



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Διερεύνηση εναλλακτικών τεχνικών οργάνωσης του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου

ΕΥΑΝΘΙΑ ΘΑΝΟΥ

Επιβλέπων: **Αθανάσιος Μπαλλής** Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερεύνηση εναλλακτικών τεχνικών οργάνωσης του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου

ΥΠΟ

ΕΥΑΝΘΙΑΣ ΘΑΝΟΥ

Ένας σύγχρονος τερματικός σταθμός κατακόρυφης φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων είναι ένα πολύπλοκο σύστημα με ποικίλες συνιστώσες που αλληλεπιδρούν. Αποτελείται από ποικίλους τύπους εξοπλισμού που εκτελούν τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης, μεταφοράς και στοιβάξης που απαιτούν συγχρονισμό. Η σημαντικότητα των διαδικασιών μεταφοράς στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσεως πηγάζει από το γεγονός ότι τυχόν καθυστερήσεις στο υπόψη υποσύστημα επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση όλου του συστήματος στη θαλάσσια πλευρά.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιεί διερεύνηση εναλλακτικών τεχνικών οργάνωσης του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαία χώρου με χρήση της μεθόδου προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης Arena και αναπτύσσονται μοντέλα που αναπαριστούν διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης πλοίων. Αξιολογούνται οι διαφορετικές τεχνικές οργάνωσης του υποσυστήματος σε διάφορα σενάρια και ορίζεται η αποτελεσματικότερη στρατηγική η οποία θα ολοκληρώνει τις εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων σε μικρότερη χρόνο υπό προϋποθέσεις.

ABSTRACT

Investigation of alternative organizational techniques of the containers' movement subsystem from quay to storage area

A Lo-Lo container terminal is a complex system with various interrelated components. By default, Lo-Lo container systems are based on equipment that performs handling (loading and unloading), transfer or stacking operations that require synchronization. The importance of the quay-to-storage transfer operations stems from the fact that any inefficiency in “feeding the hook” of a quay crane affects negatively the performance of the whole sea-side operation.

The present dissertation conducts an investigation of the alternative organizational techniques as well as the one of the containers' movement subsystem from quay to storage area, using the simulation approach. Arena software has been used while models of ship loading and unloading procedures are developed. Different organization techniques of the subsystem have been assessed in various scenarios, while the most effective strategy has been defined which will complete the loading and unloading ship procedure minimizing the time needed under certain pre conditions.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΛΙΜΕΝΕΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	16
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	19
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΛΙΜΕΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	19
2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ.....	25
2.2.1 Σχεδιασμός και λειτουργία θαλάσσιας πλευράς.....	27
2.2.2 Μεταφορά ε/κ μεταξύ κρηπιδώματος και χώρων στοιβασίας	32
2.2.3 Σχεδιασμός και λειτουργία χερσαίας πλευράς	33
2.3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΣΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΚΡΗΠΙΔΩΜΑΤΟΣ – ΧΩΡΟΣ ΣΤΟΙΒΑΣΙΑΣ	35
2.3.1 Τύποι και εναλλακτικές διαμορφώσεις του εξοπλισμού μεταξύ κρηπιδώματος και χώρου στοιβασίας.....	35
2.3.2 Πλάνο φόρτωσης/εκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων και ανάθεσης εξοπλισμού	41
2.3.3 Επισκόπηση των δημοσιευμένων εργασιών που μελετούν το υποσύστημα κρηπίδωμα-χώρος στοιβασίας.....	49
2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARENA	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARENA.....	56
3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	56
3.1.1 Λογισμικό προσομοίωσης Arena	58
3.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ/ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	86
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	86
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ.....	88
4.2.1 Σενάριο 1 ^ο – Σταθερή ανάθεση οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες	88
4.2.2 Σενάριο 2 ^ο – Ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες.....	91

