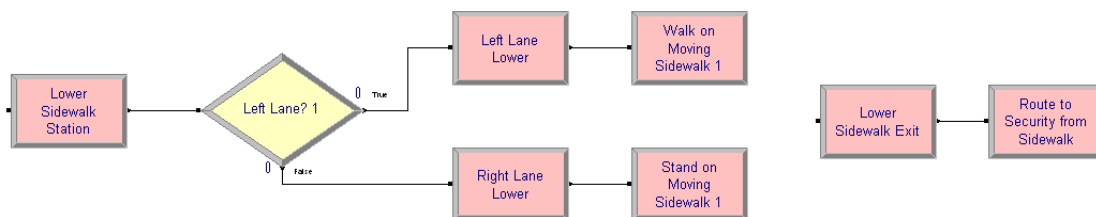
Η κωδικοποίηση αυτή, αναφέρεται στο σενάριο των δύο terminals που εξυπηρετούνται από κοινού από τον υπάρχοντα χώρο ασφαλείας (και καταλλήλως επεκταμένο), Security Area 3. Στην περίπτωση αυτή η μόνη ουσιαστική αλλαγή που έγινε πέραν των προαναφερθέντων ήταν η εισαγωγή της λογικής των κυλιόμενων πεζοδρομίων, για τη μετακίνηση ορισμένων επιβατών από το terminal 4 στο 3, όπου βρίσκεται ο σταθμός ελέγχου, και πάλι πίσω ώστε να μεταβούν στις πύλες αναχώρησης.

Αν και η λογική λέει πως ιδανικός τρόπος μοντελοποίησης αυτών των πεζοδρομίων θα ήταν μέσω conveyors, στην πράξη αυτό είναι αδύνατο. Η αιτία είναι ότι το 55% των επιβατών δεν μένουν στάσιμοι στο πεζοδρόμιο, αλλά συνεχίζουν να περπατούν, και μάλιστα με ρυθμό 75% της κανονικής τους ταχύτητας. Συνεπώς η ταχύτητα μετακίνησης των μισών περίπου επιβατών δεν είναι σταθερό μέγεθος. Το Arena δεν δίνει παρέχει κάποια δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας μιας μεταφορικής ταινίας,

¹ Όλα τα τελικά μοντέλα που αφορούν τη μελλοντική κατάσταση εμπεριέχουν τη λογική αυτή.

ή της επιβολής επιπλέον σχετικής ταχύτητας σε αυτή των οντοτήτων που τη χρησιμοποιούν.

Για τη μοντελοποίηση επομένως αυτής της μετακίνησης χρησιμοποιήθηκαν Routes. Σε κάθε Route module ο χρήστης ορίζει το χρόνο μετακίνησης μέχρι τον επόμενο σταθμό και μάλιστα το σχετικό χωρίο επιδέχεται expressions, και άρα μη σταθερή ταχύτητα για την κάθε οντότητα. Συγκεκριμένα, για κάθε διαδρομή χρησιμοποιήθηκαν 2 routes, μία για κάθε «λωρίδα» του πεζοδρομίου. Γίνεται η υπόθεση ότι οι επιβάτες που στέκονται στο πεζοδρόμιο παραμένουν στη δεξιά πλευρά, ενώ αυτοί που συνεχίζουν να περπατούν χρησιμοποιούν την αριστερή πλευρά.



Εικόνα 43: Λογική κυλιόμενων πεζοδρομίων

Οι επιβάτες λοιπόν που προέρχονται από το terminal 4 φτάνουν μετά την εξυπηρέτησή τους στα εκδοτήρια στο σταθμό στην αρχή του κυλιόμενου πεζοδρομίου «Lower Sidewalk Station». Εκεί, κατανέμονται στις δύο λωρίδες βάσει πιθανότητας (55-45%) από ένα Decide module. Κάθε λωρίδα έχει ένα ξεχωριστό Station και Route module. Η διαφορά έγκειται στο χρόνο μετάβασης που ορίζεται στο δεύτερο.

Για τη δεξιά λωρίδα ο χρόνος μετάβασης είναι: $110 / \text{Sidewalk Speed}$. Δηλαδή το μήκος του πεζοδρομίου προς την ταχύτητά του που είναι σταθερό μέγεθος – 40m/min.

Για την αριστερή ο χρόνος μετάβασης είναι: $110 / ((0.75 * \text{Walking Speed}) + \text{Sidewalk Speed})$. Δηλαδή το μήκος προς τη σχετική ταχύτητα του επιβάτη, που είναι ανάλογη της κανονικής του ταχύτητας περπατήματος και αυτής του κυλιόμενου πεζοδρομίου.

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο έχει μοντελοποιηθεί το δεύτερο κυλιόμενο πεζοδρόμιο που βρίσκεται μετά το χώρο ελέγχου και επιστρέφει τους επιβάτες στο terminal 4.

T3, T4 – S3&S4

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στη λογική πέραν των βασικών που υπογραμμίσθηκαν αρχικά. Όσον αφορά στη διαμόρφωση, το σενάριο αυτό προϋποθέτει δύο ξεχωριστούς χώρους ελέγχου που εξυπηρετούν αποκλειστικά τους επιβάτες του αντίστοιχου terminal.

Επομένως όλες οι διαδικασίες από την έξοδο των επιβατών από τα counters μέχρι την ολοκλήρωση του ελέγχου τους έχουν διπλασιασθεί, ώστε να αντιστοιχούν στα διαφορετικά Security Areas. Έτσι έχουμε δηλαδή δύο διαδικασίες precheck, δύο χώρους αναμονής και τα checkpoints ανήκουν σε δύο διαφορετικά Security Areas. Καμία αλλαγή στη λογική, μόνο στην ονομασία και την τοποθέτηση των modules, ώστε να είναι ξεκάθαρο σε ποιο terminal ανήκουν.

Τα κυλιόμενα πεζοδρόμια υπάρχουν και λειτουργούν, απλά δεν χρησιμοποιούνται στην περίπτωση αυτή από τις οντότητες.

Γραφική Απεικόνιση Μοντέλου

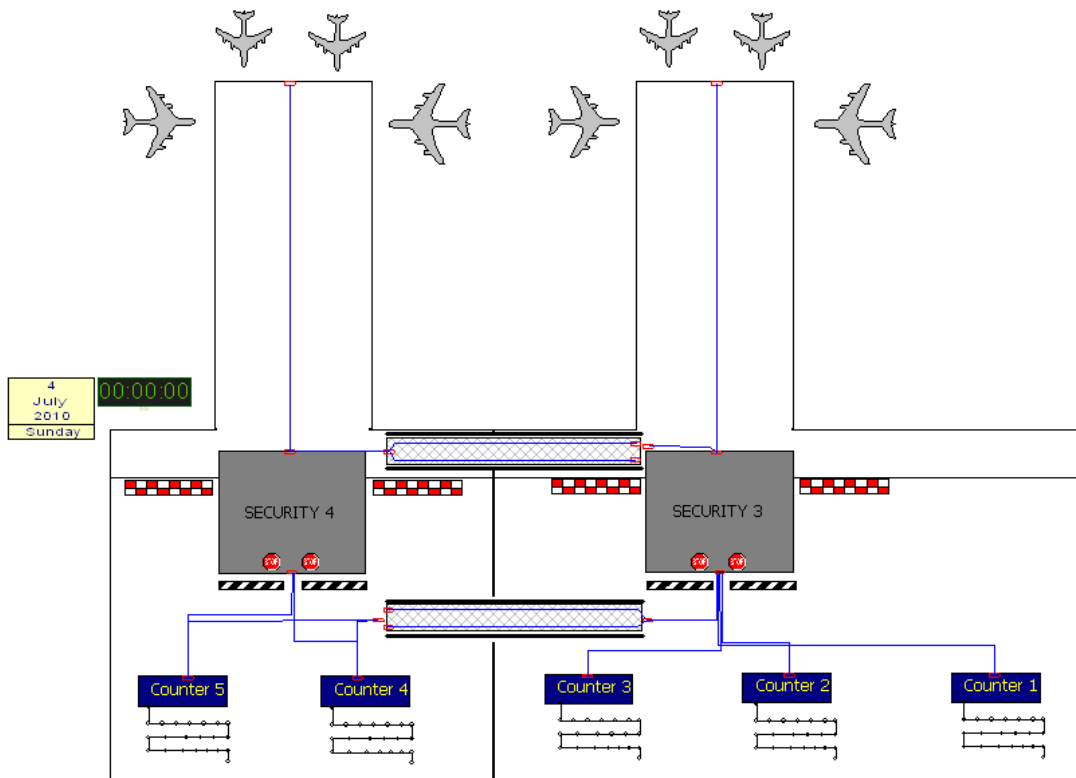
Με σκοπό να γίνουν κατανοητές οι διαδικασίες αλλά και η μετακίνηση των οντοτήτων μέσα στο αεροδρόμιο από τον αναγνώστη αλλά και τους άμεσα ενδιαφερόμενους στην παρουσίαση της παρούσης εργασίας, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη γραφική απεικόνιση του μοντέλου (model animation). Ανεξάρτητα όμως από την κατανόησή του από τρίτους, η χρήση αναλυτικού animation είναι ένας ιδιαίτερα αποτελεσματικός τρόπος για να σιγουρευτεί ο ίδιος ο μελετητής ότι το μοντέλο που έχει κατασκευάσει συμπεριφέρεται όπως αναμενόταν¹.

Κάθε τελικό μοντέλο της παρούσας και μελλοντικής κατάστασης του αεροδρομίου περιέχει δύο animated οπτικές γωνίες. Η πρώτη αφορά ολόκληρο το αεροδρόμιο και την κίνηση των επιβατών στους χώρους του (πλην του εσωτερικού του χώρου ελέγχου) και είναι εύκολα προσβάσιμη πατώντας το πλήκτρο 'ο' (ό μικρον), όπως προσδιορίζεται στο αρχικό μενού. Η άλλη απεικονίζει τη λειτουργία ενός security checkpoint και το hotkey αυτής είναι το '2' (δύο).

¹ Διαδικασία γνωστή και ως Verification.

Airport Overview

Η απεικόνιση αυτή αποτελεί μια πλήρη κάτοψη του αεροδρομίου. Φαίνονται καθαρά οι χώροι των δύο terminals, όλα τα εκδοτήρια εισιτηρίων, ο χώρος ασφαλείας, τα κυλιόμενα πεζοδρόμια και οι πύλες όπου αναχωρούν οι επιβάτες.

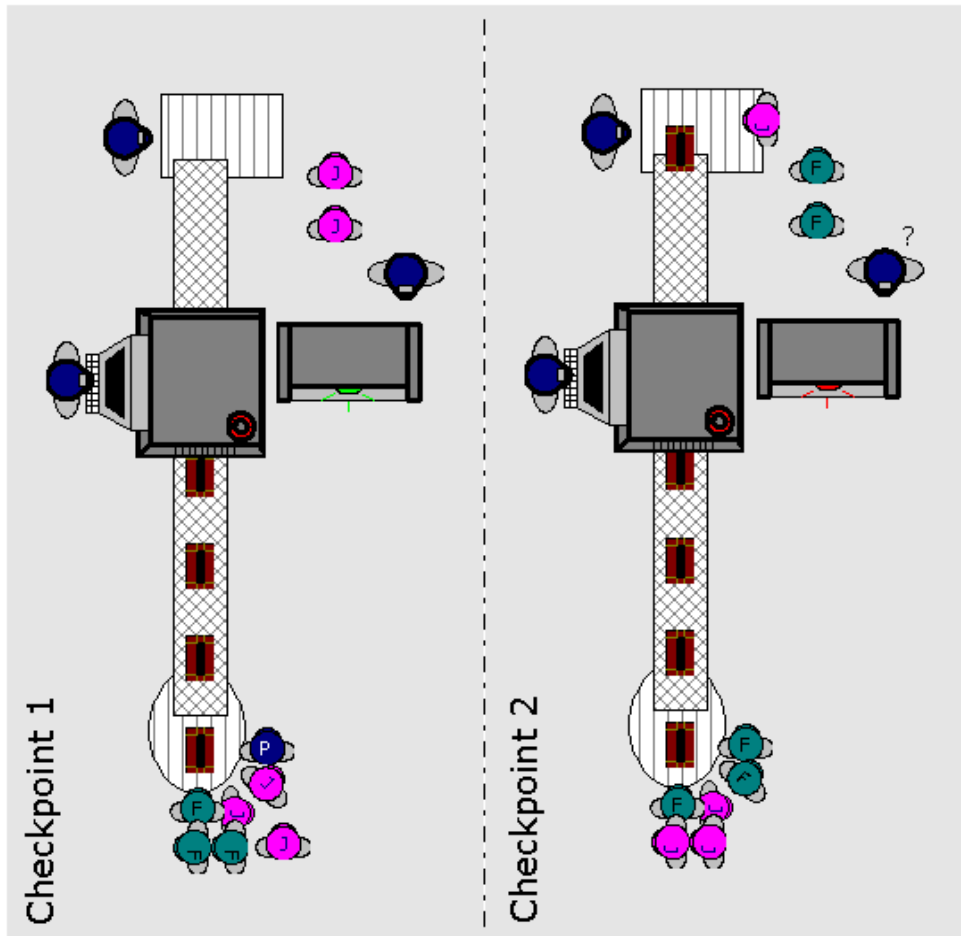


Εικόνα 44: Κάτοψη αεροδρομίου - Airport Overview

Με μπλε γραμμές διακρίνονται οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται (routes) και τα μικρά κόκκινα ορθογώνια σχήματα στις απολήξεις τους είναι οι σταθμοί που έχουν οριστεί στο μοντέλο. Τα στοιχεία αυτά είναι αόρατα τη στιγμή που εκτελείται («τρέχει») το σύστημα. Όλες οι αποστάσεις είναι σε κλίμακα, εκτός αυτών προς τις πύλες, όπου η απόσταση είναι αόριστο μέγεθος. Στην αριστερή πλευρά έχει τοποθετηθεί ένα ημερολόγιο και ένα ρολόι, καθώς η κίνηση επιβατών στο αεροδρόμιο είναι σαφώς ανάλογη της ημέρας και της ώρας.

Security Checkpoint

Η οπτική αυτή προσδίδει λεπτομέρεια στην πιο πολύπλοκη διαδικασία του μοντέλου. Οι επιβάτες φτάνουν, αφήνουν τη βαλίτσα τους στον ταινιόδρομο και οι ίδιοι προχωρούν παράπλευρα στο People Scanner. Επιβάτες και τσάντες ελέγχονται παράλληλα στα κατάλληλα μηχανήματα. Τέλος οι ταξιδιώτες παίρνουν πίσω τα προσωπικά τους αντικείμενα και αποχωρούν από το security checkpoint.



Εικόνα 45: Γραφική απεικόνιση σημείων ελέγχου 1&2

Παραπάνω είναι ένα στιγμιότυπο από τα δύο πρώτα checkpoints, T31 και T32, εν ώρα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, είναι Δευτέρα 05:16 τα ξημερώματα, οπότε η κίνηση είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Φαίνονται στο κάτω μέρος οι επιβάτες που αναμένουν να αφήσουν τη βαλίτσα τους στο διάδρομο. Τα δύο Bag Scanners είναι απασχολημένα, ενώ μόνο το People Scanner T32 είναι κατειλημμένο αυτή τη στιγμή (το κόκκινο φωτάκι υποδηλώνει ότι ένα μηχάνημα και το αντίστοιχο προσωπικό έχει γίνει seized από κάποιο entity). Στο άνω τμήμα της μεταφορικής ταινίας T32 ένας επιβάτης της Jolly Jets μαζεύει τα προσωπικά του αντικείμενα από το Delivery Station, ενώ οι υπόλοιποι περιμένουν υπομονετικά να ελεγχθούν τα δικά τους.

Σε κάθε τελικό μοντέλο έχουν απεικονισθεί λίγα χαρακτηριστικά checkpoints, συνήθως τα δύο πρώτα. Η προηγούμενη εικόνα προέρχεται από την τρέχουσα κατάσταση, γι' αυτό και εμφανίζονται επιβάτες μόνο των τριών εταιριών (FF, PP και JJ).

ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Επαλήθευση - Verification

Μετά την αρχική κατασκευή του μοντέλου και τη διαμόρφωση της βασικής δομής του animation έγινε διεξοδικός έλεγχος αν αυτό λειτουργεί όπως αναμενόταν (verification).

Αρχικά, οι συνολικοί επιβάτες που καταφθάνουν ημερησίως και συνολικά στη διάρκεια μιας εβδομάδας συμβαδίζουν με τα δεδομένα του προβλήματος. Παράλληλα, οι ημέρες Δευτέρα και Παρασκευή έχουν αυξημένο όγκο επιβατών, πράγμα φανερό από τη δυσκολία ανταπόκρισης των δεικτών κατά της μέρες αυτές στους περιορισμούς του συστήματος. Οι δύο παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν την σωστή λειτουργία των προγραμμάτων αφίξεων επιβατών που έχουν οριστεί στο μοντέλο.

Έπειτα, έγινε μια σειρά παρατηρήσεων σε πλήθος χρονικών στιγμών - περιλαμβανομένης και step by step παρακολούθησης - του animation εν ώρα εκτέλεσης. Στόχος η επαλήθευση της σωστής (λογικά) λειτουργίας της διαδικασίας ελέγχου επιβάτη και αποσκευών. Η διαδικασία αυτή αναπαρίσταται γραφικά σε ξεχωριστό σημείο του μοντέλου και περιλαμβάνει όλες τις κινήσεις του επιβάτη εντός του σημείου ελέγχου (security checkpoint). Πράγματι, οι ταξιδιώτες αναμένουν σε σειρά για να αφήσουν τα αντικείμενά τους στον αντίστοιχο ταινιόδρομο, κατόπιν μεταβαίνουν δίπλα στο μηχάνημα ελέγχου people scanner και τέλος περιμένουν υπομονετικά την ολοκλήρωση του ελέγχου της αποσκευής τους για να την παραλάβουν πριν συνεχίσουν προς τις πύλες. Παράλληλα, εξονυχιστικός έλεγχος έγινε στο τελευταίο αυτό στάδιο ώστε να αποσαφηνιστεί ότι κάθε επιβάτης παραλαμβάνει τη δική του βαλίτσα και όχι κάποια άλλη. Με βάση τον τρόπο μοντελοποίησης, ο οποίος περιορίζει απόλυτα τη διαδικασία αυτή (η επανένωση των οντοτήτων γίνεται βάσει του Entity.SerialNumber), αλλά και την παρακολούθηση των οντοτήτων κατά το τρέξιμο, επαληθεύεται η λογική του μοντέλου. Καμία βαλίτσα δεν μένει στα «lost and found» και κανένας επιβάτης δεν «κολλάει» στην αναμονή για παραλαβή της αποσκευής του. Η όλη διαδικασία του ελέγχου των επιβατών στα checkpoints αποτελεί το πλέον νευραλγικό σημείο του μοντέλου, για το λόγο αυτό δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ομαλή του λειτουργία.

Όσον αφορά τις μετακινήσεις των επιβατών και την ταχύτητά τους, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση αρχικά στην τοποθέτηση των σταθμών στο χώρο της γραφικής αναπαράστασης του αεροδρομίου. Κατά την εκτέλεση του μοντέλου διαφαίνονται όλες οι μετακινήσεις των οντοτήτων μέσα στο χώρο αυτό. Δεν έχουν κοινή ταχύτητα, συνάμα όμως οι μετακινήσεις των επιβατών από οποιοδήποτε counter προς το χώρο ελέγχου είναι άμεσα συγκρίσιμες, δεν διακρίνεται δηλαδή κάποιος επιβάτης να «τρέχει» πολύ γρήγορα, ή κάποιος άλλος να καθυστερεί υπερβολικά. Αυτό επιβεβαιώνει την ορθή μοντελοποίηση των αποστάσεων και μετακινήσεων των επιβατών εντός των χώρων του αεροδρομίου.

Τέλος έγινε μια σειρά από αλλαγές στις τιμές των μεταβλητών και των χρόνων, όπου δεν παρατηρήθηκε κάποια λειτουργική διαφορά στη συμπεριφορά του μοντέλου, και ένα τρέξιμο με υπερβολικά πολλές επαναλήψεις (100) και παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, που επαλήθευσαν τη λειτουργική - τουλάχιστον - ακεραιότητα αυτού.

Επικύρωση – Validation

Επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος αν τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι πιστά στο πραγματικό πρόβλημα (validation). Μέσα από αρκετές επαναλήψεις και δοκιμές ελέγχθηκαν τα παρακάτω:

- Ο συνολικός αριθμός επιβατών ανά ημέρα, εβδομάδα και ανά εταιρία. Συμβάδιζε απόλυτα με τα δεδομένα του προβλήματος.
- Με τους δεδομένους πόρους οι επιβάτες εξυπηρετούνται ικανοποιητικά. Τα οκτώ σημεία ελέγχου που αναφέρονται στην παρουσίαση της τρέχουσας κατάστασης, σε συνδυασμό με το ανάλογο προσωπικό, είναι αρκετά για να διατηρούν τους δείκτες ικανοποίησης των επιβατών στα θεμιτά όρια. Αν μη τι άλλο επιβεβαιώνει ότι η λογική του μοντέλου βρίσκεται σε αντιστοιχία με το πραγματικό πρόβλημα.
- Το μέγεθος των ουρών αναμονής περιορίζεται στον αριθμό που ορίζεται στην πραγματικότητα. Η παρατήρηση αυτή αφορά τις ουρές αναμονής στα σημεία ελέγχου και στο χώρο αναμονής (security checkpoints, security waiting area). Στο αεροδρόμιο που εξετάζεται, τα άτομα που «χωράνε» στις ουρές αυτές είναι συγκεκριμένα. Αντίστοιχα, μελετώντας τον μέγιστο αριθμό οντοτήτων

που ανέμειναν στις ουρές αυτές στο μοντέλο¹ επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία του.