4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	94
4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	95
4.3.1 Σενάριο 3 ^ο – Σταθερή ανάθεση οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες	95
4.3.2 Σενάριο 4 ^ο – Ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες	98
4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	101
4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	103
4.4.1 Σενάριο 5 ^ο – Σταθερή ανάθεση με αποκλίσεις στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς	103
4.4.2 Σενάριο 6 ^ο – Ανάθεση ομάδας με αποκλίσεις στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς	105
4.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	107
4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	109
4.6 ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ..	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	124
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Το σύστημα των εμπορευματοκιβωτίων	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Θεωρία αναμονής	137
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων προσομοίωσης Arena μέσω σύγκρισης με αναλυτική αριθμητική επίλυση	148
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Έλεγχος προσομοιωτικής διαδικασίας για την κατανομή εργασιών στα οχήματα μεταφοράς	154
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε – Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων προσομοίωσης Arena μέσω σύγκρισης με αντίστοιχο παράδειγμα στη δημοσιευμένη εργασία του Frankel ^[42]	191
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ – Ενδεικτικοί πίνακες των μοντέλων υπολογισμού χρόνων κύκλου των οχημάτων μεταφοράς για διάφορες περιπτώσεις διαμόρφωσης του χώρου στοιβασίας για τις πρώτες 50 τιμές	194
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ – Αναλυτική περιγραφή των λειτουργικών μονάδων των μοντέλων για τα σενάρια 3 και 4	198

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. 1: Περιοχές λειτουργιών ενός τερματικού σταθμού ε/κ και ροή των μεταφορών. Πηγή: [83]	12
Σχήμα 2. 1: Εύρεση απαιτούμενων ημερών παραβολής/έτος. Πηγή: [91]	28
Σχήμα 2. 2: Εύρεση απαιτούμενου αριθμού θέσεων παραβολής. Πηγή: [91].....	28
Σχήμα 2. 3: Εύρεση απαιτούμενης έκτασης εναπόθεσης και στοιβασίας σε εκτάρια. Πηγή: [91].....	29
Σχήμα 2. 4: Απαιτούμενες αναδιατάξεις ώστε να πραγματοποιηθεί η παραλαβή των ε/κ E1 και E2. Πηγή: [19]	38
Σχήμα 2. 6: Πιθανότητα 0,1,2 αναδιατάξεων υπερκείμενων ε/κ για στοίβα με 10 θέσεις εναπόθεσης και μέγιστο ύψος στοιβασίας 3 ε/κ. Πηγή: [73]	40
Σχήμα 2. 5: Πιθανότητα εμφάνισης 0,1,2,3 ε/κ σε οποιαδήποτε θέση εναπόθεσης. Πηγή: [73].....	40
Σχήμα 3. 1: Σχηματική παράσταση της μεθοδολογίας προσομοίωσης. Πηγή: [24]	56
Σχήμα 3. 2: Στάδια ανάλυσης συστήματος. Πηγή: [24].....	56
Σχήμα 4. 1: Χρόνοι ολοκλήρωσης εργασιών εκφόρτωσης για τις στρατηγικές της σταθερής ανάθεσης και της ανάθεσης ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες.	94
Σχήμα 4. 2: Κρίσιμη απόσταση χώρων στοιβασίας πέραν της οποίας η σταθερή ανάθεση οχημάτων είναι πιο αποτελεσματική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων.	102
Σχήμα 4. 3: Μεταβολή χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων και αποστάσεων των χώρων στοιβασίας για τη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης.....	107
Σχήμα 4. 4: Μεταβολή χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων και αποστάσεων των χώρων στοιβασίας για τη στρατηγική της ανάθεσης ομάδας	108
Σχήμα 4. 5: Μεταβολή χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών για τις δύο στρατηγικές και κρίσιμες αποστάσεις για κάθε περίπτωση	108
Σχήμα 4. 6: Απαιτούμενες αναδιατάξεις ώστε να πραγματοποιηθεί η παραλαβή των ε/κ E1 και E2. Πηγή: [19]	110
Σχήμα 4. 7: Εύρεση τυπικής απόκλισης σε σχέση με το μέσο ύψος στοιβασίας	120
Σχήμα B- 1: Σύστημα αναμονής ενός σταθμού εξυπηρέτησης. Πηγή: [20]	137
Σχήμα B- 2: Σύστημα αναμονής πολλών παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης. Πηγή: [20].....	138