- Επίσης ελέγχθηκε το Scheduled Utilization των πόρων. Επαληθεύεται ότι τα μηχανήματα bag scanner απασχολούνται σημαντικά περισσότερο από τα people scanner, ενώ η απασχόληση των πόρων μεταξύ checkpoints είναι ίση (και επομένως σωστά ισοκατανέμεται ο φόρτος εργασίας).

Τέλος, μια παρατήρηση που προκύπτει έπειτα από πολύωρη ενασχόληση με το μοντέλο και αλληπάλληλες δοκιμές σε αυτό είναι η εξής: Αν υπάρχει οποιοδήποτε πρόβλημα έλλειψης πόρων, το σύστημα τείνει να φορτίζεται στην αρχή του χώρου ελέγχου (precheck). Είτε δηλαδή τα μηχανήματα ελέγχου δεν είναι αρκετά, είτε το προγραμματισμένο προσωπικό δεν αρκεί για την εξυπηρέτηση των επιβατών, δημιουργείται «συνωστισμός» (bottleneck) στην διαδικασία του precheck. Η παρατήρηση αυτή επικυρώνει τη λειτουργία του μοντέλου σύμφωνα με το πραγματικό αεροδρόμιο, όπου – για λόγους ασφαλείας – επιδιώκεται η όσο το δυνατόν μικρότερη συγκέντρωση ατόμων εντός των σημείων ελέγχου. Οι υπάλληλοι στον έλεγχο των διαβατηρίων είναι υπεύθυνοι για την τήρηση αυτής της τάξης, και αποτρέπουν την είσοδο περισσότερων επιβατών αν υπάρχει κορεσμός πόρων στο κομμάτι του συστήματος που ακολουθεί.

Συμπερασματικά, το μοντέλο δουλεύει σύμφωνα με τις προσδοκίες και τα αποτελέσματα που εξάγει ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στην συνήθη λειτουργία του υπό μελέτη αεροδρομίου.

¹ «Max Number Waiting in Queue» στη σχετική αναφορά που εκδίδει το Arena μετά από κάθε εκτέλεση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των διαδικασιών ασφαλείας αεροδρομίου και συγκεκριμένα αυτού της πόλης του Σικάγο. Το υπό εξέταση σύστημα είναι το Terminal 3 (T3), καθώς και η μελλοντική επέκταση αυτού με τη δημιουργία ενός νέου τερματικού σταθμού, Terminal 4 (T4).

Η τρέχουσα διαρρύθμιση του T3 φιλοξενεί τρεις αεροπορικές εταιρίες: Fabulous Flights, Premium Planes και Jolly Jets. Οι ιθύνοντες του αεροδρομίου έχουν αποφανθεί ότι υπάρχει αρκετός χώρος δίπλα σε αυτό, για τη στέγαση του T4, το οποίο θα εξυπηρετεί επιπλέον δύο αερογραμμές: Airborne Airlines και Wild Wings. Κύριο μέλημα των αρχών του αεροδρομίου είναι ο σχεδιασμός των σημείων ελέγχου επιβατών – security checkpoints. Άλλα ζητήματα που χρήζουν μελέτης είναι αυτά του προγραμματισμού του προσωπικού, ο αριθμός και το είδος του απαιτούμενου εξοπλισμού, και η ευελιξία του συστήματος σε πιθανές μελλοντικές αλλαγές.

Για την αξιολόγηση και την ανάλυση των διαδικασιών ασφαλείας του αεροδρομίου χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της εξομοίωσης, που αποτελεί εργαλείο της Επιχειρησιακής Έρευνας, και συγκεκριμένα το πακέτο λογισμικού Arena, προϊόν της Rockwell Automation. Οι διαδικασίες προσομοιώθηκαν λεπτομερώς και ακολούθησε ανάλυση των αποτελεσμάτων, η οποία οδήγησε στην εξαγωγή των συμπερασμάτων και προτάσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Βασικός στόχος είναι η κάλυψη της ικανοποίησης των επιβατών με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Η μελέτη αυτή έδειξε ότι η βέλτιστη διαρρύθμιση για τη λειτουργία των δύο τερματικών σταθμών, T3 και T4, είναι η δημιουργία δύο ξεχωριστών χώρων ελέγχου, Security Area 3 και 4, οι οποίοι περιλαμβάνουν 9 και 4 σημεία ελέγχου (security checkpoints) αντίστοιχα. Το κόστος αυτής της επιλογής υπολογίζεται στα \$23 εκατ. για τη λειτουργία του αεροδρομίου τα επόμενα δυο χρόνια.

Προσέγγιση Μοντελοποίησης

Δεδομένα Εισόδου

Ο ρυθμός άφιξης επιβατών παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα, ανάλογα με την ημέρα και την ώρα. Ποικίλει επίσης μεταξύ αερογραμμών, καθιστώντας δυσχερή την

απευθείας βελτιστοποίηση σε βάθος εβδομάδας. Για το λόγο αυτό μελετήθηκε αρχικά κάθε ημέρα της εβδομάδας χωριστά. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την εύρεση βέλτιστης κατάστασης λειτουργίας για κάθε ημέρα, όσον αφορά τους απαιτούμενους πόρους, με παράλληλη ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων του συστήματος. Τοιουτοτρόπως, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά από μισθούς εργαζομένων, τις ημέρες που ο όγκος των επιβατών στο αεροδρόμιο είναι μειωμένος.

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης κάθε φορά, χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι που αντιστοιχούν στους πόρους του αεροδρομίου: πλήθος προσωπικού κατά ειδικότητα (precheck security, standard security, bag scan security), αριθμός μηχανημάτων (people scanners, bag scanners) και σταθμών χειρωνακτικού ελέγχου. Η συστηματική μεταβολή των παραμέτρων αυτών και η μελέτη των αποκρίσεων του συστήματος, διαδικασία γνωστή ως παραμετρική ανάλυση, έγινε με τη βοήθεια των εργαλείων OptQuest και Process Analyzer, που εμπεριέχονται στο πακέτο Arena. Σημειώνεται ότι η διαθεσιμότητα των πόρων (υπαλλήλων) Standard Security και Bag Scan Security δεσμεύεται από περιορισμούς που ορίζουν οι κανόνες ασφαλείας και διαδικασιών λειτουργίας του ελέγχου. Αυτοί είναι:

- Δύο άτομα με τα απαραίτητα προσόντα πρέπει να χειρίζονται κάθε μηχάνημα Bag Scanner.
- Ο ελάχιστος αριθμός υπαλλήλων Standard Security πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των μηχανημάτων People Scanner.

Παράλληλα, επιπλέον παράμετροι εισήχθησαν στο μοντέλο προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά αυτού σε αλλαγές των διαδικασιών και η ευελιξία του σε πιθανές τροποποιήσεις στο μέλλον.

Δεδομένα Εξόδου

Κύριοι δείκτες απόδοσης του συστήματος είναι μια ομάδα στατιστικών στοιχείων που εξάγονται με κάθε εκτέλεση του μοντέλου. Οι δείκτες αυτοί προσμετρούν την ικανοποίηση των επιβατών και καθορίζουν μια κατάσταση ως εφικτή βάσει ορισμένων περιορισμών.

Πρώτος δείκτης είναι ο χρόνος Security Time, που ορίζεται από τη στιγμή της αναχώρησης των επιβατών από τα εκδοτήρια εισιτηρίων, μέχρι την ολοκλήρωση του ελέγχου αυτών. Στόχος είναι ο χρόνος αυτός να έχει μέση τιμή για όλο το επιβατικό κοινό το πολύ 24 λεπτά, ενώ το 90% των ταξιδιωτών να εξυπηρετείται σε λιγότερο από 45 λεπτά.

Ένα άλλο στατιστικό, είναι αυτό των ανθρώπων που χάνουν την πτήση τους. Δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπερνά το 1%.

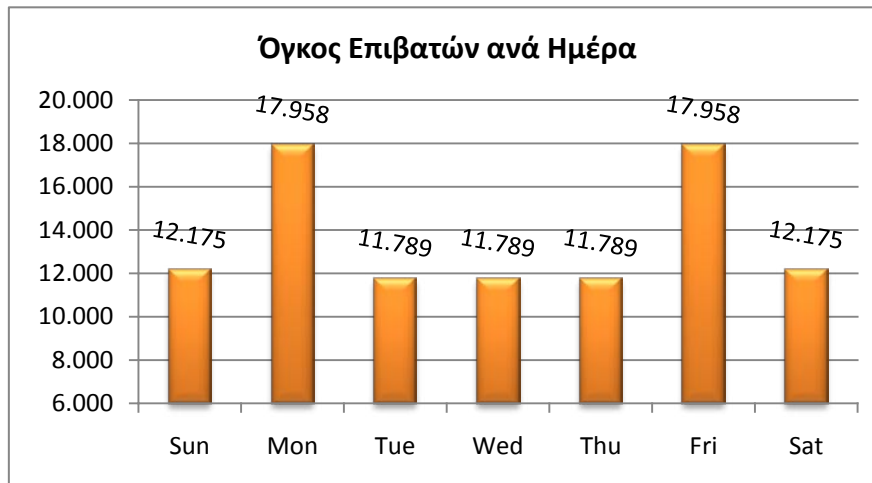
Η αποτελεσματικότητα μετράται με το μέσο κόστος ανά επιβάτη. Αυτό προκύπτει βάσει της απαιτούμενης αρχικής επένδυσης σε εξοπλισμό, το κόστος των εργαζομένων και το μεταβλητό κόστος. Το τελευταίο εξαρτάται αποκλειστικά από τη χρήση των μηχανημάτων αντίχνευσης.

Παρούσα Κατάσταση – T3, S3

Εξοπλισμός - Προσωπικό

Στην τρέχουσα κατάσταση, όπου το Terminal 3 εξυπηρετεί τρεις αεροπορικές εταιρίες, απαιτούνται οκτώ ζεύγη People – Bag Scanners στο μοναδικό χώρο ελέγχου, Security Area 3. Όσον αφορά το προσωπικό, οι χειριστές των μηχανημάτων ανίχνευσης αποσκευών θα είναι υποχρεωτικά 16 – δύο για κάθε bag scanner. Εφόσον λειτουργεί ήδη με τον τρόπο αυτό το αεροδρόμιο, θεωρείται σταθερός ο αριθμός των security checkpoints, και επομένως διερευνάται μόνο αλλαγή στο προσωπικό precheck και standard security. Ακολουθεί ημερήσια ανάλυση του απαιτούμενου προσωπικού.

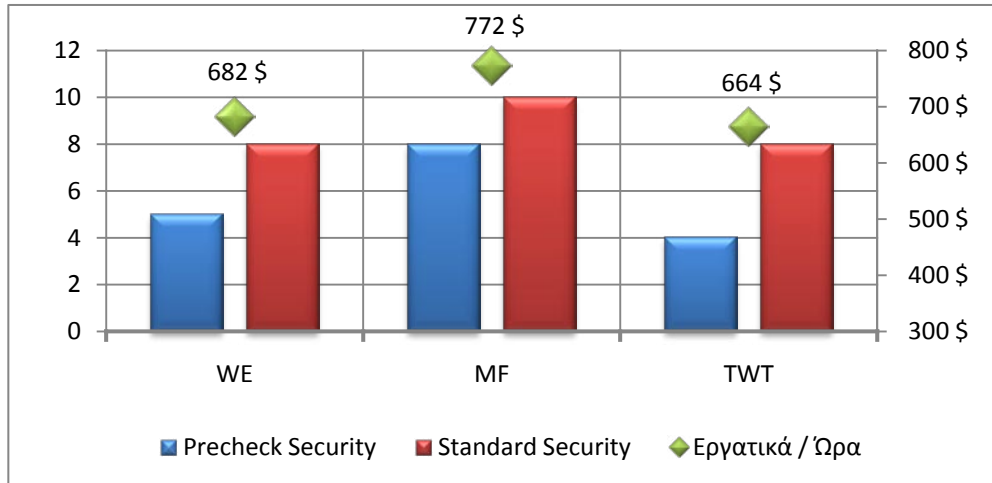
Πίνακας 6: Επιβάτες ανά ημέρα – (T3-S3)



Τις ημέρες Δευτέρα – Παρασκευή (MF) το αεροδρόμιο έχει τη μεγαλύτερη κίνηση. Με το τρέχον προγραμματισμένο προσωπικό ο μόνος δείκτης που δεν ικανοποιείται είναι αυτός της εξυπηρέτησης σε 45 λεπτά – 87,8%. Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στη θεμιτή και, όπως θα δειχθεί παρακάτω, εξομαλύνεται σε βάθος εβδομάδας. Συνεπώς θεωρείται αποδεκτή η απασχόληση 8 precheck security και 10 standard security. Ο ελάχιστος αριθμός προσωπικού για να καλύψει τους περιορισμούς κατά τα μέσα της εβδομάδας (TWT) βρέθηκε: 4 Precheck και 8 Standard Security. Τέλος, για το Σαββατοκύριακο (WE), αυξάνεται κατά ένα άτομο έχοντας συνολικά 5 precheck και 8 Standard. Συνοπτικά το προσωπικό ανά ημέρα και το αντίστοιχο εργατικό κόστος εμφανίζεται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7: Απαιτούμενοι πόροι – (T3-S3)

	Checkpoints	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security	Εργατικά / Ώρα
WE	8	5	8	16	\$ 682,00
MF	8	8	10	16	\$ 772,00
TWT	8	4	8	16	\$ 664,00



Εικόνα 46: Γράφημα απαιτούμενων πόρων ανά ημέρα & είδος (T3-S3)

Με τον προγραμματισμό αυτό και τρέχοντας το μοντέλο για 52 εβδομάδες (1 χρόνο) τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

Πίνακας 8: Δείκτες ικανοποίησης επιβατών – (T3-S3)

Δείκτης	M.O.	Ημεύρος
Security Time (min)	12,326	0,14
% Served in 45min	94,903	0,22
% Missed Flights	0,350	0,03

Ο μέσος αριθμός επιβατών είναι 95.602 ανά εβδομάδα. Υπολογίζοντας το συνολικό κόστος και διαιρώντας το με το μέσο αριθμό επιβατών ανά εβδομάδα προκύπτει το Μέσο Κόστος ανά Επιβάτη. Το μεταβλητό κόστος υπολογίζεται με ακρίβεια μέσω του μοντέλου.

Πίνακας 9: Κόστος εξοπλισμού - (T3-S3)

Αρχική Επένδυση			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος	Συνολικό Κόστος
Bag Scanner	8	\$ 45.000,00	\$ 360.000,00
People Scanner	8	\$ 34.500,00	\$ 276.000,00
Bag Search Desk	2	\$ 800,00	\$ 1.600,00
Ζετές κόστος:			\$ 637.600,00

Πίνακας 10: Εργατικά κόστη – (T3-S3)

Εργατικά		
Ημέρες	Κόστος / ώρα	Ημερίσιο Σύνολο
WE	\$ 682,00	\$ 16.368,00
MF	\$ 772,00	\$ 18.528,00
TWT	\$ 664,00	\$ 15.936,00
Σύνολο Εβδομάδας:		\$ 117.600,00

Πίνακας 11: Κόστος ανά επιβάτη – (T3-S3)

Αναγωγή σε Κόστος ανά Επιβάτη	
Αρχική Επένδυση / Εβδομάδα	\$ 6.130,77
Εργατικά / Εβδομάδα	\$ 117.600,00
Εβδομαδιαίο Μεταβλητό Κόστος	\$ 40.269,00
Συνολικό Εβδομαδιαίο Κόστος	\$ 163.999,77
Επιβάτες	95.602
Κόστος ανά Επιβάτη	\$ 1,715

Συνεπώς, η συνολική επένδυση ανέρχεται στα **\$17.055.976** για δύο έτη και το Μέσο Κόστος ανά Επιβάτη που προκύπτει είναι στα **\$1,715**.

Το ποσό που θα πρέπει να πληρώνει κάθε αερογραμμή για την παροχή της υπηρεσίας του ελέγχου που παρέχει το αεροδρόμιο, θα πρέπει να είναι ανάλογο του όγκου επιβατών καθεμιάς. Σύμφωνα λοιπόν με το ποσοστό επί του συνόλου των ταξιδιωτών, ανατίθεται σε κάθε εταιρία το κόστος 'φιλοξενίας' της στο αεροδρόμιο. Αναλυτικά τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Σημειώνεται ότι τα κόστη αναφέρονται σε βάθος χρόνου δύο ετών, όσος είναι και ο χρονικός ορίζοντας απόσβεσης του τεχνικού εξοπλισμού.

Πίνακας 12: Χρέωση ανά εταιρία – (T3-S3)

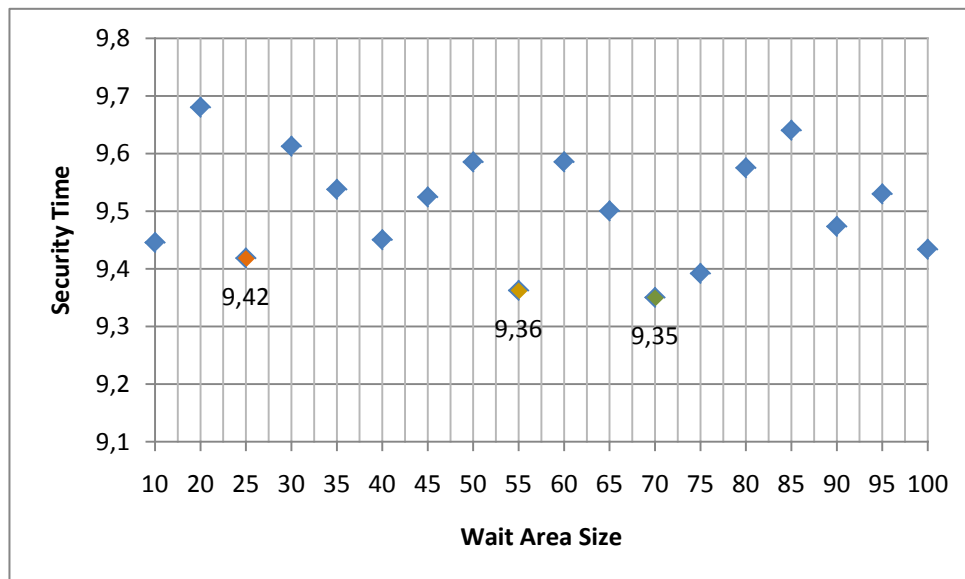
	Fabulous Flights	Premium Planes	Jolly Jets	Σύνολο
Αριθμός Επιβατών / Εβδομάδα	28.090	27.459	40.084	95.633
	29,37%	28,71%	41,91%	
Αναλογία Κόστους / 2 έτη	\$ 5.009.802	\$ 4.897.239	\$ 7.148.936	\$ 17.055.976

Βελτιστοποίηση

Χώρος Αναμονής

Μελετάται η επίδραση του μεγέθους του χώρου αναμονής στο Security Area 3. Στην μέχρι τώρα λειτουργία του αεροδρομίου, ο χώρος αυτός είναι σχεδιασμένος να δέχεται 20 άτομα. Με τη βοήθεια του OptQuest μεταβάλλεται η παράμετρος “Wait Area Size” και καταγράφεται η επίδρασή της στους δείκτες Security Time, % Missed Flights και % Served in less than 45 min. Γίνεται η υπόθεση ότι η αύξηση της χωρητικότητας είναι διακριτή, με βήμα 5 και τη μέγιστη τιμή της να είναι τα 100 άτομα.

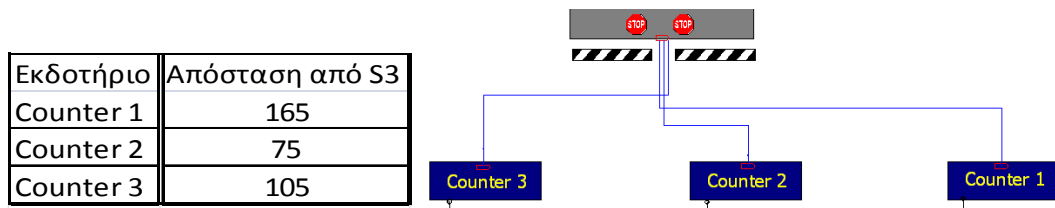
Βέλτιστη λύση βρέθηκε αυτή των 70 ατόμων στο χώρο αναμονής. Όπως φαίνεται όμως και στο διάγραμμα, η λύση αυτή δεν είναι μοναδική «καλή λύση». Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετός χώρος για τόσα άτομα, η χωρητικότητα 25 ατόμων έχει επίσης θετική επίδραση στο συνολικό χρόνο ελέγχου.



Εικόνα 47: Βέλτιστο μέγεθος χώρου αναμονής – (T3-S3)

Αντιστοίχιση Εκδοτηρίων

Στο Terminal 3 υπάρχουν τρία εκδοτήρια εισιτηρίων, Counters 1 – 3, με το πρώτο να βρίσκεται μακρύτερα από το χώρο ελέγχου. Αναλυτικά οι αποστάσεις (σε μέτρα):



Εικόνα 48: Απόσταση και διαρρύθμιση εκδοτηρίων

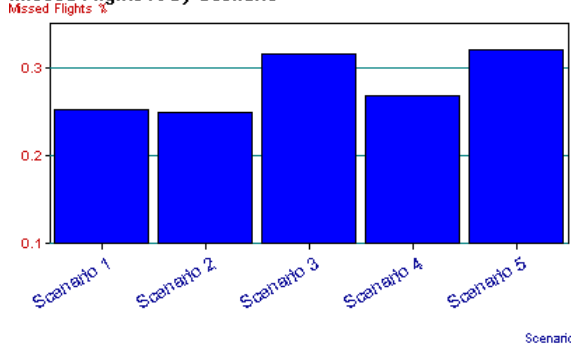
Σύμφωνα με την αρχική διαρρύθμιση, οι εταιρίες αντιστοιχίζονται: 1 – FF, 2 – PP, 3 – JJ. Η εταιρία Jolly Jets έχει σημαντικά περισσότερο όγκο επιβατών από τις άλλες δύο, επομένως αναμένεται να τοποθετηθεί σε κάποιο από τα κοντινά εκδοτήρια. Αρχικά ελέγχονται τρία σενάρια, μεταβάλλοντας κυκλικά τις θέσεις των εταιριών. Όπως αναμενόταν το σενάριο που τοποθετεί την JJ στο εκδοτήριο Counter 1 έχει σαφώς αρνητικά αποτελέσματα. Οπότε εξετάζονται δύο επιπλέον σενάρια – παραλλαγές των 1 & 2. Κριτήρια απόδοσης ορίζονται ο Μέσος Συνολικός Χρόνος των επιβατών και το ποσοστό των Χαμένων Πτήσεων. Σενάρια και αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω, όπως προέκυψαν από το Process Analyzer:

Πίνακας 13: Εναλλακτικά σενάρια αντιστοίχισης εκδοτηρίων & αποτελέσματα

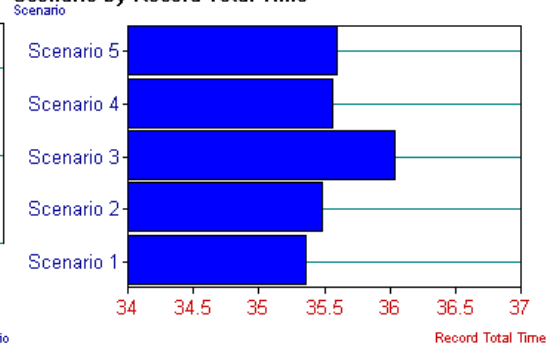
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
Counter 1	FF	PP	JJ	PP	FF
Counter 2	PP	JJ	FF	FF	JJ
Counter 3	JJ	FF	PP	JJ	PP

	Συνολικός Χρόνος (min)	% Missed Flights
Scenario 1	35.356	0.251
Scenario 2	35.486	0.249
Scenario 3	36.037	0.316
Scenario 4	35.566	0.268
Scenario 5	35.598	0.320

Missed Flights % by Scenario



Scenario by Record Total Time



Τα δύο πρώτα σενάρια έχουν παραπλήσια αποτελέσματα, με το 1^ο να προηγείται οριακά στο συνολικό χρόνο των επιβατών και το 2^ο στο ποσοστό των χαμένων

πτήσεων. Επομένως δεν κρίνεται αναγκαία κάποια αλλαγή στην τρέχουσα διαρρύθμιση εκδοτηρίων - αερογραμμών.

Αύξηση – Μείωση κατά 20% των Χρόνων Ελέγχου

Στο στάδιο αυτό μελετάται η αύξηση και η μείωση κατά 20% αντίστοιχα των χρόνων ελέγχου επιβατών. Οι χρόνοι αυτοί περιλαμβάνουν όλους τους ελέγχους που εκτελούνται στο Security Area και διαμορφώνονται για στην περίπτωση της αύξησης κατά 20% ως εξής:

Πίνακας 14: Αύξηση χρόνων ελέγχου κατά 20%

Χρόνοι +20% (s)	Ελάχιστος	Μέσος	Μέγιστος
Precheck	7	16	47
People Scan	4	6	8
Bag Scan	10	18	54
Manual Search	18	108	144

Τρέχοντας το μοντέλο με τους ήδη υπάρχοντες πόρους (μηχανήματα και προσωπικό), τα αποτελέσματα ήταν καταστροφικά: 20% χαμένες πτήσεις και μόλις 44,6% των επιβατών εξυπηρετήθηκαν σε 45 λεπτά. Μέσα από δοκιμές και βελτιστοποίηση με το OptQuest βρέθηκε ότι απαιτείται ένα επιπλέον Security Checkpoint (συνολικά 9 δηλαδή), και επιπροσθέτως ένας υπάλληλος κάθε ειδικότητας (precheck, standard security) κάθε ημέρα. Αναλυτικά οι πόροι και η αντίστοιχη προσαύξηση του κόστους:

Πίνακας 15: Διαμόρφωση κόστους - αύξηση χρόνων 20%

Επιπλέον Πόροι		Επιπλέον Κόστος	Χρ. Ορίζοντας	Ανά Εβδομάδα
Εξοπλισμός	1 People Scanner	\$ 34.500	2 χρόνια	\$ 764
	1 Bag Scanner	\$ 45.000	2 χρόνια	
Προσωπικό	2 Bag Scan Security	\$ 1.344	ημέρα	\$ 15.456
	1 Std Security	\$ 432	ημέρα	
	1 Precheck Security	\$ 432	ημέρα	
Μεταβλητό Κόστος		Σταθερό		
Επιπλέον δαπάνη ανά Επιβάτη:				\$ 0,170

Με αυτά τα δεδομένα πόρων και χρόνων ελέγχου, έπειτα από 52 εβδομάδες λειτουργίας οι δείκτες ικανοποίησης έχουν: 0,79% χαμένες πτήσεις, 92,9% εξυπηρετήθηκαν το πολύ σε 45 λεπτά κι ο μέσος χρόνος ελέγχου διαμορφώθηκε στα 13,55 λεπτά.

Αντίθετα, η μείωση των χρόνων ασφαλείας σε ποσοστό 20% τους διαμορφώνει ως εξής:

Πίνακας 16: Μείωση χρόνων ελέγχου κατά 20%

Χρόνοι -20% (s)	Ελάχιστος	Μέσος	Μέγιστος
Precheck	5	11	31
People Scan	2	4	6
Bag Scan	8	12	36
Manual Search	12	72	96

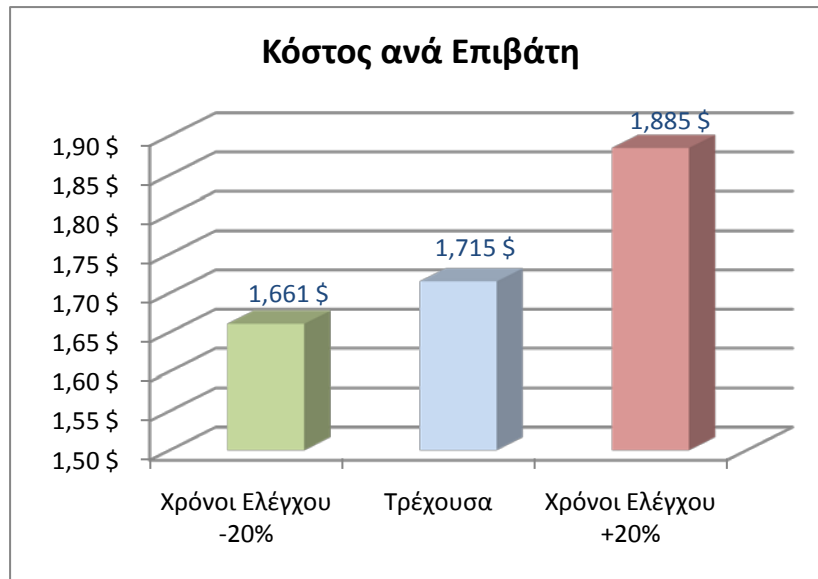
Με τα δεδομένα αυτά και τους ήδη υπάρχοντες πόρους μειώνεται σημαντικά το Security Time (5.4 min), το ποσοστό χαμένων πτήσεων είναι σχεδόν μηδενικό και όλοι οι επιβάτες εξυπηρετούνται σε λιγότερο από 45 λεπτά. Διερευνώντας τυχόν εξοικονόμηση κόστους που μπορεί να προκύψει, με σεβασμό πάντα στους περιορισμούς ικανοποίησης των επιβατών, μελετάται κάθε ημέρα της εβδομάδας ξεχωριστά. Τα security checkpoints παραμένουν οκτώ κάθε ημέρα επομένως μείωση κόστους μπορεί να επιτευχθεί ελαττώνοντας το προσωπικό. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά οι μειώσεις εργατωρών που προκύπτουν.

Πίνακας 17: Διαμόρφωση κόστους - μείωση χρόνων 20%

Ημέρες	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security	Εργατικά / Ώρα	Κέρδος / Ώρα	Κέρδος / Εβδομάδα
WE	5	8	16	\$ 682,00	\$ 18,00	\$ 864,00
WE -20%	4	8	16	\$ 664,00		
MF	8	10	16	\$ 772,00	\$ 90,00	\$ 4.320,00
MF -20%	5	8	16	\$ 682,00		
TWT	4	8	16	\$ 664,00	\$ -	\$ -
TWT -20%	4	8	16	\$ 664,00		
Εβδομαδιαίο Κέρδος:						\$ 5.184,00
Κέρδος ανά Επιβάτη:						\$ 0,054

Τρέχοντας το μοντέλο με τους ανωτέρω χρόνους και πρόγραμμα προσωπικού προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα: 0,1% χαμένες πτήσεις, 99% εξυπηρετήθηκαν σε 45 λεπτά με το μέσο χρόνο ελέγχου των επιβατών να είναι στα 8,15 λεπτά.

Συνεπώς, το κόστος ανά επιβάτη σε κάθε περίπτωση διαμορφώνεται:



Εικόνα 49: Κόστος ανά επιβάτη / διαμόρφωση προτύπων χρόνου ελέγχων

Ανάθεση προτεραιότητας σε Επιβάτες Α' Θέσης

Εξετάζεται η επίδραση στους βασικούς δείκτες στην περίπτωση που οι επιβάτες Α' θέσης (elite) αποκτήσουν προτεραιότητα κατά τη διαδικασία ελέγχου εισιτηρίων και διαβατηρίων (precheck). Η μεταβολή των δεικτών στην περίπτωση αυτή είναι ελάχιστη, με τα στατιστικά εξυπηρέτησης πλην του μέσου χρόνου ελέγχου να βελτιώνονται οριακά.

Πίνακας 18: Δείκτες - Προτεραιότητα Elite επιβατών

Δείκτης	Αρχικά	Προτεραιότητα Elite
Security Time (min)	12,326	12,666
% Served in 45min	94,903	95,071
% Missed Flights	0,350	0,320

Ακολούθως μελετάται τυχόν εξοικονόμηση που μπορεί να προκύψει αν εκτός από προτεραιότητα στο precheck, οι επιβάτες Α' θέσης χρήζουν ταχύτερης εξυπηρέτησης σε όλη τη διαδικασία ελέγχου, χαμηλώνοντας τα πρότυπα χρόνου ελέγχου αυτών κατά 20%.

Κατ' αρχάς, με τον υπάρχων προγραμματισμό, οι δείκτες ικανοποίησης παρουσιάζουν σαφή βελτίωση: 0,21% χαμένες πτήσεις, 96,4% των επιβατών εξυπηρετούνται σε 45 λεπτά, και ο μέσος χρόνος ελέγχου πέφτει στα 10,84 λεπτά.

Ελέγχθηκε (OptQuest) αν μπορεί να γίνει κάποια μείωση προσωπικού με παράλληλη ικανοποίηση πάντα των περιορισμών. Οι ελάχιστες απαιτήσεις ανά ημέρα σε precheck και standard security προκύπτουν:

Πίνακας 19: Απαιτήσεις σε πόρους

Ημέρες	Precheck Security	Standard Security
MF	6	8
WE	5	8
TWT	4	8

Άρα το μόνο περιθώριο μείωσης προσωπικού είναι κατά τις ημέρες Δευτέρα – Παρασκευή. Η μείωση του εργατικού δυναμικού κατά 4 άτομα τις ημέρες αυτές, αντιστοιχεί σε 192 λιγότερες εργατοώρες εβδομαδιαίως που μεταφράζεται σε \$3.456 ανά εβδομάδα, ή \$0,036 ανά επιβάτη.

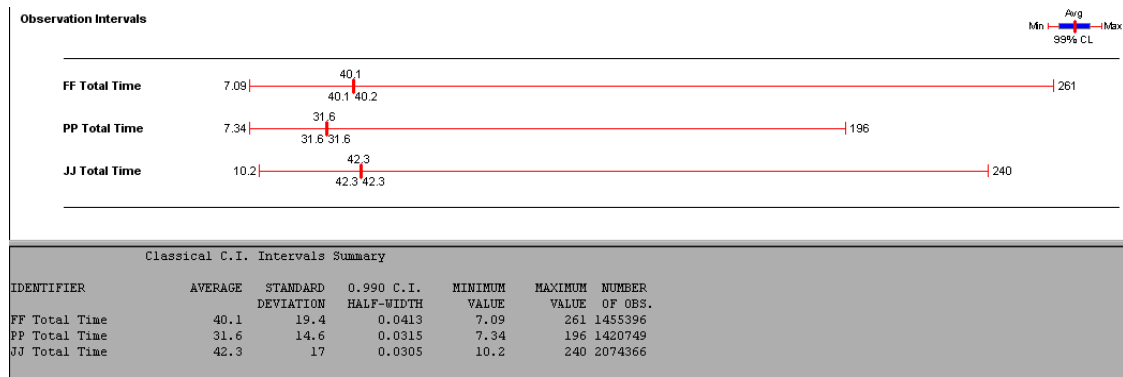
Όσον αφορά τους δείκτες ικανοποίησης των επιβατών, με τη μείωση αυτή στο προσωπικό, και έπειτα από εκτέλεση του μοντέλου για ένα έτος (52 εβδομάδες) προκύπτουν τα εξής:

- 10,87 λεπτά Μέσος Χρόνος Ελέγχου
- 0,21% Χαμένες Πτήσεις
- 96,4% των επιβατών εξυπηρετούνται το πολύ σε 45 λεπτά.

Προτεινόμενος Χρόνος Προσέλευσης Επιβατών

Στο σημείο αυτό εξετάζεται αν είναι θεμιτό να γίνει κάποια τροποποίηση στο χρόνο προσέλευσης των επιβατών που συνιστούν οι αεροπορικές εταιρίες στο κοινό τους. Γίνεται ανάλυση των δεδομένων του συνολικού χρόνου των επιβατών στο αεροδρόμιο ανάλογα με την εταιρία στην οποία «ανήκουν».

Τα δεδομένα από τη λειτουργία του αεροδρομίου για ένα έτος ομαδοποιούνται, ελέγχεται η κατανομή του συνολικού μέσου χρόνου (Total Time) με εύρος εμπιστοσύνης 99% και αναπαρίσταται με τη βοήθεια του Output Analyzer και της επιλογής “Confidence Interval on Mean” που παρέχει.



Εικόνα 50: Στατιστική ανάλυση συνολικού χρόνου επιβατών

Κάθε μέση τιμή του χρόνου αυτού έχει μια ορισμένη τυπική απόκλιση, ενώ παρουσιάζονται παράλληλα οι μέγιστες και ελάχιστες (ανεξάρτητες) τιμές. Στόχος είναι σχεδόν όλοι οι επιβάτες να προλαβαίνουν την πτήση τους. Με τη λογική αυτή, πρέπει στο συνιστώμενο χρόνο άφιξης να περιλαμβάνονται όλες οι μέσες τιμές του συνολικού χρόνου επιβατών που παρατηρήθηκαν, αφήνοντας το ενδεχόμενο κάποιων ακραίων τιμών επίσης ακραίων μέσων όρων να αποτελέσει την ανοχή του 1% στις χαμένες πτήσεις. Για το λόγο αυτό ο συνιστώμενος χρόνος πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον 4 τυπικές αποκλίσεις του μέσου. Στον παρακάτω πίνακα διαφαίνεται πως προέκυψαν οι προτεινόμενοι χρόνοι:

Πίνακας 20: Διαμόρφωση συνιστώμενου χρόνου προσέλευσης – (T3-S3)

Αερογραμμή	Μ.Ο. Συνολικού Χρόνου	Τυπική Απόκλιση Συν. Χρόνου	Μ.Ο. + 4*Τ.Α.	Συνιστώμενος Χρόνος Προσέλευσης
FF	40,2	19,4	118	120
PP	31,6	14,6	90	95
JJ	42,3	17	110	115

Τρέχοντας το μοντέλο με αυτούς τους συνιστώμενους χρόνους προσέλευσης (FF – 120, PP – 95 και JJ – 115 min) οι δείκτες ικανοποίησης διαμορφώθηκαν ως εξής:

- 11,85 min Μέσος Χρόνος Εξυπηρέτησης
- 0,58% Χαμένες Πτήσεις
- 95,49% του συνόλου ελέγχθηκαν σε λιγότερο από 45 λεπτά.

Οι δείκτες αυτοί, αν και εμφανώς επηρεασμένοι σε σχέση με την αρχική υπόδειξη των 120 λεπτών για όλες τις εταιρίες, είναι πλήρως αποδεκτοί.

Τέλος, υπολογίστηκε η επίδραση που θα έχει στο ποσοστό των χαμένων πτήσεων η μη συμμόρφωση όλων των επιβατών με το συνιστώμενο χρόνο προσέλευσης.

Γίνεται η υπόθεση ότι το 30% των επιβατών θα καθυστερήσει κατά το 20-40% του προτεινόμενου χρόνου προσέλευσης. Στην περίπτωση της Fabulous Flights για παράδειγμα, το 30% των ταξιδιωτών θα φτάσει 72 έως 96 λεπτά πριν την αναχώρηση της πτήσης.

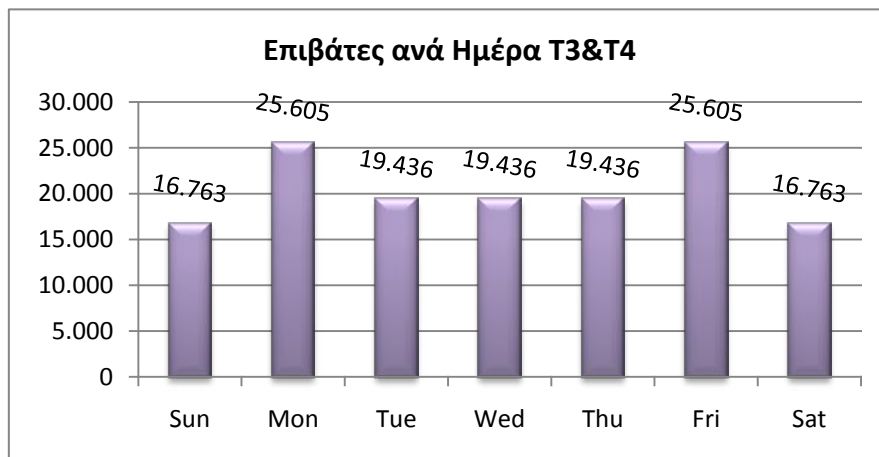
Εφαρμόζοντας τη συνθήκη αυτή για τους επιβάτες όλων των αερογραμμών, ο δείκτης Missed Flights κατά τη λειτουργία του αεροδρομίου για 52 εβδομάδες ανήλθε στο 2,96%.

Μελλοντική Κατάσταση

Όσον αφορά τις σκέψεις για επέκταση του αεροδρομίου με τη λειτουργία ενός νέου τερματικού σταθμού που θα εξυπηρετεί δύο νέες εταιρίες (Airborne Airlines και Wild Wings), υπάρχουν δύο εφικτά σενάρια υλοποίησης αυτών. Κατά το πρώτο, όλοι οι επιβάτες θα ελέγχονται στο ήδη υπάρχων Security Area 3, το οποίο θα επεκταθεί καταλλήλως. Σύμφωνα με το δεύτερο, θα δημιουργηθεί ένας νέος, ξεχωριστός χώρος ελέγχου στο Terminal 4, αποκλειστικά για την εξυπηρέτηση των νέων αεροπορικών εταιριών.

Η μελέτη έδειξε ότι βέλτιστη κατάσταση είναι αυτή που περιγράφει το δεύτερο σενάριο, με δύο ξεχωριστούς χώρους ελέγχου. Η πρόταση αυτή θα έχει κόστος περί τα \$23 εκατ. για τα επόμενα δύο χρόνια λειτουργίας των τερματικών σταθμών 3 & 4, έναντι του πρώτου σεναρίου, το κόστος του οποίου ανέρχεται στα \$25,7 εκατ.

Με την εισαγωγή των Airborne Airlines (AA) και Wild Wings (WW) οι εκτιμώμενες αφίξεις επιβατών ημερησίως αυξάνονται σημαντικά. Δευτέρα και Παρασκευή παραμένουν οι πιο πολυσύχολες μέρες, ενώ το Σαββατοκύριακο έχει πλέον τη μικρότερη κίνηση.