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2. 1: Τύποι συνήθων μαθηματικών μοντέλων. Πηγή: [16]	19
Πίνακας 3. 1: Μοντέλο M/M/1, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.....	75
Πίνακας 3. 2: Μοντέλο M/M/2, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.	77
Πίνακας 3. 3: Μοντέλο $E_2/M/1$, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.	79
Πίνακας 3. 4: Μοντέλο $M/E_2/2$, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.	81
Πίνακας 3. 5: Μοντέλο $E_2/E_2/1$, σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής επίλυσης με τύπους θεωρίας αναμονής με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena. ...	83
Πίνακας 3. 6: Μοντέλο $E_2/E_2/2$, σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής επίλυσης με τύπους θεωρίας αναμονής με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena. ...	85
Πίνακας 4. 1: Χρόνοι ολοκλήρωσης των διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης, για τις δύο στρατηγικές ανάθεσης εργασιών και για διάφορες τιμές αποστάσεων των χώρων στοιβασίας.....	102
Πίνακας 4. 2: Χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων στην στρατηγική της σταθερής ανάθεσης.....	104
Πίνακας 4. 3: Χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων και αποστάσεων στην στρατηγική ανάθεσης ομάδας	106
Πίνακας 4. 4: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1 ^η περίπτωση	113
Πίνακας 4. 5: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1 ^η περίπτωση	115
Πίνακας 4. 6: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1 ^η περίπτωση	117
Πίνακας 4. 7: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1 ^η περίπτωση	119
Πίνακας B- 1: Συμβολισμός των συστημάτων αναμονής. Πηγή: [55].....	140
Πίνακας B- 2: Τύποι μοντέλων Πουασσόν και μη Πουασσόν.....	142
Πίνακας ΣΤ. 1: Περίπτωση 1 με μέσο ύψος στοιβασίας 1.....	194
Πίνακας ΣΤ. 2: Περίπτωση 2 με μέσο ύψος στοιβασίας 1,5	195
Πίνακας ΣΤ. 3: Περίπτωση 3 με μέσο ύψος στοιβασίας 2.....	196
Πίνακας ΣΤ. 4: Περίπτωση 4 με μέσο ύψος στοιβασίας 2,5	197

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. 1: Εξέλιξη διεθνούς θαλάσσιου εμπορίου για την περίοδο 1980-2013. Πηγή: [92].....	1
Εικόνα 1. 2: Εξέλιξη των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Πηγή: [18].....	4
Εικόνα 1. 3: Τύποι γερανογεφυρών κρηπιδώματος. Πηγή: [3].....	5
Εικόνα 1. 4: (α) Γερανογέφυρα με μονό βαγονέτο (β) Γερανογέφυρα με διπλό βαγονέτο. Πηγή: [31]	6
Εικόνα 1. 5: Ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις. Πηγή: [6].....	7
Εικόνα 1. 6: Ελκυστήρας με δυνατότητα ρυμούλκησης πολλών τρέιλερ. Πηγή: [2].....	8
Εικόνα 1. 7: Οχήματα πλαίσια. Πηγή: [6]	8
Εικόνα 1. 8: Αυτόματα οχήματα μεταφοράς. Πηγή: [10]	9
Εικόνα 1. 9: Αυτόματα οχήματα ανύψωσης. Πηγή: [10]	9
Εικόνα 1. 10: Περονοφόρο ανυψωτικό όχημα. Πηγή: [6]	10
Εικόνα 1. 11: Όχημα εμπρόσθιας στοιβασίας. Πηγή: [6].....	10
Εικόνα 1. 12: Γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών. Πηγή: [7]	11
Εικόνα 1. 13: Γερανογέφυρες επί ελαστικών τροχών. Πηγή: [7]	11
Εικόνα 1. 14: Σχέδιο τερματικού σταθμού μεταφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων. Πηγή: [74].....	13
Εικόνα 1. 15: Τυπικές διατάξεις χώρου στοιβασίας εμπορευματοκιβωτίων. Πηγή: [15]	14
Εικόνα 2. 1: Σύστημα αναμονής ενός σταθμού εξυπηρέτησης. Πηγή: [20].....	22
Εικόνα 2. 2: Βασικά προβλήματα λιμενικών εγκαταστάσεων. Πηγή: [29].....	26
Εικόνα 2. 3: Επισκόπηση των προσεγγίσεων για το σχεδιασμό και τη λειτουργία λιμενικών εγκαταστάσεων. Πηγή: [29].....	34
Εικόνα 2. 4: Σύγκριση των λειτουργιών μονού και διπλού κύκλου. Πηγή: [97].....	42
Εικόνα 2. 5: Εναλλακτικές εργασίες ενός οχήματος μεταφοράς κατά τη διαδικασία φόρτωσης/εκφόρτωσης ενός πλοίου. Πηγή: [30].....	44
Εικόνα 3. 1: Κεντρική οθόνη του προγράμματος Arena.....	58
Εικόνα 3. 2: Κατασκευή μοντέλου M/M/1	74
Εικόνα 3. 3: Κατασκευή μοντέλου M/M/2	76
Εικόνα 3. 4: Κατασκευή μοντέλου $E_2/M/1$	78
Εικόνα 3. 5: Κατασκευή μοντέλου $M/E_2/2$	80
Εικόνα 3. 6: Κατασκευή μοντέλου $E_2/E_2/1$	82
Εικόνα 3. 7: Κατασκευή μοντέλου $E_2/E_2/2$	84