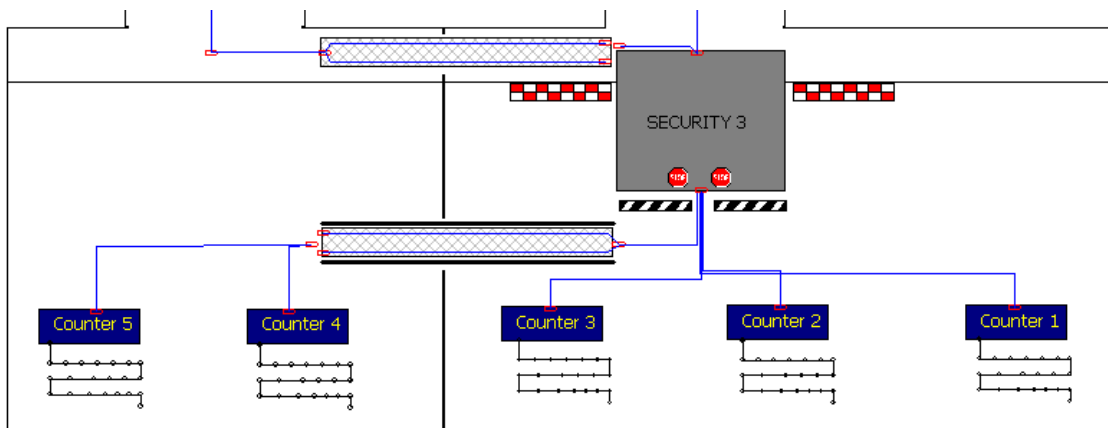
Εικόνα 51: Αφίξεις επιβατών ανά ημέρα - Μελλοντική κατάσταση

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της μελέτης των δύο σεναρίων και η μεταξύ τους σύγκριση. Σημειώνεται πως μιας και γίνεται ένας νέος προγραμματισμός στη λειτουργία του αεροδρομίου κρίθηκε σκόπιμο να μην λειτουργούν καθημερινά όλα τα security checkpoints, καθώς οι ανάγκες διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στις ημέρες της εβδομάδας και μπορούν να εξοικονομηθούν μεγάλα ποσά με τον τρόπο αυτό.

Έτσι πλέον, στην ημερήσια μελέτη λειτουργίας του αεροδρομίου, θεωρείται μεταβλητός και ο αριθμός των ενεργών σημείων ελέγχου στον χώρο ελέγχου¹.

Σενάριο 1: T3, T4 – S3

Στην περίπτωση αυτή οι επιβάτες του T4 μεταβαίνουν στο T3, όπου βρίσκεται ο χώρος ελέγχου Security Area 3. Η μετάβαση αυτή γίνεται με τη χρήση κυλιόμενων πεζοδρομίων. Έπειτα, μεταφέρονται πίσω στο T4, και συγκεκριμένα στις πύλες του τερματικού σταθμού, ώστε να επιβιβαστούν στην πτήση τους. Οι μετακινήσεις αυτές μοντελοποιήθηκαν με ακρίβεια και, όπως προέκυψε από τη μελέτη, αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρονοβόρες. Η διαρρύθμιση του αεροδρομίου στο σενάριο αυτό θα είναι ανάλογη της παρακάτω εικόνας.



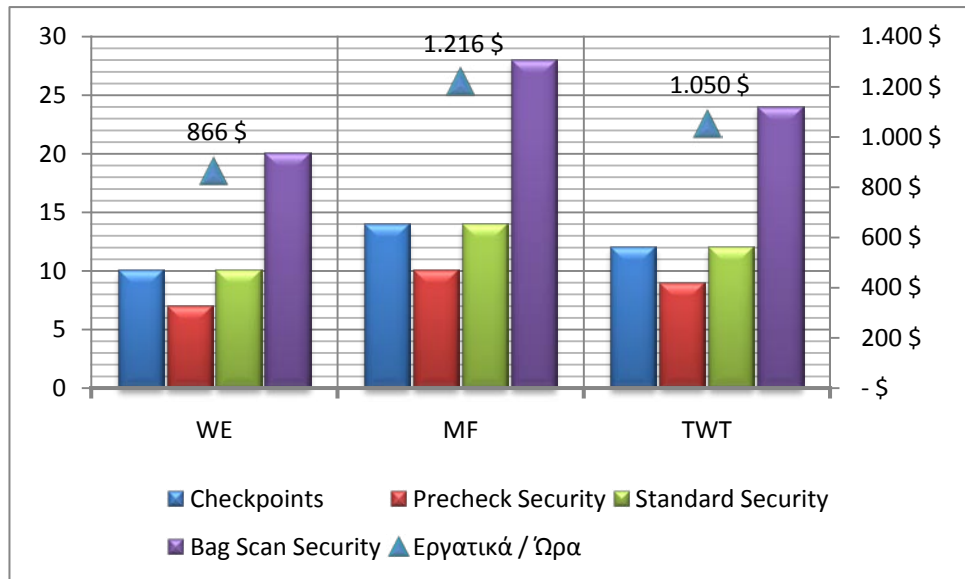
Εικόνα 52: Διαμόρφωση αεροδρομίου - (T3,T4 - S3)

Μελετώντας τη λειτουργία του αεροδρομίου με τα νέα δεδομένα για κάθε ημέρα της εβδομάδας ξεχωριστά, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι πόροι:

Πίνακας 21: Πόροι συστήματος - (T3,T4 - S3)

	Checkpoints	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security	Εργατικά / Ώρα
WE	10	7	10	20	\$ 866
MF	14	10	14	28	\$ 1.216
TWT	12	9	12	24	\$ 1.050

¹ Ή στους δύο ανεξάρτητους χώρους για το Σενάριο 2.



Εικόνα 53: Πόροι συστήματος - (T3,T4 - S3)

Με τον προγραμματισμό αυτό και τρέχοντας το μοντέλο για 52 εβδομάδες (1 χρόνο) τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

Πίνακας 22: Δείκτες Ικανοποίησης - (T3,T4 - S3)

Δείκτης	Μ.Ο.	Ημιέυρος
Security Time (min)	15,092	0,20
% Served in 45min	97,038	0,20
% Missed Flights	0,188	0,03

Ο μέσος αριθμός επιβατών είναι 143.159 ανά εβδομάδα. Το μέσο κόστος ανά επιβάτη υπολογίζεται από το κόστος της αρχικής επένδυσης σε εξοπλισμό, τα εργατικά κόστη και το μεταβλητό κόστος. Το τελευταίο αφορά στη χρήση των μηχανημάτων και υπολογίζεται με ακρίβεια από το μοντέλο.

Πίνακας 23: Κόστος Εξοπλισμού - (T3,T4 - S3)

Αρχική Επένδυση			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος	Συνολικό Κόστος
Bag Scanner	14	\$ 45.000,00	\$ 630.000,00
People Scanner	14	\$ 34.500,00	\$ 483.000,00
Bag Search Desk	3	\$ 800,00	\$ 2.400,00
2ετές κόστος:			\$ 1.115.400,00

Πίνακας 24: Εργατικά Κόστη - (T3,T4 - S3)

Εργατικά		
Ημέρες	Κόστος / ώρα	Ημερίσιο Σύνολο
WE	\$ 866,00	\$ 20.784,00
MF	\$ 1.216,00	\$ 29.184,00
TWT	\$ 1.050,00	\$ 25.200,00
Σύνολο Εβδομάδας:		\$ 175.536,00

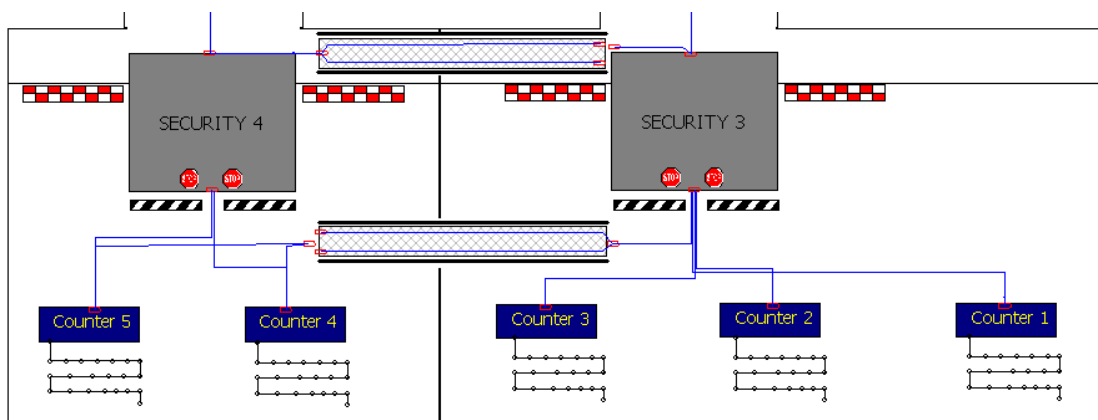
Πίνακας 25: Κόστος ανά Επιβάτη - (T3,T4 - S3)

Αναγωγή σε Κόστος ανά Επιβάτη	
Αρχική Επένδυση / Εβδομάδα	\$ 10.725,00
Εργατικά / Εβδομάδα	\$ 175.536,00
Εβδομαδιαίο Μεταβλητό Κόστος	\$ 61.267,00
Συνολικό Εβδομαδιαίο Κόστος	\$ 247.528,00
Επιβάτες	143.159
Κόστος ανά Επιβάτη	\$ 1,729

Συνεπώς, το συνολικό κόστος της επιλογής αυτής είναι στα **\$25.742.912** για λειτουργία δύο ετών, ποσό που επιμερίζεται σε **\$1,729** ανά επιβάτη.

Σενάριο 2: T3, T4 – S3, S4

Στην περίπτωση αυτή οι επιβάτες των νέων αερογραμμών (AA, WW) που εξυπηρετούνται στο Terminal 4, ελέγχονται σε ξεχωριστό χώρο, Security Area 4, που δημιουργείται εντός του τερματικού σταθμού. Δεν απαιτείται κάποια μετάβαση μεταξύ T3 και T4, επομένως η δημιουργία των κυλιόμενων πεζοδρομίων είναι προαιρετική. Η διαρρύθμιση του αεροδρομίου στο σενάριο αυτό θα είναι ανάλογη της παρακάτω εικόνας.

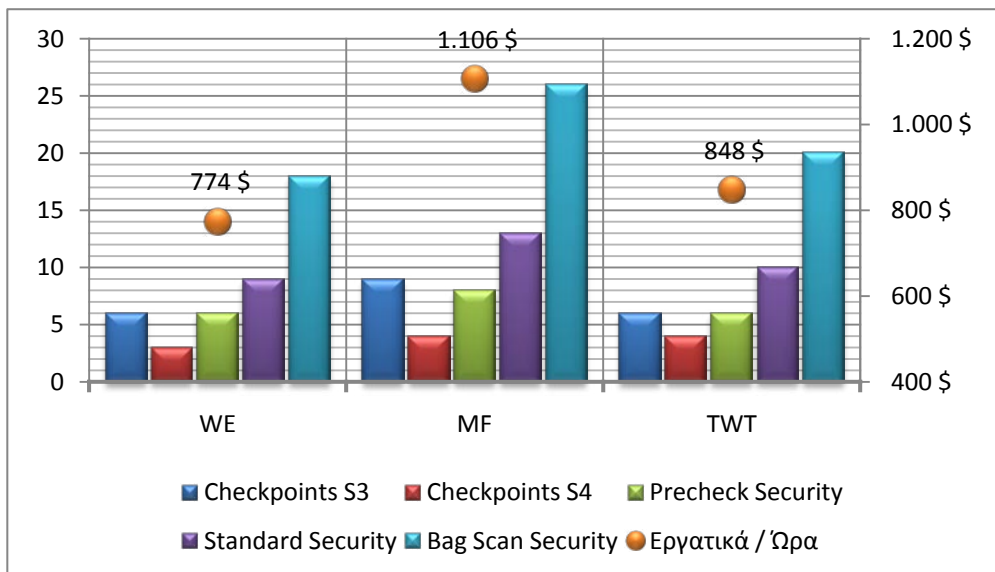


Εικόνα 54: Διαμόρφωση χώρου - (T3,T4-S3,S4)

Μελετώντας τη λειτουργία του αεροδρομίου με τα δεδομένα του σεναρίου αυτού και για κάθε ημέρα της εβδομάδας ξεχωριστά, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι πόροι:

Πίνακας 26: Απαιτούμενοι πόροι - (T3,T4-S3,S4)

	Checkpoints S3	Checkpoints S4	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security	Εργατικά / Ώρα
WE	6	3	6	9	18	774
MF	9	4	8	13	26	1106
TWT	6	4	6	10	20	848



Εικόνα 55: Απαιτούμενοι πόροι - (T3,T4-S3,S4)

Τηρώντας αυτό τον προγραμματισμό πόρων, η εξομοίωση της λειτουργίας του αεροδρομίου για ένα χρόνο είχε τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 27: Δείκτες Ικανοποίησης - (T3,T4-S3,S4)

Δείκτης	M.O.	Ημειύρος
Security Time S3 (min)	10,485	0,14
Security Time S4 (min)	9,299	0,20
% Served in 45min	98,296	0,13
% Missed Flights	0,097	0,01

Σημειώνεται πως ο μέσος χρόνος ασφαλείας υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε χώρο ελέγχου. Αυτό για να αποφευχθεί η περίπτωση τα στοιχεία του S3 να «συγκαλύπτουν» αυτά του S4 και το αντίστροφο. Πρέπει ο μέσος όρος ανεξαρτήτως χώρου ελέγχου να είναι πάγια κάτω από τα 24 λεπτά. Υπολογίζεται κατόπιν το κόστος που αντιστοιχεί σε κάθε επιβάτη.

Πίνακας 28: Κόστος εξοπλισμού - (T3,T4-S3,S4)

Αρχική Επένδυση			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος	Συνολικό Κόστος
Bag Scanner	13	\$ 45.000,00	\$ 585.000,00
People Scanner	13	\$ 34.500,00	\$ 448.500,00
Bag Search Desk	3	\$ 800,00	\$ 2.400,00
Ζετές κόστος:			\$ 1.035.900,00

Πίνακας 29: Εργατικά κόστη - (T3,T4-S3,S4)

Εργατικά		
Ημέρες	Κόστος / ώρα	Ημερίσιο Σύνολο
WE	\$ 774,00	\$ 18.576,00
MF	\$ 1.106,00	\$ 26.544,00
TWT	\$ 848,00	\$ 20.352,00
Σύνολο Εβδομάδας:		\$ 151.296,00

Πίνακας 30: Κόστος ανά επιβάτη - (T3,T4-S3,S4)

Αναγωγή σε Κόστος ανά Επιβάτη	
Αρχική Επένδυση / Εβδομάδα	\$ 9.960,58
Εργατικά / Εβδομάδα	\$ 151.296,00
Εβδομαδιαίο Μεταβλητό Κόστος	\$ 60.307,00
Συνολικό Εβδομαδιαίο Κόστος	\$ 221.563,58
Επιβάτες / Εβδομάδα	143.159
Κόστος ανά Επιβάτη	\$ 1,548

Το κόστος αυτού του σεναρίου ανέρχεται στα **\$23.042.612** για διετή λειτουργία των τερματικών σταθμών T3 και T4, με το κόστος ανά επιβάτη να διαμορφώνεται στα **\$1,548**.

Σύγκριση

Κατόπιν λεπτομερούς μελέτης και ανάλυσης προτείνεται στη διοικούσα αρχή του αεροδρομίου η υιοθέτηση του δεύτερου σεναρίου σε περίπτωση επέκτασης. Μολονότι δεν έγιναν γνωστά (και κατ' επέκταση δεν περιλαμβάνονται στην έρευνα) τυχόν κόστη διαμόρφωσης του χώρου που θα φιλοξενήσει το Security Area 4, είναι τέτοια η διαφορά κόστους μεταξύ των υποψηφίων σεναρίων που επιτρέπει την ασφαλή σύσταση του δευτέρου εξ αυτών. Παράλληλα, στην περίπτωση που προτείνεται, δεν είναι απολύτως αναγκαία η κατασκευή των κυλιόμενων πεζοδρομίων, γεγονός που σίγουρα προσαυξάνει το κόστος του πρώτου σεναρίου.

Πίνακας 31: Σύγκριση Σεναρίων

Δείκτης	T3,T4 - S3	T3,T4 - S3,S4	Διαφορά Σ1-Σ2
Security Time S3 (min)	15,092	10,485	4,607
Security Time S4 (min)	-	9,299	-
% Served in 45min	97,038	98,296	1,258
% Missed Flights	0,188	0,097	0,091
Συνολικό Διετές Κόστος	\$ 25.742.912	\$ 23.042.612	\$ 2.700.300
Κόστος ανά Επιβάτη	\$ 1,729	\$ 1,548	\$ 0,181

Είναι ξεκάθαρο από το συγκριτικό πίνακα ότι η περίπτωση του ξεχωριστού χώρου ελέγχου (Σενάριο 2) είναι ανώτερη σε όλους τους δείκτες ικανοποίησης, με παράλληλα μικρότερο κόστος.

Καταλυτικό ρόλο στην εικόνα αυτή παίζει ο σημαντικά αυξημένος χρόνος των μετακινήσεων στην περίπτωση που υπάρχει ένας μοναδικός χώρος ελέγχου. Για να ανταπεξέλθει το Security Area 3 στον αυξημένο όγκο και τους χρονικούς περιορισμούς είναι αναγκαίος ο προγραμματισμός περισσότερων πόρων. Αντίθετα, η ύπαρξη δύο ξεχωριστών χώρων ελέγχου μειώνει αισθητά το χρόνο που «χάνεται» σε μετακινήσεις, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο στη διαδικασία ελέγχου.

Θεωρώντας ότι σε περίπτωση επέκτασης θα επιλεχθεί το δεύτερο σενάριο, ακολουθεί περαιτέρω διερεύνηση και βελτιστοποίηση παραμέτρων αυτού, καθώς και μελέτη της ευαισθησίας του σε πιθανές αλλαγές διαδικασιών στο μέλλον.

Βελτιστοποίηση

Κόστος ανά Εταιρία

Το κόστος ανά εταιρία διαμορφώνεται βάσει του ποσοστού των επιβατών καθεμιάς επί του συνόλου. Το κόστος για την παροχή των υπηρεσιών ασφαλείας του αεροδρομίου που προκύπτει αφορά τη «φιλοξενία» τους για δύο έτη.

Πίνακας 32: Χρέωση ανά εταιρία - (T3,T4-S3,S4)

	Fabulous Flights	Premium Planes	Jolly Jets	Airborne Airlines	Wild Wings	Σύνολο
Αριθμός Επιβατών / Εβδομάδα	28.090	27.459	40.084	20.367	27.044	143.044
Αναλογία Κόστους / 2 έτη	\$ 4.524.932	\$ 4.423.263	\$ 6.457.032	\$ 3.280.869	\$ 4.356.515	\$ 23.042.612

Άξια παρατήρησης είναι η μείωση του κόστους αυτού για τις εταιρίες που ήδη στεγάζονται στο Terminal 3, ως αποτέλεσμα του επιμερισμού του κόστους σε περισσότερες αερογραμμές. Η μείωση αυτή ξεπερνάει το μισό εκατ. δολάρια για την περίπτωση της Jolly Jets.

Μέγεθος Χώρου Αναμονής

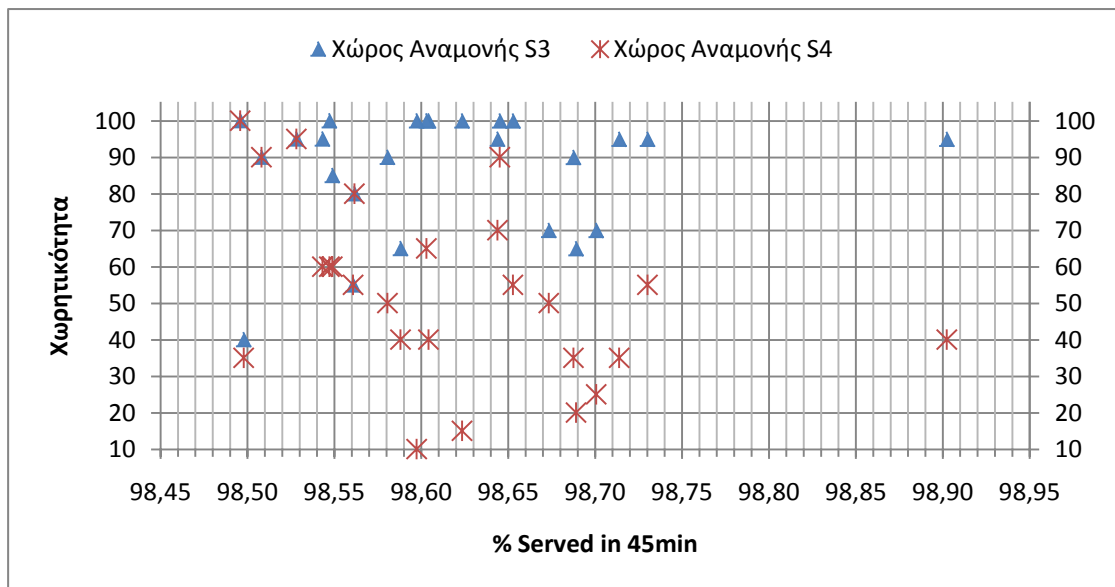
Η υπό εξέταση διαρρύθμιση έχει δύο Security Areas και κατ' επέκταση, δύο ανεξάρτητους χώρους αναμονής. Μελετάται με παρόμοιο τρόπο όπως στην αρχική περίπτωση η επίδραση που έχει το μέγεθος των χώρων αυτών στους δείκτες του συστήματος. Γίνεται υπόθεση ότι η χωρητικότητα μεταβάλλεται ανά 5 άτομα, και η μέγιστη είναι στα 100 για τον κάθε χώρο αναμονής. Κριτήριο βελτιστοποίησης αποτελεί το ποσοστό των ατόμων που εξυπηρετήθηκαν σε 45 λεπτά, καθώς ο χρόνος Security Time διαφέρει πλέον μεταξύ των δύο τερματικών σταθμών.

Βέλτιστη λύση έπειτα από σχετική ανάλυση με το OptQuest βρέθηκε αυτή της χωρητικότητας 95 ατόμων στο S3 και 40 στο S4. Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται οι πέντε καλύτερες λύσεις μεταξύ των δοκιμών.

Πίνακας 33: Οι 5 καλύτερες λύσεις χώρου αναμονής - (T3,T4-S3,S4)

Λύση	%Served in less than 45min	Χώρος Αναμονής S3	Χώρος Αναμονής S4
1	98,902	95	40
2	98,730	95	55
3	98,714	95	35
4	98,701	70	25
5	98,689	65	20

Αντίστοιχα στο διάγραμμα απεικονίζονται οι 25 καλύτερες λύσεις (απόκλισης περίπου 0,5% από τη βέλτιστη). Κάθε ζεύγος τιμών «Χώρος Αναμονής S3», «Χώρος Αναμονής S4» ανήκει στην ίδια κάθετη, η οποία τέμνει τον άξονα χ στην αντίστοιχη τιμή του ποσοστού επιβατών που εξυπηρετήθηκαν σε 45 λεπτά.

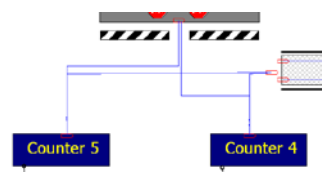


Εικόνα 56: Οι 25 καλύτερες λύσεις χώρου αναμονής - (T3,T4-S3,S4)

Αντιστοίχιση Εκδοτηρίων

Στο νέο terminal προστίθενται δύο εκδοτήρια για την εξυπηρέτηση των αερογραμμών Airborne Airlines και Wild Wings. Οι αποστάσεις αυτών από το Security Area 4 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Εκδοτήριο	Απόσταση από S3 (m)
Counter 4	50
Counter 5	105



Εικόνα 57: Αποστάσεις & διαρρύθμιση εκδοτηρίων - (T3,T4-S3,S4)

Δύο επομένως οι πιθανές αντιστοιχήσεις:

Πίνακας 34: Πιθανά σενάρια αντιστοίχισης εκδοτηρίων - (T3,T4-S3,S4)

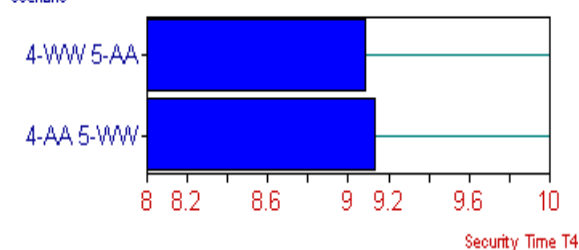
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Counter 4	AA	WW
Counter 5	WW	AA

Η λογική προτάσσει την τοποθέτηση της αερογραμμής με τους περισσότερους επιβάτες στο εκδοτήριο που απέχει λιγότερο από το χώρο ελέγχου. Πράγματι, η μελέτη των δύο εναλλακτικών σεναρίων επιβεβαιώνει τη διαρρύθμιση αυτή. Βασικό κριτήριο απόδοσης είναι το ποσοστό των Χαμένων Πτήσεων. Επίσης εξετάζεται και ο χρόνος ελέγχου στο Security Area 4, καθώς αφορά αποκλειστικά τους επιβάτες των δύο νέων αερογραμμών. Σενάρια και αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω, όπως προέκυψαν από το Process Analyzer:

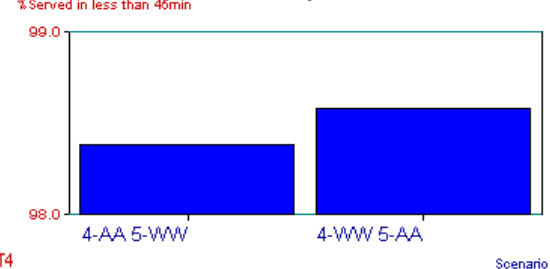
Πίνακας 35: Αποτελέσματα μελέτης αντιστοίχισης εκδοτηρίων - (T3,T4-S3,S4)

	% Served in 45 min	% Missed Flights	Security Time S4 (min)
Σενάριο 1	98.381	0.093	9.134
Σενάριο 2	98.578	0.088	9.081

Scenario by Security Time T4



%Served in less than 45min by Scenario



Με ομόφωνους όλους τους δείκτες αξιολόγησης κρίνεται βέλτιστη η ανάθεση του εκδοτηρίου counter 4 στην Wild Wings και του counter 5 στην Airborne Airlines. Όσον αφορά την ανάθεση εκδοτηρίων στο Terminal 3, έχει ήδη γίνει η μελέτη για την παρούσα κατάσταση, και δεν αλλάζει κάτι εφόσον το κοινό που εξυπηρετείται στον τερματικό αυτό σταθμό παραμένει απaráλλαχτο. Σε καμία περίπτωση δεν κρίνεται σκόπιμη η μετακίνηση επιβατών μεταξύ terminals, καθώς αυτό αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρονοβόρο κατά την ανάλυση του πρώτου εναλλακτικού σεναρίου για τη μελλοντική επέκταση του αεροδρομίου.

Αύξηση – Μείωση Χρόνων Ελέγχου κατά 20%

Στο στάδιο αυτό μελετάται η αύξηση και η μείωση κατά 20% αντίστοιχα των χρόνων ελέγχου επιβατών. Οι χρόνοι αυτοί περιλαμβάνουν όλους τους ελέγχους που

εκτελούνται στο Security Area και διαμορφώνονται σε κάθε περίπτωση ακριβώς όπως στη μελέτη του αρχικού συστήματος. Ο εξοπλισμός των 13 checkpoints θεωρείται δεδομένος.

Εξετάζοντας το ενδεχόμενο της αύξησης των προτύπων αυτών, έγινε ξεχωριστή μελέτη ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας. Σε καμία περίπτωση ο αρχικός προγραμματισμός πόρων (Checkpoints, προσωπικό) δεν ήταν αρκετός για να καλύψει τις νέες απαιτήσεις.

Πίνακας 36: Απαιτούμενοι πόροι στην περίπτωση αύξησης χρόνων ελέγχου 20%

	Checkpoints S3	Checkpoints S4	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security	Εργατικά /Ωρα	Επιπλέον Εργατικά / Ωρα
WE	6	3	6	9	18	\$ 774	\$ 166
WE +20%	7	4	7	11	22	\$ 940	
MF	9	4	8	13	26	\$ 1.106	\$ 184
MF +20%	10	5	10	15	30	\$ 1.290	
TWT	6	4	6	10	20	\$ 848	\$ 184
TWT +20%	7	5	8	12	24	\$ 1.032	

Μάλιστα, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, τις μέρες Δευτέρα και Παρασκευή απαιτούνται δύο νέα σημεία ελέγχου, 15 συνολικά. Επομένως, εκτός από εργατικά κόστη θα υπάρχει και επιπλέον κόστος εξοπλισμού που θα πρέπει να επιμεριστεί. Στον πίνακα που ακολουθεί παρίσταται αναλυτικά πως επηρεάζεται το κόστος ανά επιβάτη από τις απαιτούμενες αλλαγές στο προγραμματισμό πόρων.

Πίνακας 37: Διαμόρφωση κόστους ανά επιβάτη στην περίπτωση αύξησης χρόνων ελέγχου 20%

Κόστος extra εξοπλισμού	\$ 159.000,00
Επιμερισμός κόστους εξοπ. / Εβδομάδα	\$ 1.528,85
Επιπλέον Εργατικά / Εβδομάδα	\$ 30.048,00
Αριθμός Επιβατών / Εβδομάδα	143.159
Επιπλέον Κόστος ανά Επιβάτη	\$ 0,221

Στην περίπτωση της μείωσης των πρότυπων χρόνων ελέγχου κατά 20% ο υπάρχων εξοπλισμός και προσωπικό είναι ικανά να εγγυηθούν μηδενικό ποσοστό χαμένων πτήσεων και την εξυπηρέτηση του συνόλου των επιβατών σε λιγότερο από 45 λεπτά. Διερευνώντας τυχόν μείωση κόστους, πάντα με παράλληλη κάλυψη των περιορισμών ικανοποίησης, προέκυψε ο εξής προγραμματισμός πόρων κατόπιν βελτιστοποίησης με το OptiQuest:

Πίνακας 38: Απαιτούμενοι πόροι στην περίπτωση μείωσης χρόνων ελέγχου 20%

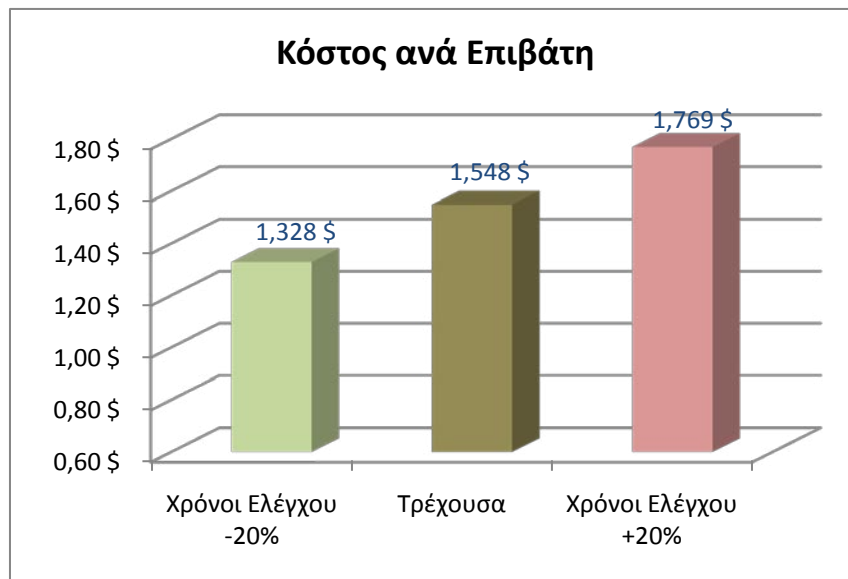
	Checkpoints S3	Checkpoints S4	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security	Εργατικά / Ώρα	Μείωση Εργατικών / Ώρα
WE	6	3	6	9	18	\$ 774	\$ -92
WE -20%	5	3	5	8	16	\$ 682	
MF	9	4	8	13	26	\$ 1.106	\$ -314
MF -20%	6	3	7	9	18	\$ 792	
TWT	6	4	6	10	20	\$ 848	\$ -166
TWT -20%	5	3	5	8	16	\$ 682	

Και αντίστοιχα το κόστος ανά επιβάτη διαμορφώνεται (εδώ δεν υπάρχει διαφορά στον εξοπλισμό):

Πίνακας 39: Διαμόρφωση κόστους ανά επιβάτη στην περίπτωση μείωσης χρόνων ελέγχου 20%

Μείωση Εργατικών / Εβδομάδα	\$ -31.440,00
Αριθμός Επιβατών / Εβδομάδα	143.159
Μείωση Κόστους ανά Επιβάτη	\$ -0,220

Συνεπώς, το κόστος ανά επιβάτη σε κάθε περίπτωση διαμορφώνεται:



Εικόνα 58: Κόστος ανά επιβάτη - Αύξηση / μείωση χρόνων ελέγχου - (T3,T4-S3,S4)

Ανάθεση προτεραιότητας σε Επιβάτες Α' Θέσης

Εξετάζεται η επίδραση στους βασικούς δείκτες στην περίπτωση που οι επιβάτες Α' θέσης (elite) αποκτήσουν προτεραιότητα κατά τη διαδικασία ελέγχου εισιτηρίων και διαβατηρίων (precheck). Τα αποτελέσματα έπειτα από μελέτη λειτουργίας ενός έτους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, συγκριτικά με αυτά της αρχικής κατάστασης

(ίση προτεραιότητα για όλους). Η βελτίωση, έστω και οριακή, αφορά σε όλους τους δείκτες ικανοποίησης των επιβατών.

Πίνακας 40: Διαμόρφωση δεικτών / προτεραιότητα elite - (T3,T4-S3,S4)

Δείκτης	Αρχικά	Προτεραιότητα Elite Επιβατών	20% Καλύτεροι Χρόνοι για Elite
Security Time S3 (min)	10,485	10,380	9,352
Security Time S4 (min)	9,299	9,152	7,774
% Served in 45min	98,296	98,530	98,786
% Missed Flights	0,097	0,096	0,072

Κατόπιν, μελετάται τυχόν εξοικονόμηση που μπορεί να προκύψει αν εκτός από προτεραιότητα στο precheck, οι επιβάτες Α' θέσης χρήζουν ταχύτερης εξυπηρέτησης σε όλη τη διαδικασία ελέγχου, χαμηλώνοντας τα πρότυπα χρόνου ελέγχου αποκλειστικά για αυτούς κατά 20%. Με τους υπάρχοντες πόρους και έπειτα από λειτουργία ενός έτους του αεροδρομίου οι δείκτες διαμορφώνονται όπως διαφαίνονται στην τελευταία στήλη του παραπάνω πίνακα. Οι ελάχιστοι δυνατοί πόροι έπειτα από τη σχετική μελέτη για κάθε ημέρα της εβδομάδας με τα νέα δεδομένα έχουν ως εξής:

Πίνακας 41: Απαιτούμενοι πόροι – 20% καλύτεροι χρόνοι για elite - (T3,T4-S3,S4)

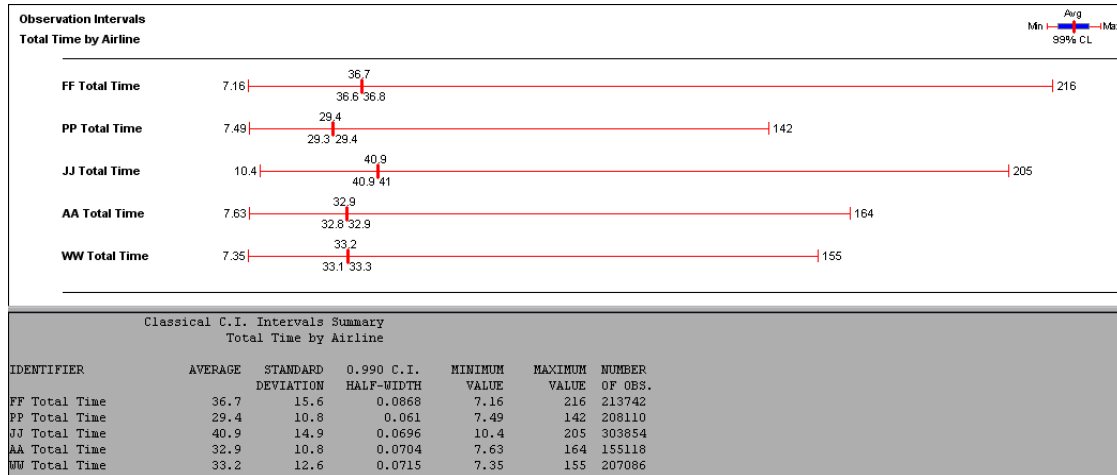
20% Καλύτεροι Χρόνοι για Elite Επιβάτες					
Ημέρες	Checkpoints S3	Checkpoints S4	Precheck Security	Standard Security	Bag Scan Security
WE	6	3	6	9	18
MF	9	4	8	13	26
TWT	6	4	6	10	20

Δεν είναι δυνατή καμία μείωση σε προσωπικό ή εξοπλισμό δηλαδή. Συνεπώς, δεν υπάρχει περιθώριο για μείωση κόστους στην περίπτωση που μειθούν οι χρόνοι ελέγχου για τους επιβάτες Α' θέσης. Στον αντίποδα, η βελτίωση των δεικτών ικανοποίησης είναι αισθητή.

Προτεινόμενος Χρόνος Προσέλευσης Επιβατών

Ελέγχθηκε αν είναι θεμιτό να γίνει κάποια τροποποίηση στο χρόνο προσέλευσης των επιβατών που συνιστούν οι αεροπορικές εταιρίες στο κοινό τους. Η ανάλυση των δεδομένων του συνολικού χρόνου των επιβατών στο αεροδρόμιο έγινε ανάλογα με την εταιρία με την οποία ταξιδεύουν.

Παρόμοια με την μελέτη της τρέχουσας κατάστασης, χρησιμοποιήθηκε το Output Analyzer για την στατιστική μελέτη του μέσου συνολικού χρόνου των επιβατών, και της τυπικής απόκλισης αυτού. Έπειτα, για την ασφαλή έκδοση συνιστώμενου χρόνου προσέλευσης, προστίθενται 4 τυπικές αποκλίσεις σε κάθε μέσο όρο και το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται στην άνω πεντάδα ή δεκάδα.



Εικόνα 59: Στατιστική ανάλυση συνολικού χρόνου επιβατών - (T3,T4-S3,S4)

Πίνακας 42: Διαμόρφωση προτεινόμενου χρόνου προσέλευσης - (T3,T4-S3,S4)

Αερογραμμή	M.O.	Τυπική Απόκλιση	M.O. + 4xT.A.	Προτεινόμενη:
FF	37	15,7	99,8	105
PP	29,8	11,3	75	80
JJ	41,2	15	101,2	110
AA	33,5	11,2	78,3	85
WW	34,1	13,2	86,9	95

Οι προτεινόμενοι χρόνοι άφιξης διαφαίνονται στην τελευταία στήλη του παραπάνω πίνακα. Για λειτουργία του αεροδρομίου ενός έτους με αυτά τα δεδομένα, οι δείκτες ικανοποίησης διαμορφώθηκαν ως εξής:

- 0,51% Χαμένες Πτήσεις
- 98,47% εξυπηρετήθηκαν σε 45 λεπτά

Οι χρόνοι ελέγχου (Security Time) δεν μεταβάλλονται. Η αύξηση στο ποσοστό των χαμένων πτήσεων είναι σημαντική, της τάξης του 0,4%, αλλά και πάλι είναι εντός των θεμιτών ορίων. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η σύσταση προς τον επιβάτη να είναι 85 λεπτά πριν την πτήση του στο αεροδρόμιο δεν είναι ρεαλιστική όσον αφορά το χρονικό μέγεθος καθαυτό. Συνήθως η προτεινόμενη άφιξη θα δίνεται σε «πολλαπλάσια του μισάωρου», δηλαδή μία, μιάμιση ή δύο ώρες πριν την

αναχώρηση. Έτσι, η προτεινόμενη άφιξη θα μπορούσε να είναι δύο ώρες για τις εταιρίες FF, JJ, WW και μιάμιση για τις PP, AA.

Τέλος, και σε αντιστοιχία με τη μελέτη που έγινε για την τρέχουσα κατάσταση του αεροδρομίου, υπολογίσθηκαν οι επιπτώσεις στο δείκτη Missed Flights στην περίπτωση που κάποιοι επιβάτες καθυστερήσουν. Έγινε η υπόθεση ότι το 30% των επιβατών θα καθυστερήσει κατά 20-40% του προτεινόμενου χρόνου.

Το αποτέλεσμα έπειτα από «τρέξιμο» για ένα χρόνο του μοντέλου διαμορφώθηκε στο 2,67% για το δείκτη Χαμένες Πτήσεις.