Εικόνα 4. 1: Σενάριο 1 ^ο – Σταθερή ανάθεση οχημάτων σε διαδικασίες εκφόρτωσης.....	88
Εικόνα 4. 2: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 1 ^ο Σενάριο.....	89
Εικόνα 4. 3: Διάγραμμα ροής 1 ^{ου} Σεναρίου.	90
Εικόνα 4. 4: Σενάριο 2 ^ο – Ανάθεση ομάδας οχημάτων σε διαδικασίες εκφόρτωσης.	92
Εικόνα 4. 5: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 2 ^ο σενάριο.....	92
Εικόνα 4. 6: Διάγραμμα ροής για το 2 ^ο σενάριο.....	93
Εικόνα 4. 7: Σενάριο 1 ^ο – Σταθερή ανάθεση.....	95
Εικόνα 4. 8: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 3 ^ο σενάριο.....	96
Εικόνα 4. 9: Διάγραμμα ροής για το Σενάριο 3	97
Εικόνα 4. 10: Σενάριο 2 ^ο – Ανάθεση ομάδας.....	98
Εικόνα 4. 11: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 4 ^ο σενάριο.....	99
Εικόνα 4. 12: Διάγραμμα ροής για το Σενάριο 4	100
Εικόνα 4. 13: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών (Σενάριο 5 ^ο)	103
Εικόνα 4. 14: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς (Σενάριο 5 ^ο)..	104
Εικόνα 4. 15: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών (Σενάριο 6 ^ο)	105
Εικόνα 4. 16: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς (Σενάριο 6 ^ο)..	105
Εικόνα Α- 1: Εμπορευματοκιβώτιο υγρού χύδην φορτίου. Πηγή: [11]	135
Εικόνα Α- 2: Εμπορευματοκιβώτιο γενικού σκοπού. Πηγή: [11]	135
Εικόνα Α- 3: Εμπορευματοκιβώτιο ανοιχτής οροφής. Πηγή: [11].....	135
Εικόνα Α- 4: Παγκόσμιος στόλος από τους κύριους τύπους πλοίων, 1980-2014 (σε ποσοστό dwt). Πηγή: [92]	136
Εικόνα Γ- 1: Χρονική στιγμή $t=0$ (Σενάριο ελέγχου #1).....	148
Εικόνα Γ- 2: Χρονική στιγμή $t=13\text{min}$ και 52sec κατά την οποία ολοκληρώθηκε η εξυπηρέτηση των 10 εμπορευματοκιβωτίων (τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας).	149
Εικόνα Γ- 3: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #1)	149
Εικόνα Γ- 4: Χρονική στιγμή $t=0$ (Σενάριο ελέγχου #2).....	151
Εικόνα Γ- 5: Χρονική στιγμή $t= 14\text{min}$ και 12sec κατά την οποία ολοκληρώθηκε η εξυπηρέτηση των 10 εμπορευματοκιβωτίων (τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας).	151
Εικόνα Γ- 6: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #2)	152
Εικόνα Δ- 1: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #3).....	156
Εικόνα Δ- 2: Χρονική στιγμή $t_1=0$ (Σενάριο ελέγχου #3	156
Εικόνα Δ- 3: Χρονική στιγμή $t_2=50\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	157
Εικόνα Δ- 4: Χρονική στιγμή $t_{3-1}=1\text{min}$ & 30sec (Σενάριο ελέγχου #3).....	157
Εικόνα Δ- 5: Χρονική στιγμή $t_{4-1}=1\text{min}$ & 40sec (Σενάριο ελέγχου #3).....	157