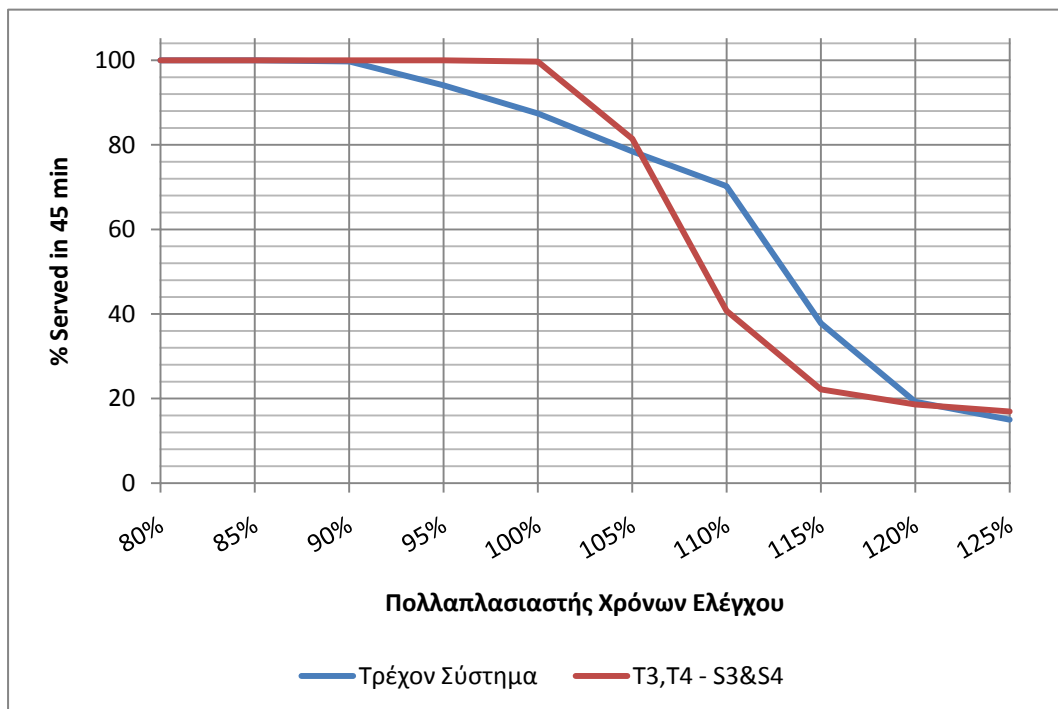
Ανάλυση Ευαισθησίας

Χρόνοι Ελέγχου

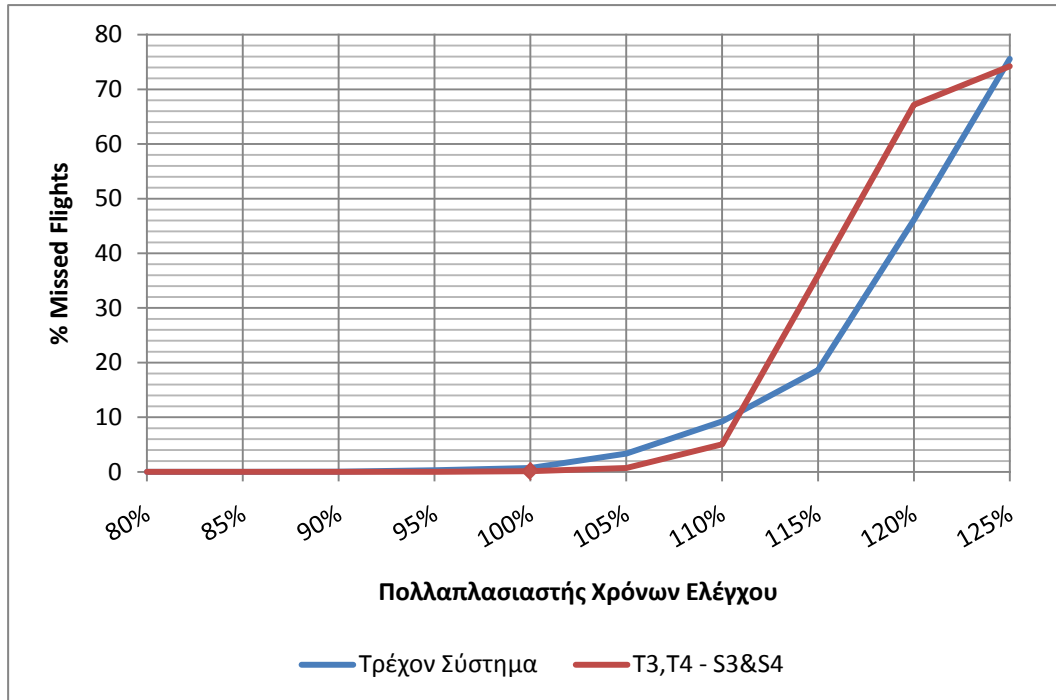
Προκειμένου να εκτιμηθεί η ευελιξία του συστήματος σε τυχόν αλλαγές, δημιουργήθηκε ένα επιπλέον δεδομένο εισόδου το οποίο να επιτρέπει την άμεση αλλαγή των χρόνων ελέγχου. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν πολλαπλασιαστή που μεταβάλλει ποσοστιαία τους εξής χρόνους:

- Precheck Process Time
- People Scan Time
- Bag Scan Time
- Manual Bag Search Time

Ο πολλαπλασιαστής αυτός εφαρμόστηκε στην τρέχουσα αλλά και στη συνιστώμενη μελλοντική διαρρύθμιση σε εύρος 80 – 125%. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα παρακάτω γραφήματα, και αφορούν την επίδραση στους δείκτες Χαμένες Πτήσεις και Άτομα που Εξυπηρετήθηκαν σε λιγότερο από 45 λεπτά. Η μελέτη σε κάθε περίπτωση γίνεται για τις ημέρες MF (Δευτέρα, Παρασκευή), οπότε και η κίνηση επιβατών στο αεροδρόμιο είναι ιδιαίτερα αυξημένη.



Εικόνα 60: Ανάλυση Ευαισθησίας – Χρόνοι Ελέγχου / %Served in 45min

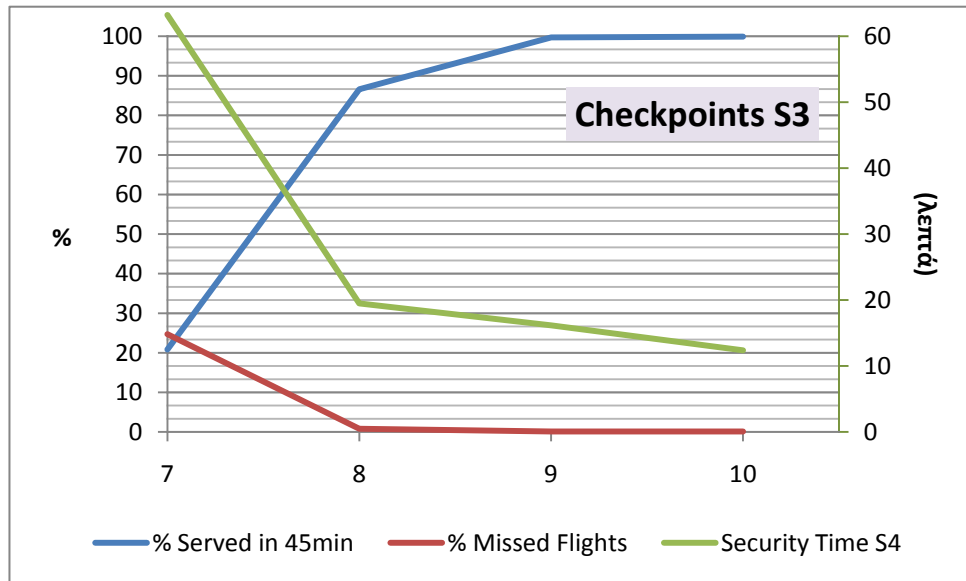


Εικόνα 61: : Ανάλυση Ευαισθησίας – Χρόνοι Ελέγχου / %Missed Flights

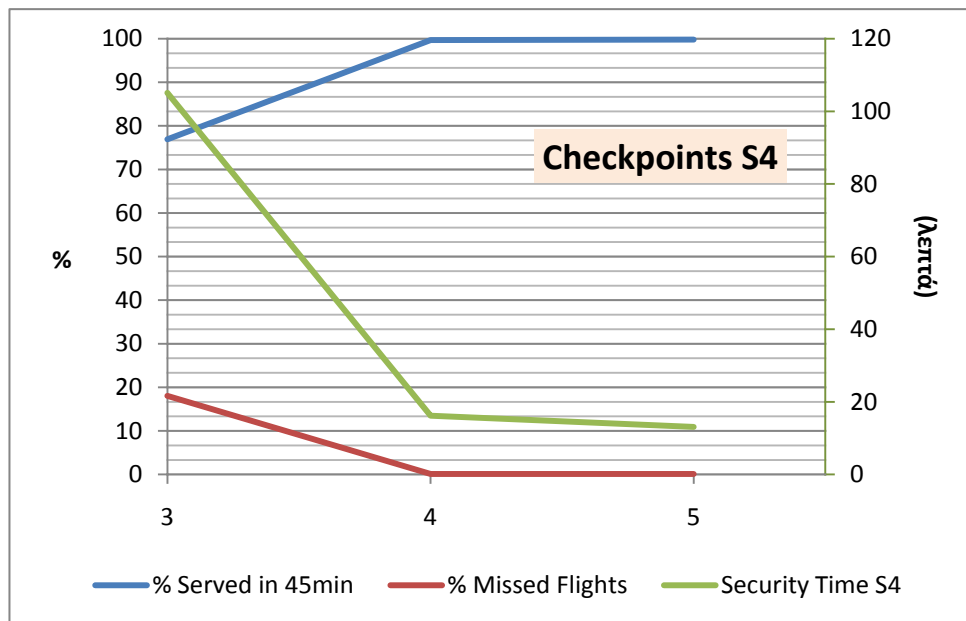
Διαθέσιμοι Πόροι

Αντίστοιχα έγινε και ανάλυση ευαισθησίας για τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος. Εξετάζεται το προτεινόμενο σενάριο λειτουργίας των δύο τερματικών σταθμών T3 - T4, τις ημέρες MF. Μεταβάλλονται διαδοχικά ο αριθμός ενεργών σημείων ελέγχου (security checkpoints), οι υπάλληλοι precheck security και standard security. Ο αριθμός των υπαλλήλων Bag Scan Security θεωρείται σταθερός και ανάλογος του αριθμού των μηχανημάτων Bag Scanners (δύο σε κάθε ένα). Όλοι οι υπόλοιποι πόροι διατηρούνται σταθεροί σε κάθε περίπτωση, ενώ το μοντέλο περιλαμβάνει το βέλτιστο χώρο αναμονής σε κάθε Security Area, όπως προέκυψε από προηγούμενη μελέτη.

Αριθμός Ενεργών Σημείων Ελέγχου



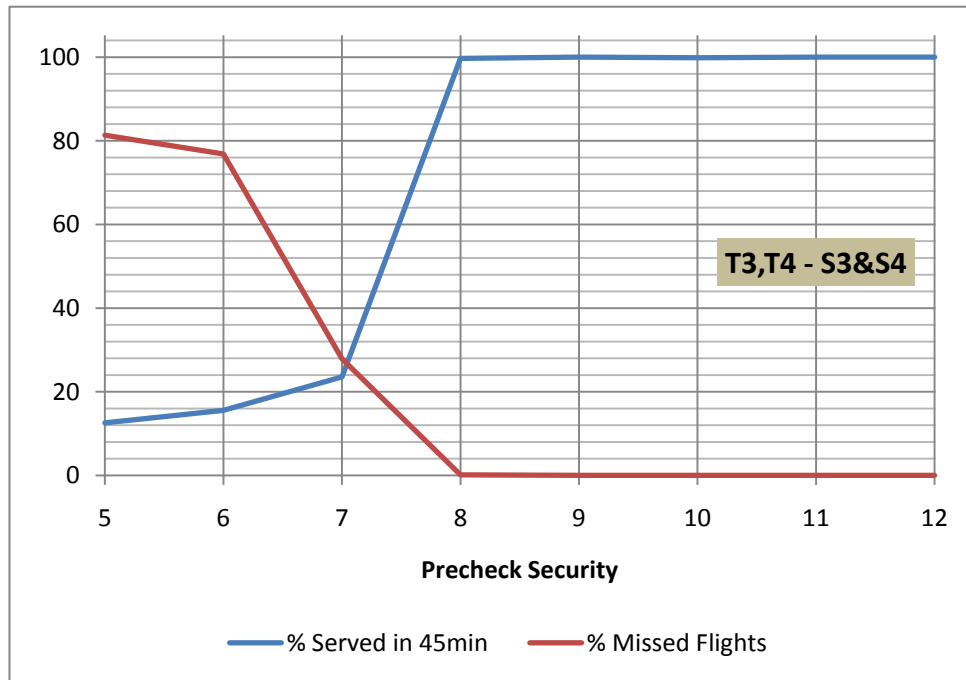
Εικόνα 62: Ανάλυση Ευαισθησίας – Αριθμός Checkpoints S3



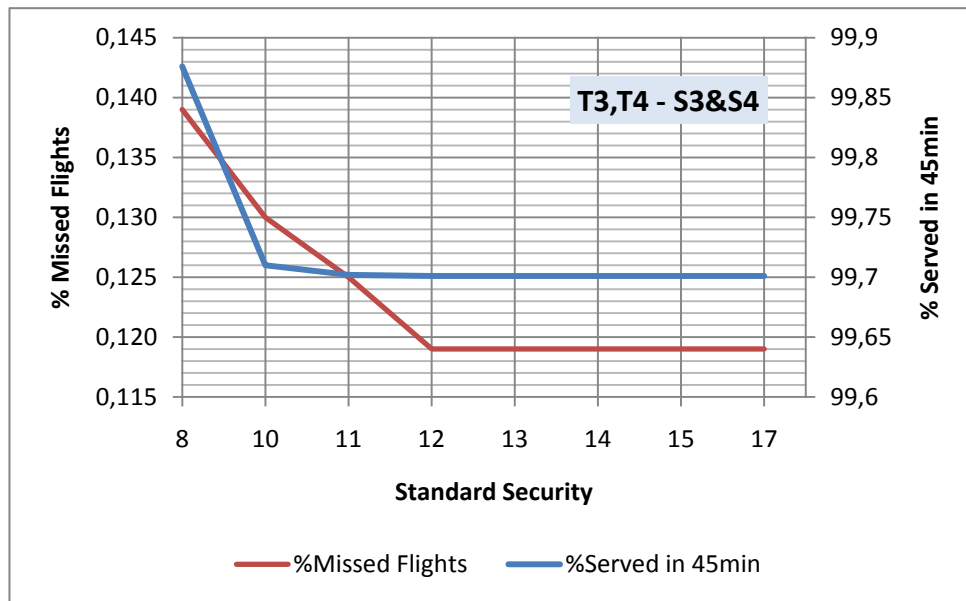
Εικόνα 63: Ανάλυση Ευαισθησίας – Αριθμός Checkpoints S4

Όσον αφορά τα security checkpoints, είναι εμφανής η τεράστια επίδραση που έχει στους δείκτες κάποια μείωση στον αριθμό τους, ιδιαίτερα στην περίπτωση του τερματικού σταθμού T4. Στα παραπάνω διαγράμματα οι δείκτες Missed Flights και Served in 45min απεικονίζονται στον αριστερό κάθετο άξονα (επί τις 100), ενώ ο χρόνος ελέγχου Security Time στο δεξί άξονα (σε λεπτά).

Διαθεσιμότητα Προσωπικού



Εικόνα 64: Ανάλυση Ευαισθησίας – Precheck Security



Εικόνα 65: Ανάλυση Ευαισθησίας – Standard Security

Εξετάζοντας την ευαισθησία ως προς το προσωπικό, είναι ξεκάθαρες οι αρνητικές συνέπειες που προκύπτουν από τη μείωση της δυναμικότητας στη διαδικασία precheck, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη «στένωσης» (bottleneck) του συστήματος και στο σημείο αυτό. Αντίθετα, οι υπάλληλοι standard security δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα τους δείκτες του συστήματος. Αν δεν υπήρχε ο περιορισμός της αντιστοιχίας ενός σε κάθε people scanner θα μπορούσε άνετα να είναι μικρότερος ο αριθμός τους.

Σχόλια – Αποτίμηση

Συνοψίζοντας τη μελέτη αυτή, υπογραμμίζεται για μια ακόμη φορά η ολοκληρωτική υπεροχή του δεύτερου σεναρίου στην περίπτωση επέκτασης του αεροδρομίου, αυτού δηλαδή που προτάσσει τη δημιουργία ξεχωριστού χώρου ασφαλείας (S4) στο νεοσύστατο τερματικό σταθμό Terminal 4. Τόσο στους δείκτες ικανοποίησης του επιβατικού κοινού, όσο και στο κόστος του ελέγχου ανά επιβάτη, η επίδραση της επέκτασης δίχως το άνοιγμα επιπλέον χώρου ελέγχου επιβατών, είναι εμφανώς δυσμενής.

Όσον αφορά σε μελλοντικές αλλαγές στα πρότυπα των ελέγχων ασφαλείας και στις διαδικασίες, υπάρχουν ανοχές στους δείκτες του συστήματος. Αν όμως οι αλλαγές αυτές είναι θεαματικά προς το αυστηρότερο είναι πιθανή η ανάγκη επιπλέον προσωπικού ή και εξοπλισμού για την παράλληλη ικανοποίηση των περιορισμών.

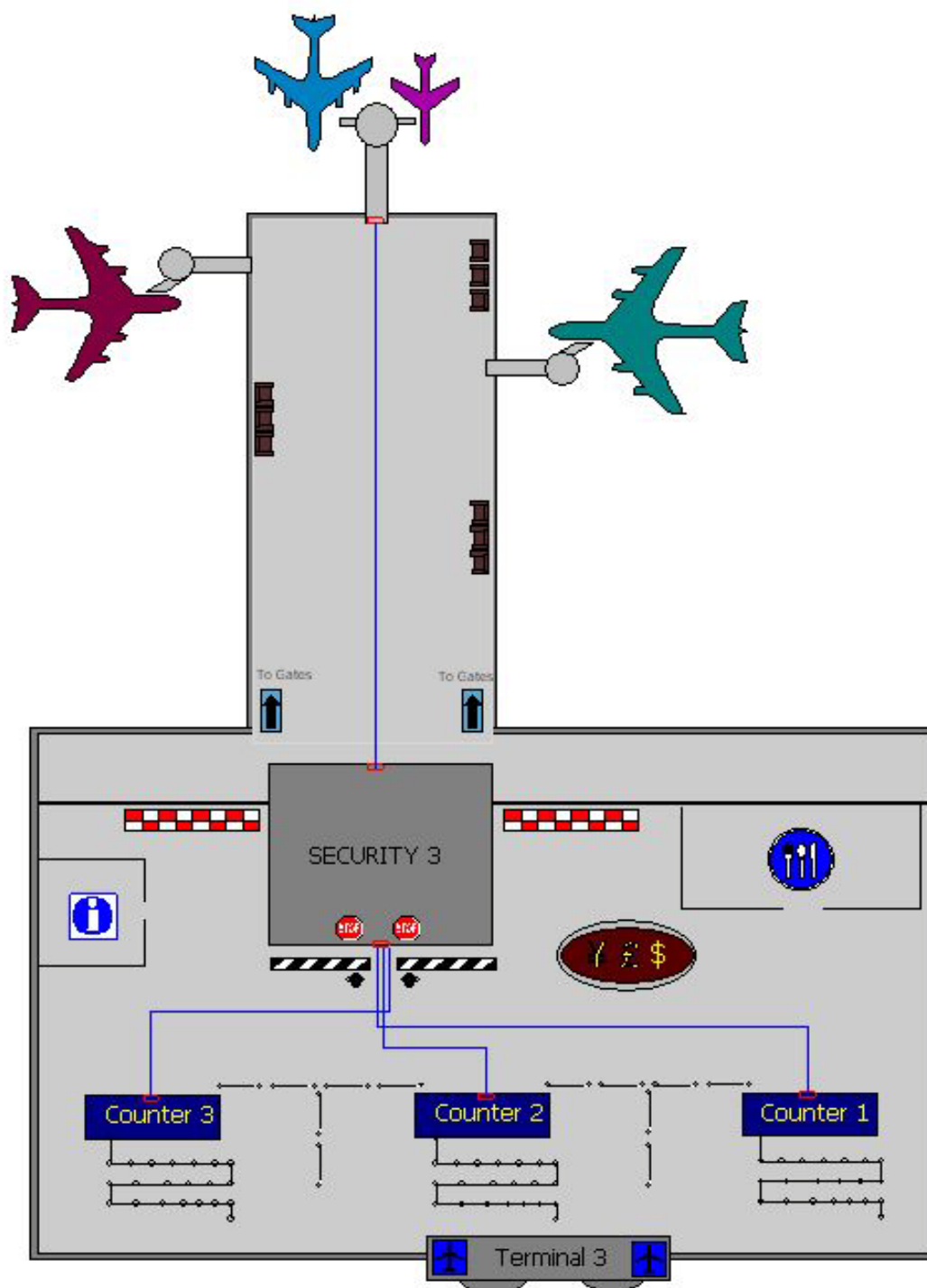
Η ανάλυση της ευαισθησίας του συστήματος έδειξε ότι περαιτέρω αύξηση των πόρων έχει μηδαμινή βελτίωση των δεικτών ικανοποίησης επιβατών. Αντίθετα, μείωση έστω κατά μία μονάδα ενός πόρου έχει συνήθως καταστροφικά αποτελέσματα. Εξαίρεση στην προηγούμενη πρόταση αποτελούν οι τυπικοί ελεγκτές του αεροδρομίου (standard security), των οποίων όμως το πλήθος περιορίζεται ως ίσο με τα μηχανήματα ελέγχου επιβατών.

Τέλος, και αναφορικά με το κοστολογικό κομμάτι της μελέτης, η μελλοντική επέκταση που εξετάζεται θα προσαυξήσει το κόστος λειτουργίας του αεροδρομίου τα επόμενα δύο χρόνια κατά περίπου 35% σε σχέση με το παρόν. Η αύξηση όμως του επιβατικού κοινού κατά 50% συντελεί σε χαμηλότερο τελικά κόστος ανά επιβάτη, και κατ' επέκταση πολύ μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους από πλευράς αεροδρομίου, στην περίπτωση φυσικά που κάτι τέτοιο αποτελεί στόχο της διοίκησης.

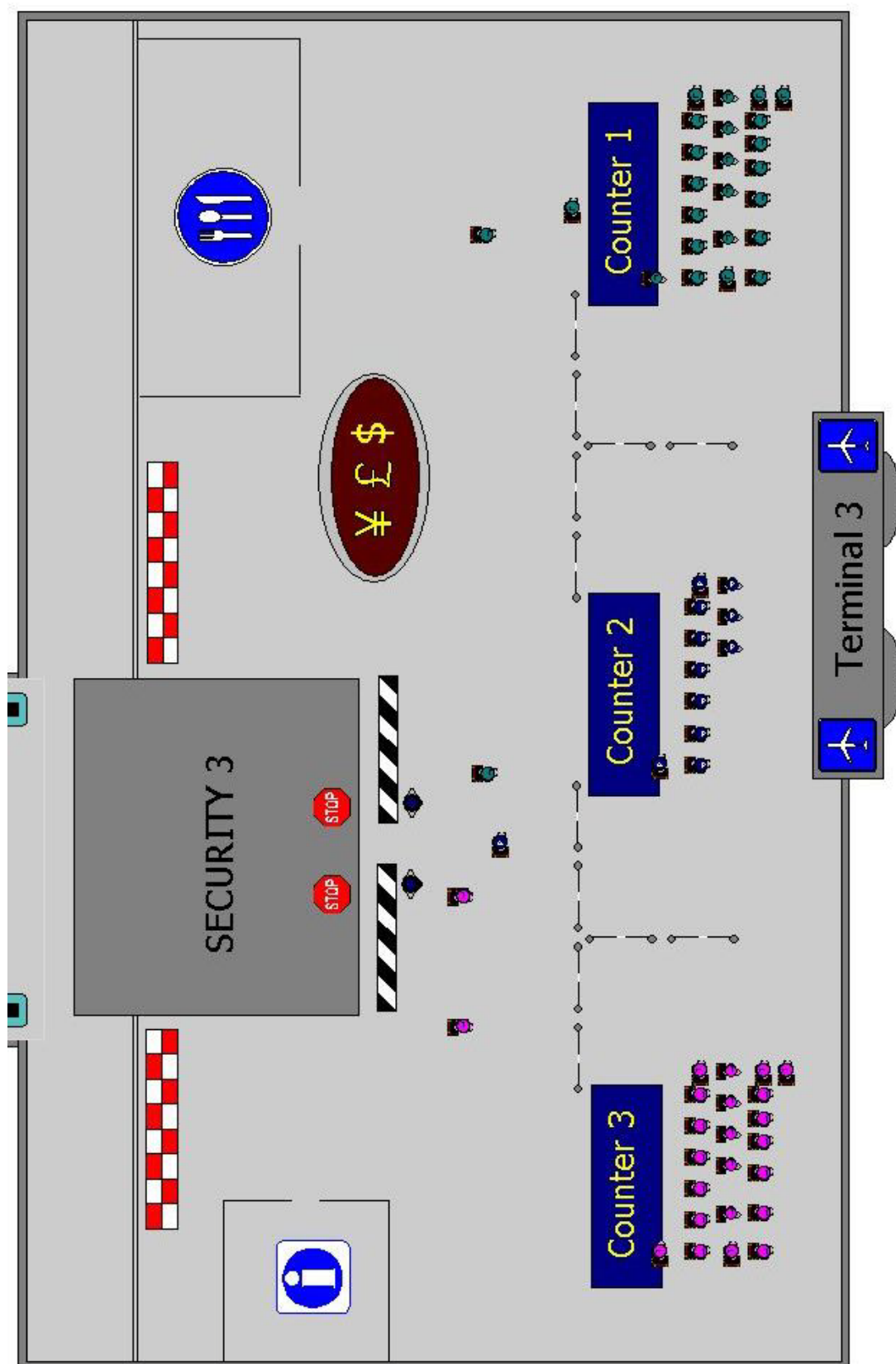
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. Στιγμιότυπα Μοντέλου

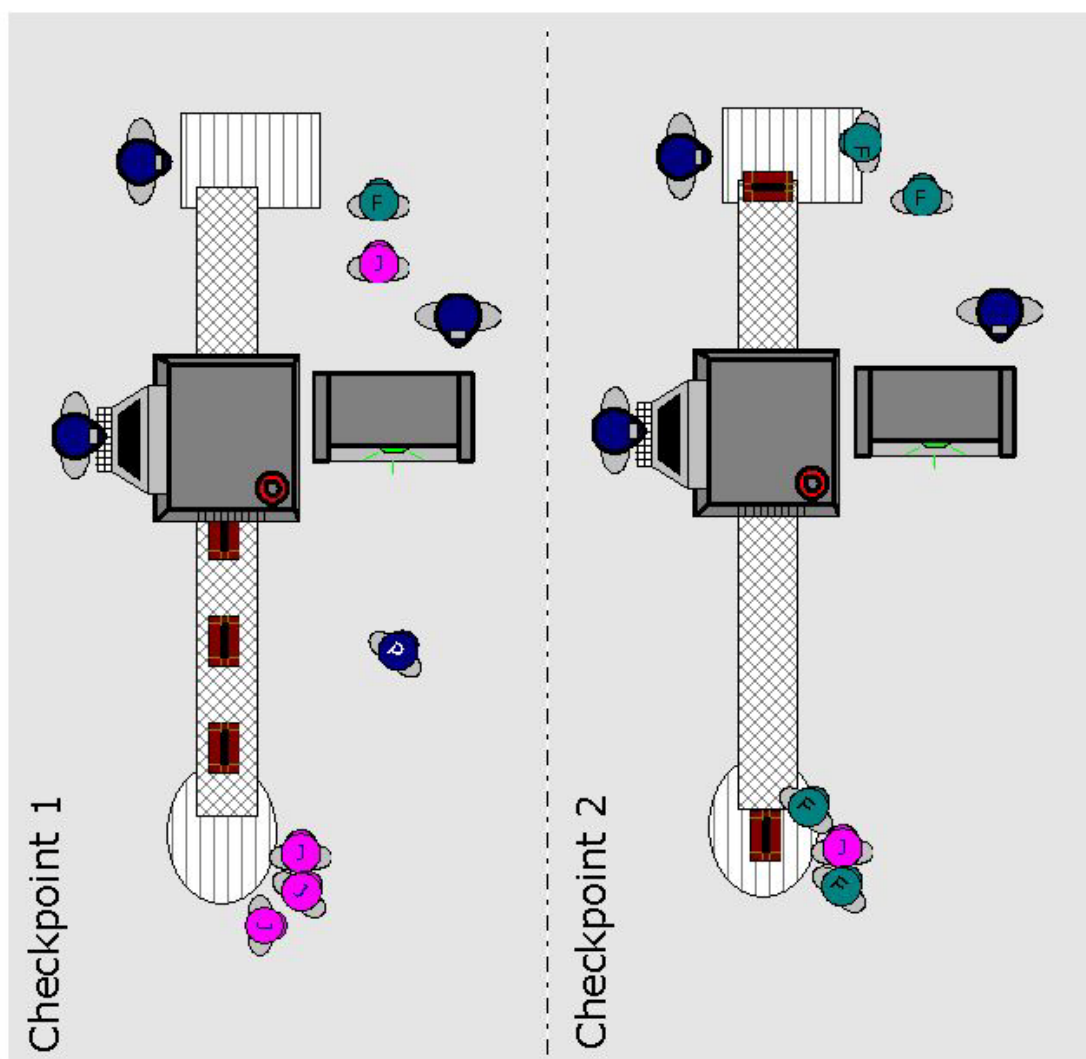
Τρέχουσα Κατάσταση: T3 – S3



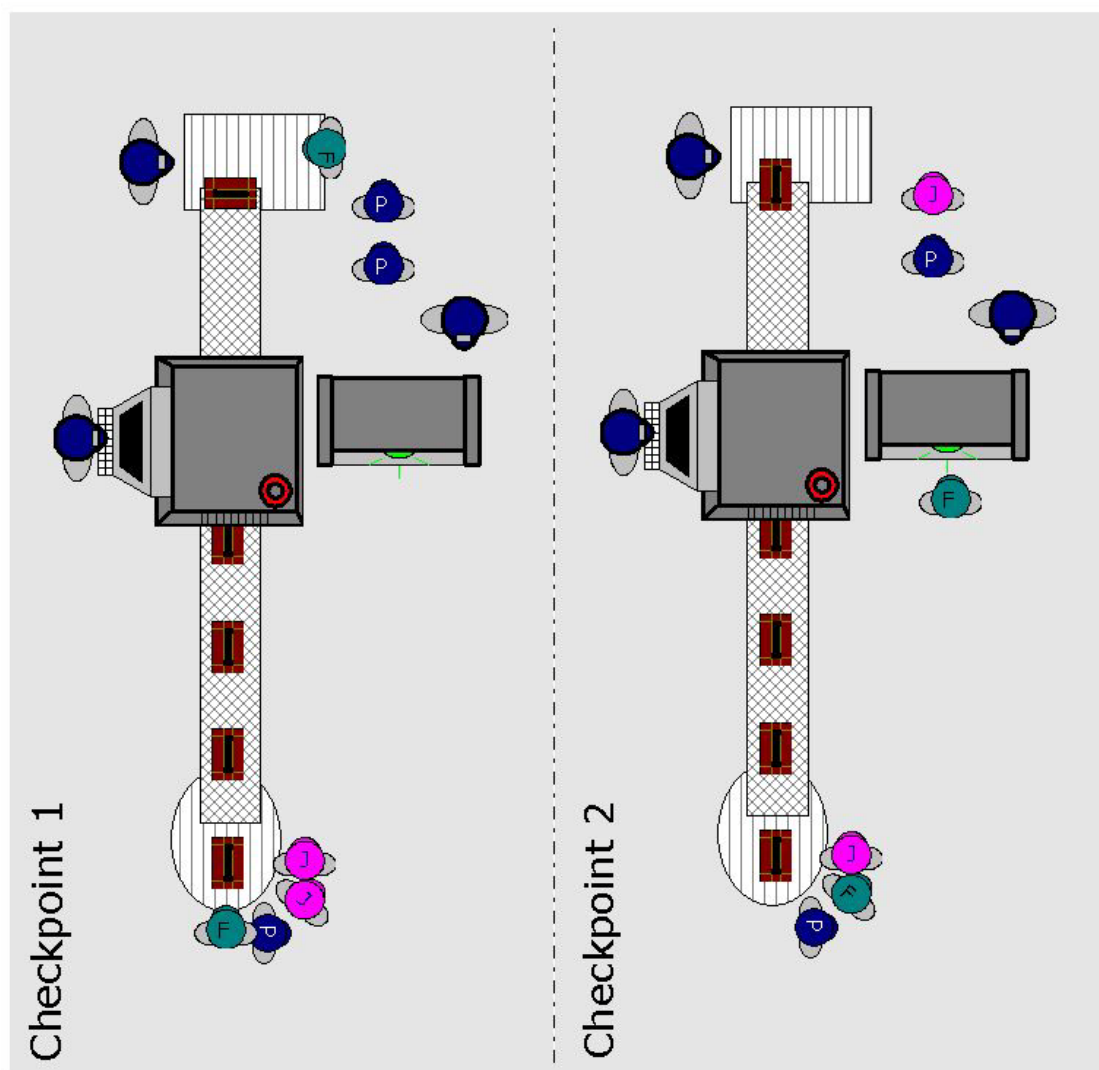
Εικόνα 66: Πανοραμική άποψη αεροδρομίου



Εικόνα 67: Counters και χώρος ασφαλείας εν ώρα «τρεξίματος» του μοντέλου.



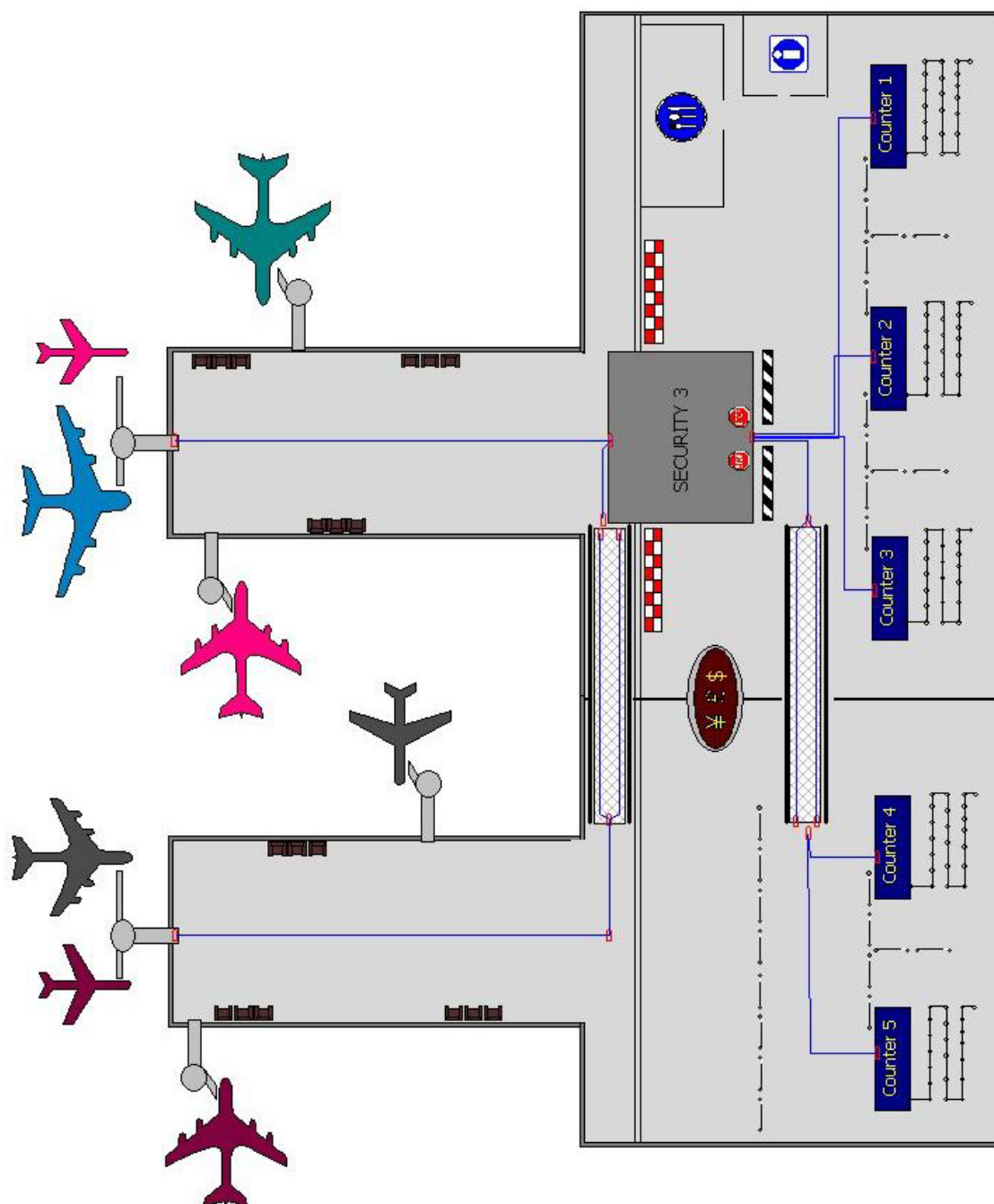
Εικόνα 68: Checkpoints 1&2 εν λειτουργία, ξημερώματα Κυριακής.



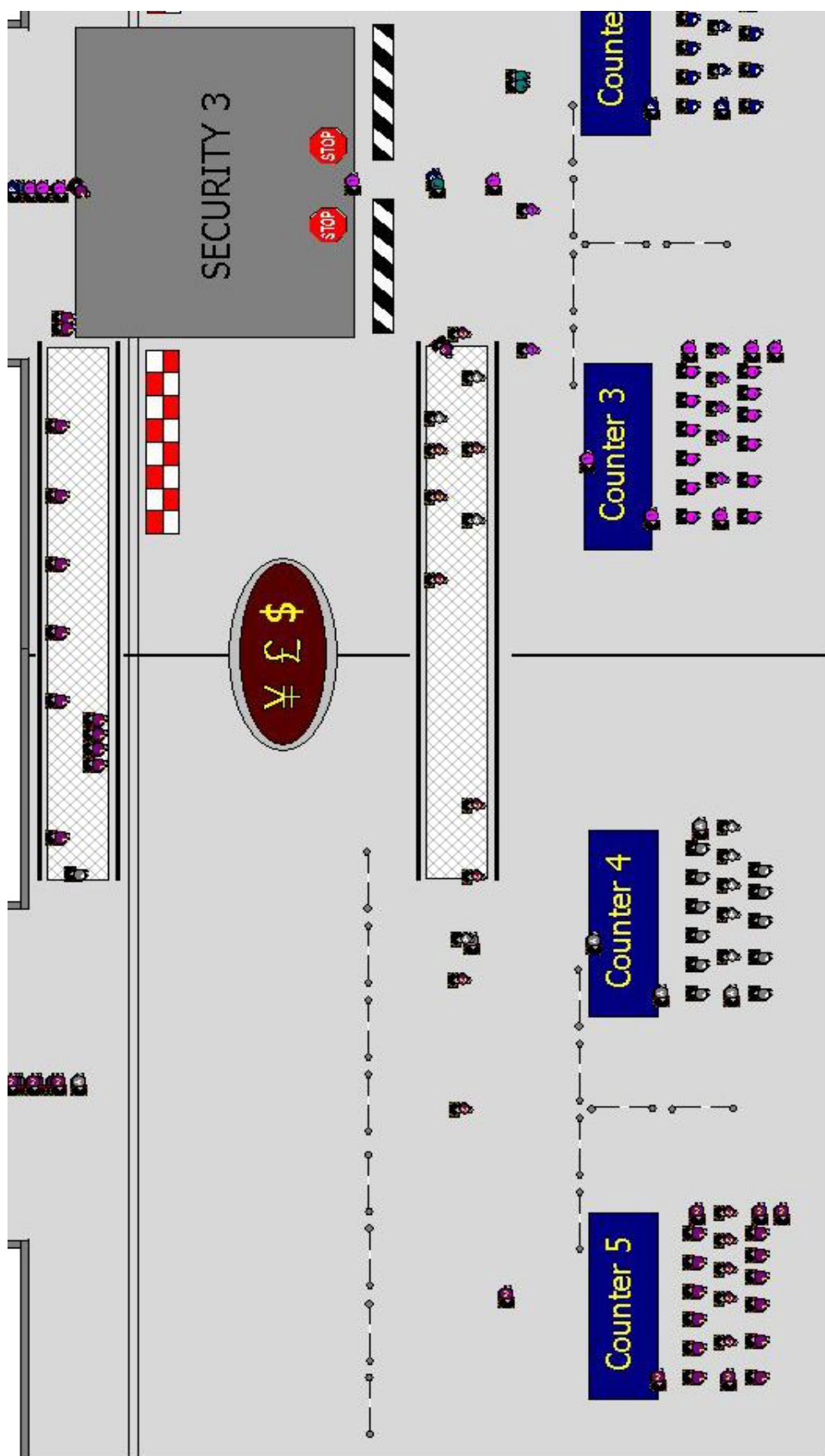
Εικόνα 69: Checkpoints 1&2, απόγευμα Δευτέρας

Σενάρια Μελλοντικής Επέκτασης

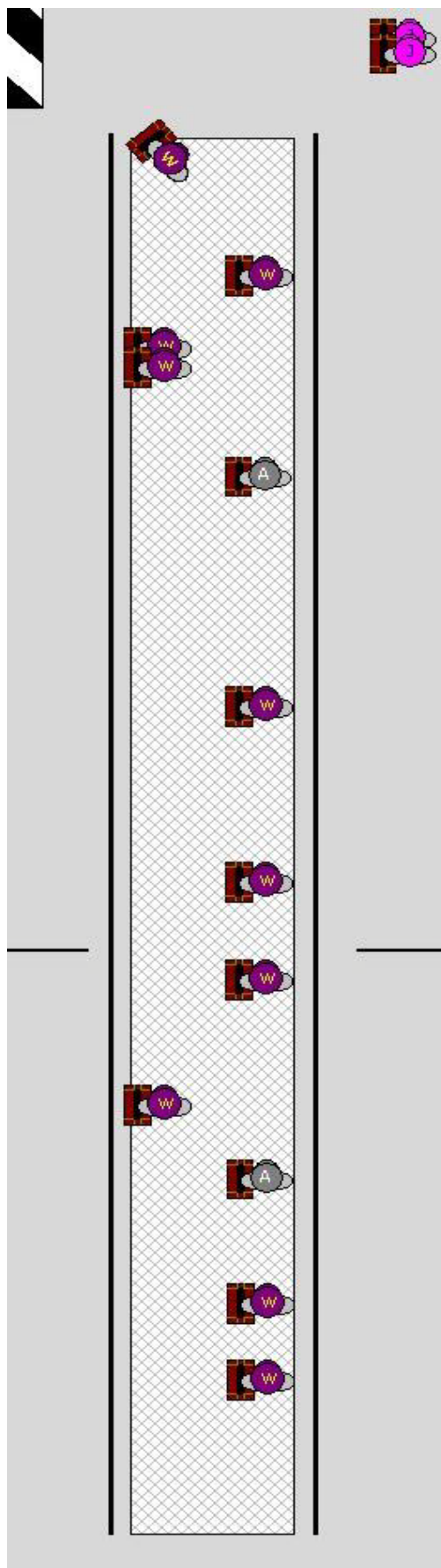
T3, T4 – S3



Εικόνα 70: Κάτοψη αεροδρομίου. Οι επιβάτες όλων των αερογραμμών ελέγχονται στο Security Area 3.