Εικόνα Δ- 6: Χρονική στιγμή $t_{5-1}=2\text{min} \& 30\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	158
Εικόνα Δ- 7: Χρονική στιγμή $t_{6-1}=5\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3)	158
Εικόνα Δ- 8: Χρονική στιγμή $t_{7-1}=5\text{min} \& 17\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	158
Εικόνα Δ- 9: Χρονική στιγμή $t_{8-1}=6\text{min} \& 8\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	159
Εικόνα Δ- 10: Χρονική στιγμή t_{3-2} (Σενάριο ελέγχου #3).....	159
Εικόνα Δ- 11: Χρονική στιγμή $t_{4-2}=2\text{min} \& 20\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	159
Εικόνα Δ- 12: Χρονική στιγμή $t_{5-2}=3\text{min} \& 10\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	160
Εικόνα Δ- 13: Χρονική στιγμή $t_{6-2}=5\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	160
Εικόνα Δ- 14: Χρονική στιγμή $t_{7-2}=5\text{min} \& 17\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	160
Εικόνα Δ- 15: Χρονική στιγμή $t_{8-2}=6\text{min} \& 8\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	161
Εικόνα Δ- 16: Χρονική στιγμή $t_{3-3}=2\text{min} \& 50\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	161
Εικόνα Δ- 17: Χρονική στιγμή $t_{4-3}=3\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	161
Εικόνα Δ- 18: Χρονική στιγμή $t_{5-3}=3\text{min} \& 50\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	162
Εικόνα Δ- 19: Χρονική στιγμή $t_{6-3}=7\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	162
Εικόνα Δ- 20: Χρονική στιγμή $t_{7-3}=7\text{min} \& 17\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	162
Εικόνα Δ- 21: Χρονική στιγμή $t_{8-3}=8\text{min} \& 13\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3).....	163
Εικόνα Δ- 22: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας (Σενάριο ελέγχου #3).....	163
Εικόνα Δ- 23: Εικόνα του συστήματος τη χρονική στιγμή $t=0$ (Σενάριο ελέγχου #4).....	166
Εικόνα Δ- 24: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #4).....	168
Εικόνα Δ- 25: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 23\text{min} \& 36\text{sec}$	169
Εικόνα Δ- 26: Το YT-1 κατευθύνεται προς το σταθμό 3 (cyclical)	169
Εικόνα Δ- 27: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 29\text{min} \& 56\text{sec}$	170
Εικόνα Δ- 28: Το YT-2 κατευθύνεται προς το σταθμό 3 (cyclical)	170
Εικόνα Δ- 29: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 36\text{min} \& 16\text{sec}$	171
Εικόνα Δ- 30: Το YT-3 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (cyclical)	171
Εικόνα Δ- 31: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 42\text{min} \& 36\text{sec}$	172
Εικόνα Δ- 32: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (cyclical)	172
Εικόνα Δ- 33: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 17\text{min} \& 36\text{sec}$	173
Εικόνα Δ- 34: Το YT-6 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random).....	173
Εικόνα Δ- 35: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 23\text{min} \& 56\text{sec}$	174
Εικόνα Δ- 36: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random).....	174
Εικόνα Δ- 37: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή $8\text{hr} \& 28\text{min} \& 56\text{sec}$	175
Εικόνα Δ- 38: Το YT-6 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random).....	175

Εικόνα Δ- 39: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 33min & 56sec	176
Εικόνα Δ- 40: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random).....	176
Εικόνα Δ- 41: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 38min & 56sec	177
Εικόνα Δ- 42: Το YT-5 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random).....	177
Εικόνα Δ- 43: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 45min & 16sec	178
Εικόνα Δ- 44: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random).....	178
Εικόνα Δ- 45: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 25min & 16sec	179
Εικόνα Δ- 46: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order).....	179
Εικόνα Δ- 47: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 30min & 16sec	180
Εικόνα Δ- 48: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order).....	180
Εικόνα Δ- 49: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 35min & 16sec	181
Εικόνα Δ- 50: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order).....	181
Εικόνα Δ- 51: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 41min & 36sec	182
Εικόνα Δ- 52: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order).....	182
Εικόνα Δ- 53: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 46min & 36sec	183
Εικόνα Δ- 54: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order).....	183
Εικόνα Δ- 55: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 2min & 9sec	184
Εικόνα Δ- 56: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (specific member)	184
Εικόνα Δ- 57: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 20min & 40sec	185
Εικόνα Δ- 58: Το YT-1 κατευθύνεται πάλι στο σταθμό 3 (specific order)	185
Εικόνα Δ- 59: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 9hr & 7min & 16sec	186
Εικόνα Δ- 60: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (largest distance)	186
Εικόνα Δ- 61: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 9hr & 18min & 36sec	187
Εικόνα Δ- 62: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (largest distance)	187
Εικόνα Δ- 63: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 3min & 16sec	188
Εικόνα Δ- 64: Το YT-3 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (smallest distance).....	188
Εικόνα Δ- 65: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 8min & 16sec	189
Εικόνα Δ- 66: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (smallest distance).....	189
Εικόνα Ε- 1: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης με σταθερούς χρόνους κύκλου	192
Εικόνα Ε- 2: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης με χρόνους κύκλου που ακολουθούν την κανονική κατανομή.....	193