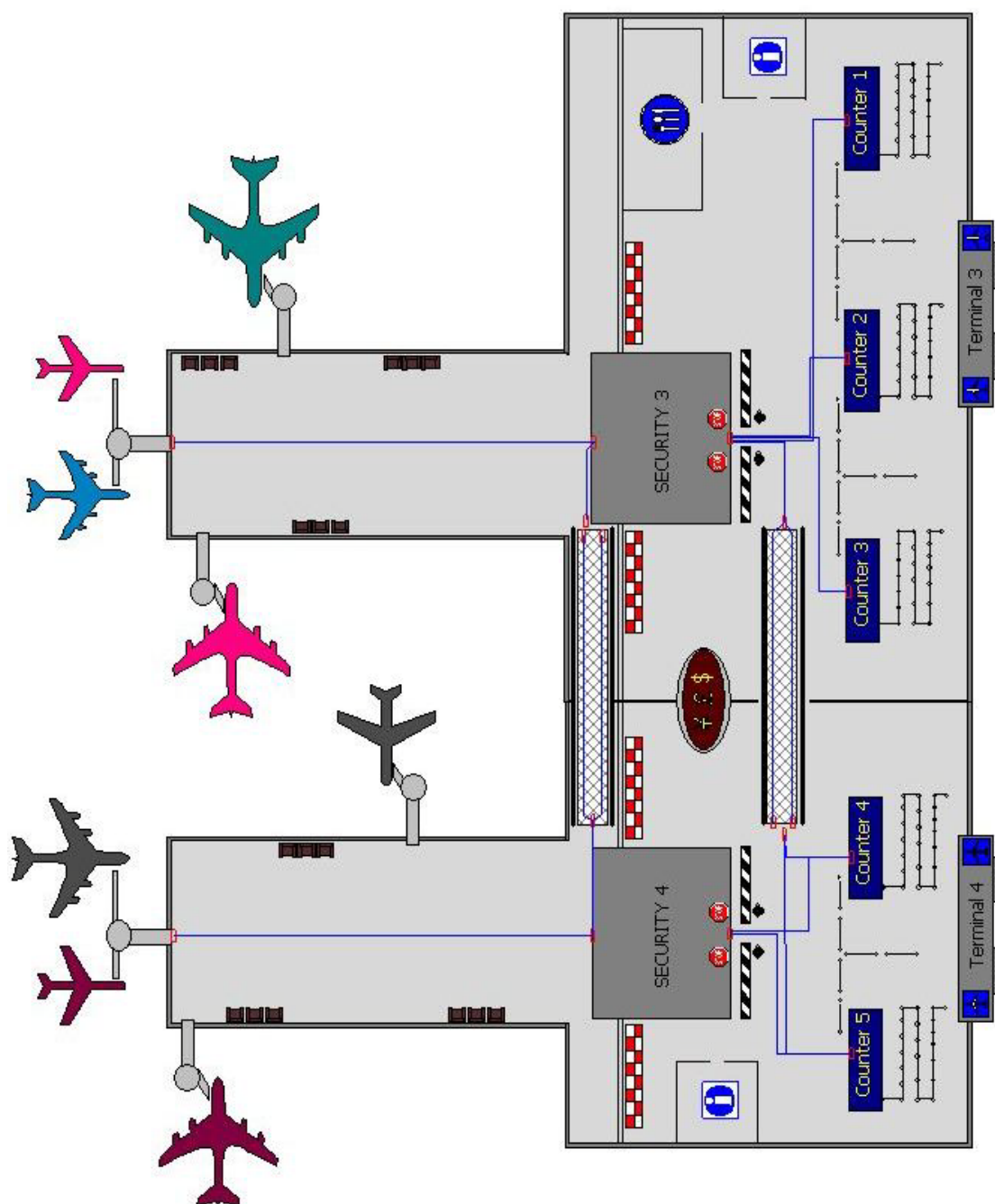


Εικόνα 71: Counters και ο μοναδικός χώρος ασφαλείας, S3

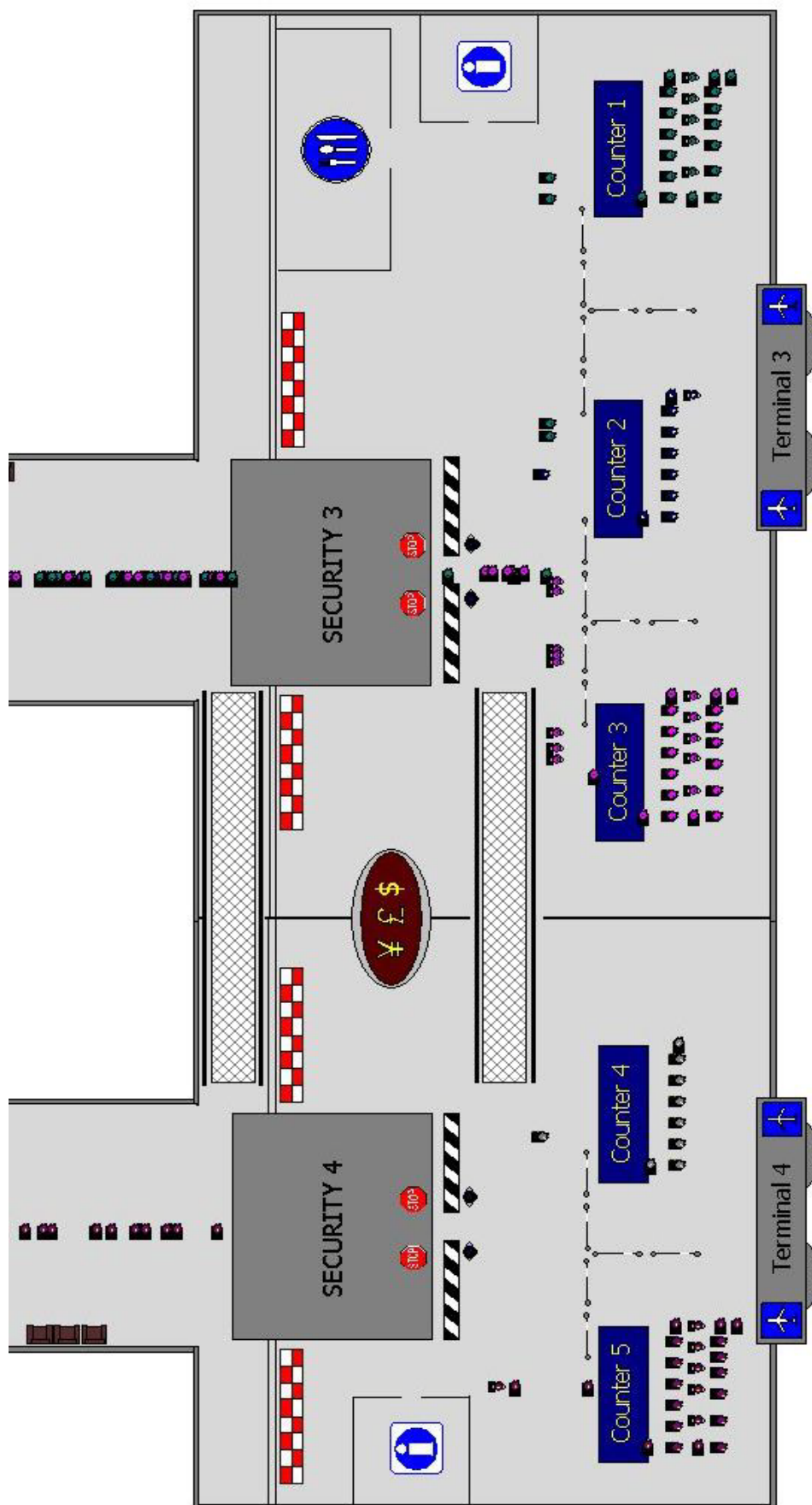


Εικόνα 72: Μετακίνηση επιβατών σε κυλιόμενα πεζοδρόμια

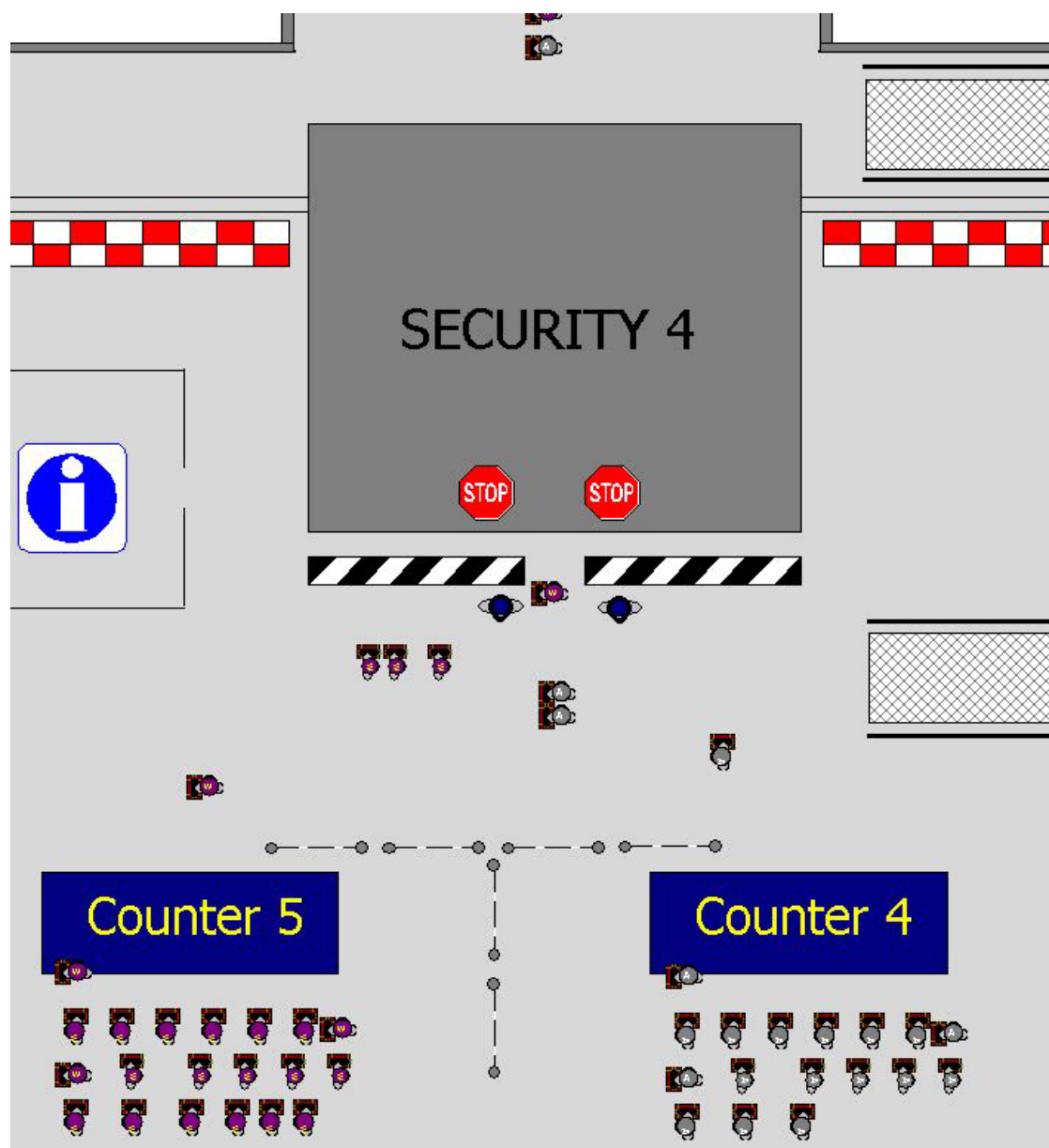
T3, T4 – S3, S4



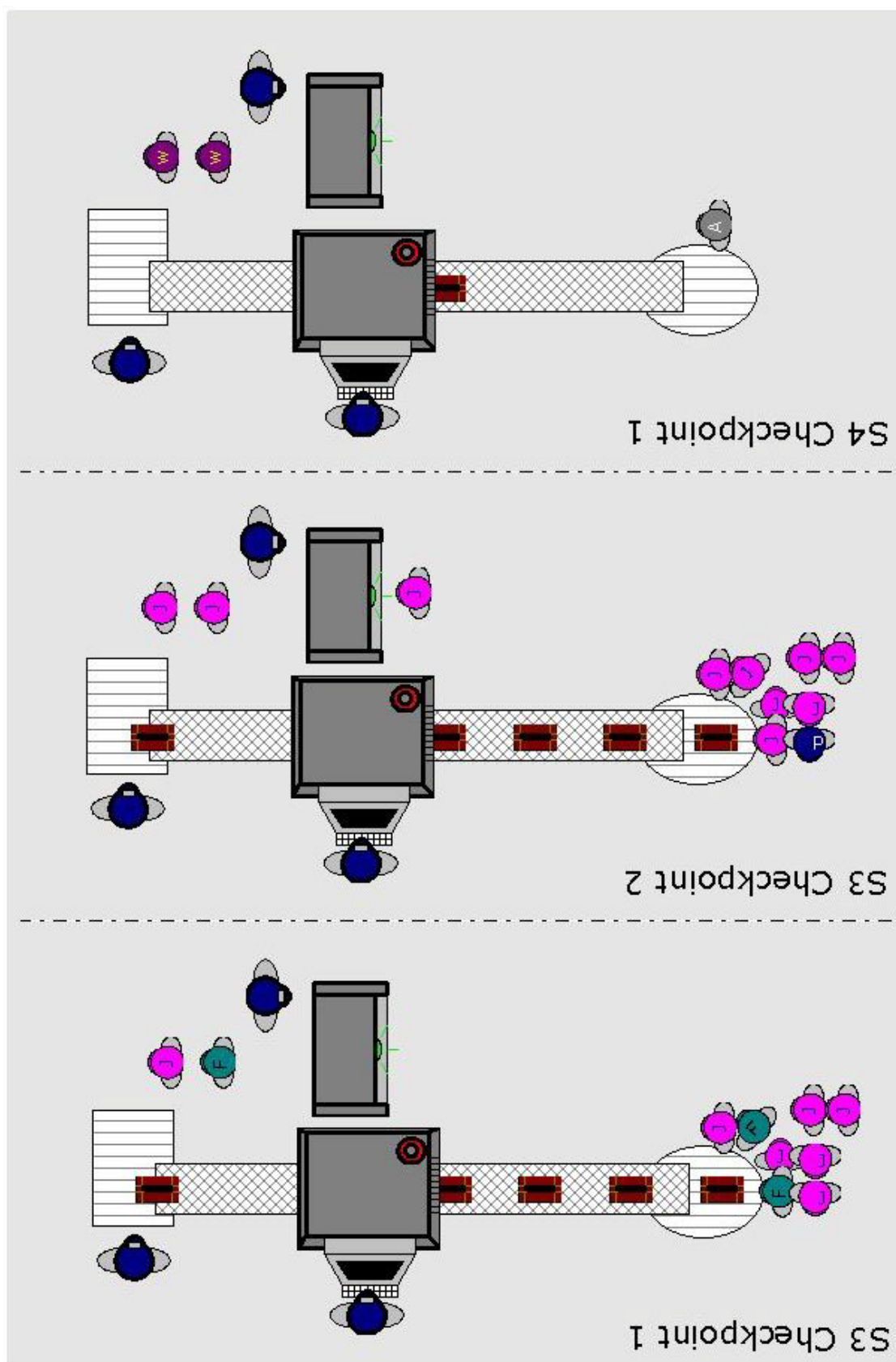
Εικόνα 73: Κάτοψη του συνιστώμενου σεναρίου επέκτασης. Διακρίνονται οι 2 ξεχωριστοί χώροι ελέγχου.



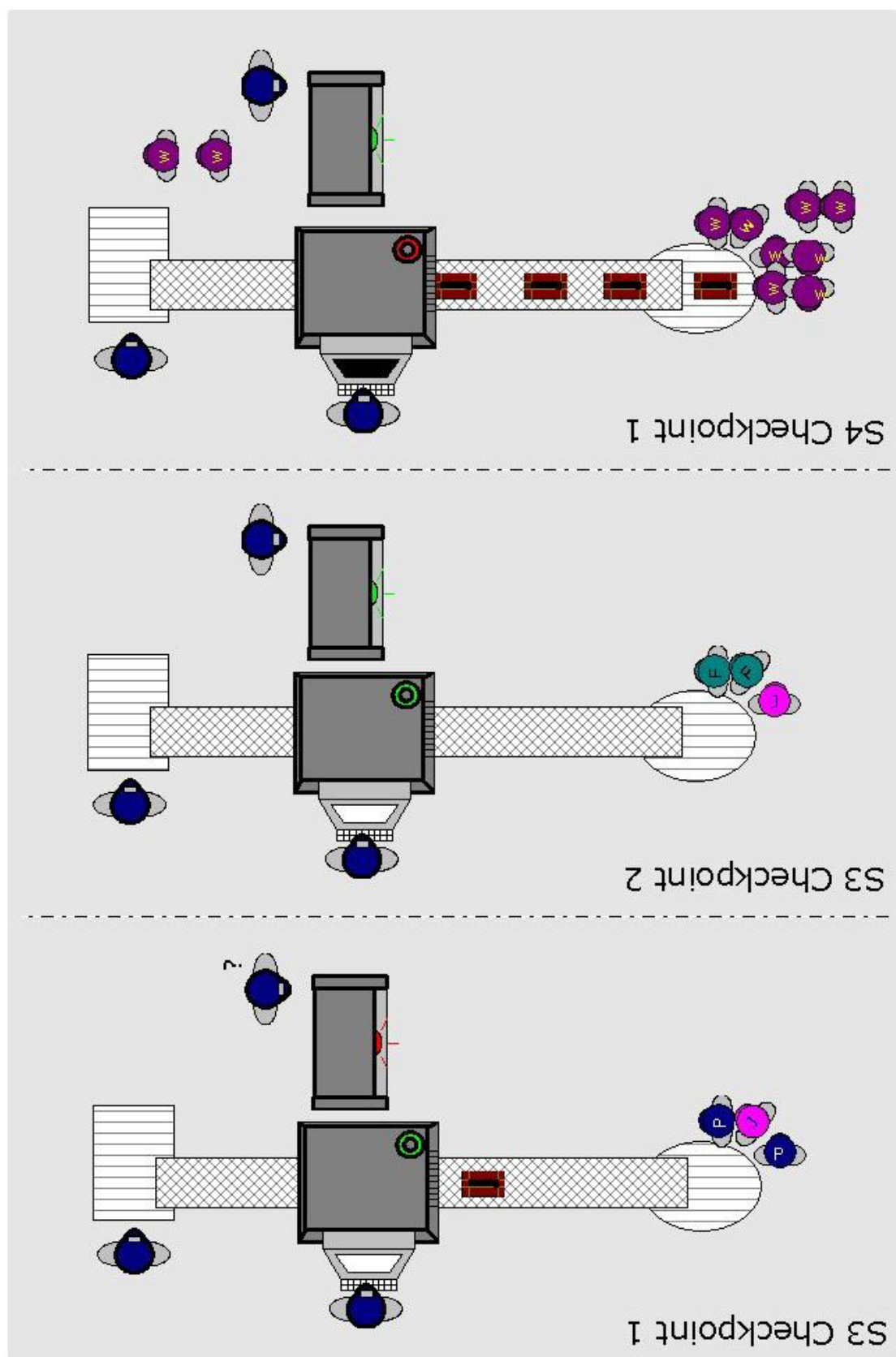
Εικόνα 74: Counters και Security Areas εν ώρα "τρεξίματος" του μοντέλου



Εικόνα 75: Ο νέος χώρος ελέγχου που εξυπηρετεί τους επιβάτες των WW και AA.



Εικόνα 76: Checkpoints 1&2 (S3) και 1 (S4), πρωί Κυριακής



Εικόνα 77: Τα ίδια σημεία ελέγχου, εν ώρα προσομοίωσης, μεσημέρι Πέμπτης.

B. Περιεχόμενα Συνοδευτικού Οπτικού Δίσκου

Ο οπτικός δίσκος CD-ROM που συνοδεύει την παρούσα εργασία περιέχει τα εξής:

- Το παρόν κείμενο σε αρχείο Word (docx). Ανοίγει με Word 2007 και νεότερες εκδόσεις.
- Το παρόν κείμενο σε αρχείο pdf. Ανοίγει με οποιαδήποτε έκδοση του προγράμματος Acrobat Reader.
- Αρχεία βίντεο στα οποία παρίσταται το μοντέλο κατά την εκτέλεσή του.

Όσον αφορά το τελευταίο, χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα καταγραφής σε βίντεο της οθόνης του Η/Υ (screen capturing). Τα αρχεία αυτά είναι σε μορφή «.avi», και επομένως μπορούν να αναπαραχθούν με την πλειοψηφία των προγραμμάτων αναπαραγωγής βίντεο, περιλαμβανομένου του Windows Media Player. Κάθε βίντεο είναι μικρό σε διάρκεια, καταγράφει όμως χαρακτηριστικά σημεία του animation. Διαχωρίζονται σε τρεις φακέλους ανάλογα με το μοντέλο που αναπαριστούν (τρέχουσα κατάσταση και τα δύο μελλοντικά σενάρια).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

Kelton, D. W., Sadowski, R. P., & Swets, N. B. (2010). *Simulation with Arena, Fifth Edition*. McGraw Hill International Edition.

Altiock, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. Academic Press Publications.

Arena Standard Edition's User Guide. (2003). Rockwell Software Inc.

Guneri, A. F., & Seker, S. (2006, February). Decision Making with Arena. Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.

Ελληνική

Ξηρόκωστας, Δ. Α. (1999). *Επιχειρησιακή Έρευνα*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

Ξηρόκωστας, Δ., Πολύζος, Π., & Παπακωνσταντίνου, Ξ. (2005). Προσομοίωση: Σημειώσεις - Ασκήσεις. Στο *Σημειώσεις Επιχειρησιακής Έρευνας II*. Αθήνα: Βοηθήματα Μαθήματος ΕΜΠ.

Φράγκος, Χ. Κ. (2006). Θεωρία Ουρών Αναμονής (Queuing Theory). Στο *Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Έρευνα* (σσ. 273-310). Αθήνα: Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.

Διαδίκτυο

Rockwell Automation. (n.d.). *Arena Simulation*. Ανάκτηση Νοέμβριος 2009, από <http://www.arenasimulation.com/>

Rockwell Automation. (n.d.). *Rockwell Automation US Main Page*. Ανάκτηση Νοέμβριος 2009, από <http://www.rockwellautomation.com/>

FlexSim Software Products Inc. (n.d.). *Flexsim Simulation Software*. Ανάκτηση Απρίλιος 2010, από <http://www.flexsim.com/>

IIE. (n.d.). *Institute of Industrial Engineers*. Ανάκτηση Μάιος 25, 2010, από <http://www.iienet2.org/>

High School Operations Research. (n.d.). *HSOR.ORG*. Ανάκτηση Δεκέμβριος 2009, από <http://www.hsor.org/index.cfm>

SAP. (n.d.). *SAP Business Solutions*. Ανάκτηση Νοέμβριος 2009, από Crystal Reports: <http://www.sap.com/solutions/sapbusinessobjects/sap-crystal-solutions/index.epx>