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Στους γονείς μου Δημήτριο και Σωτηρία για την υποστήριξη που μου παρέχουν σε όλα τα βήματα της ζωής μου.

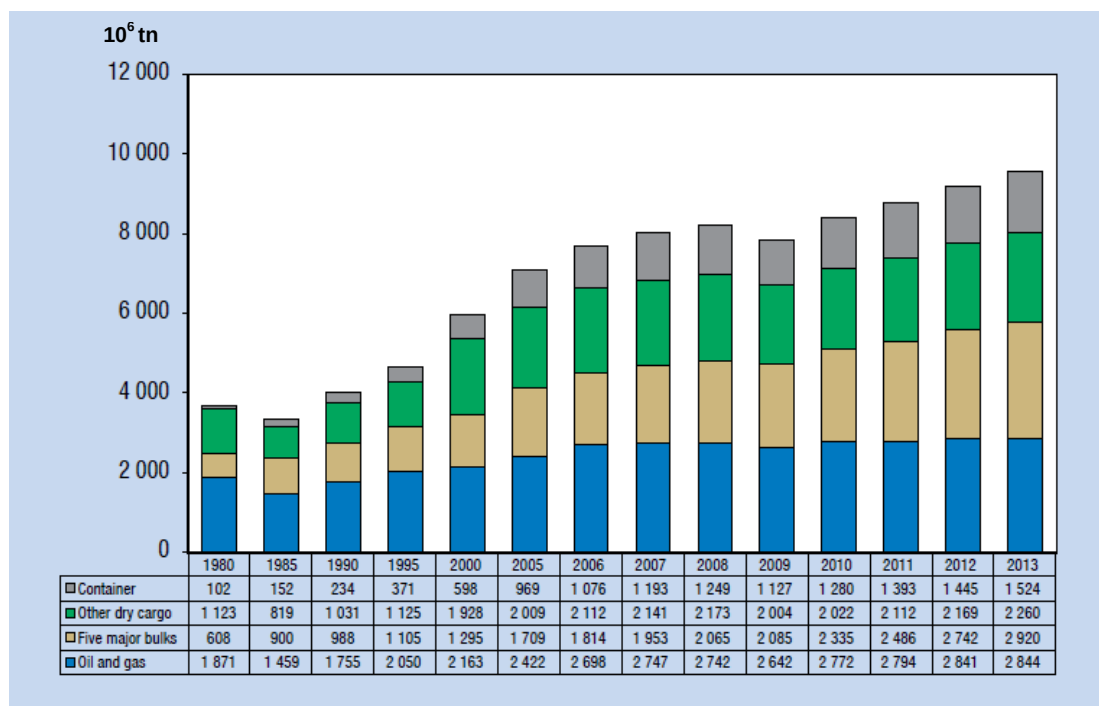
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Αθανάσιο Μπαλλή, της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία, τη συνεχή ενασχόληση, την καθοδήγηση και την υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΛΙΜΕΝΕΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

Η θαλάσσια μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Το έτος 2013 η ανάπτυξη του θαλάσσιου παγκόσμιου εμπορίου επεκτάθηκε κατά 3,8% ενώ ο όγκος του παγκόσμιου εμπορίου εμπορευμάτων μόλις 2,2%. Το μεγαλύτερο μέρος της επέκτασης προήλθε από την αύξηση του ξηρού φορτίου, ιδίως των χύδην εμπορευμάτων, όπου παρουσίασε αύξηση περίπου 5,5%. Το ξηρό χύδην φορτίο (bulk cargo) περιλαμβάνει (α) τα πέντε κύρια χύδην ξηρά φορτία που είναι τα εμπορεύματα σιδηρομεταλλευμάτων (iron ore), άνθρακα (coal), σιτηρών (grain), βωξίτη (bauxite) και τα φώσφατα (phosphates), (β) τα δευτερεύοντα χύδην ξηρά φορτία όπως ο χάλυβας, το τσιμέντο, η ξυλεία και ο γύψος (γ) τα εμπορευματοκιβώτια και (δ) το γενικό χύδην φορτίο. Τα φορτία αυτά αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο ποσοστό 70,2%. Το υγρό φορτίο (liquid bulk cargo) που αποτελείται από το αργό πετρέλαιο, τα προϊόντα πετρελαίου και αερίου αντιστοιχεί στο υπόλοιπο 29,8%. Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται η εξέλιξη του διεθνούς θαλάσσιου εμπορίου την περίοδο 1980-2013.



Εικόνα 1. 1: Εξέλιξη διεθνούς θαλάσσιου εμπορίου για την περίοδο 1980-2013. Πηγή: [92]

Τα λιμάνια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά φορτίου εφόσον είναι η διεπαφή θαλάσσιων και χερσαίων μεταφορών. Υπάρχουν περισσότερα από 2000 λιμάνια στον κόσμο, από μικρά που διακινούν μερικούς εκατοντάδες τόνους το χρόνο μέχρι και πολύ μεγάλα που διακινούν περισσότερα από 450 εκατομμύρια τόνους το χρόνο (Λιμάνι της Σαγκάης).

Η διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων στο λιμάνι (container port throughput) είναι η μέτρηση του αριθμού των εμπορευματοκιβωτίων που διέρχονται από το λιμάνι και καταγράφεται σε TEUs. Το 2013 η διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων για τις αναπτυσσόμενες οικονομίες εκτιμάται ότι αυξήθηκε κατά 7,2% σε 466,1 εκατομμύρια TEUs. Αυτή η αύξηση είναι μεγαλύτερη από το 5,2% του προηγούμενου έτους. Σε όλες τις χώρες, η διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων εκτιμάται ότι αυξήθηκε κατά 5,1% σε 651,1 εκατομμύρια TEUs, σε σχέση με το προηγούμενο έτος^[92].

Η μεταφορά φορτίων με εμπορευματοκιβώτια είναι μόλις το ένα έκτο του συνολικού όγκου των φορτίων που διακινούνται, όμως αντιπροσωπεύει περισσότερο από το ήμισυ της αξίας του συνόλου στο διεθνές θαλάσσιο εμπόριο. Οι σημαντικές επενδύσεις και τα λειτουργικά κόστη ενός λιμανιού εμπορευματοκιβωτίων (container port) που αντανakλώνται ως άμεσα κόστη του λιμανιού (χειρισμός πλοίων και τέλη αποθήκευσης εμπορευμάτων) καθώς και τα υψηλά έμμεσα κόστη (καθυστερήσεις) απαιτούν συστηματική έρευνα σε όλη την μεταφορική αλυσίδα.

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη φορτοεκφόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων από τα πλοία είναι^[15]:

- Η μέθοδος κατακόρυφης φορτοεκφόρτωσης (Lift on-Lift off, Lo-Lo), στην οποία το εμπορευματοκιβώτιο είναι η μονάδα μεταφοράς.
- Η μέθοδος Ro-Ro (Roll on - Roll off, Ro-Ro), είναι η διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων με κύλιση και πρακτικά οριζόντια. Η μέθοδος προσφέρεται ιδιαίτερα για διαδρομές μικρού σχετικά μήκους (ή χρόνου) με μέσο μεταφοράς τον σιδηρόδρομο ή/και το πλοίο. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η απαίτηση περιορισμένων εγκαταστάσεων και ιδιαίτερα περιορισμένου ανυψωτικού εξοπλισμού. Υπάρχει κατά συνέπεια ένας βαθμός αυτοδυναμίας της μεθόδου.
- Η μέθοδος των φορτηγιδοφόρων πλοίων (Float on-Float off, Flo-Flo), όπου μια ολόκληρη φορτηγίδα χρησιμοποιείται ως μονάδα φορτίου, για μέρος τουλάχιστον της μεταφοράς. Συγκεντρώνονται λοιπόν εμπορευματοκιβώτια που έχουν έναν προορισμό (ή πολλούς αλλά γειτονικούς) σε μια φορτηγίδα που σαν πλοίο-μονάδα φορτώνεται στο πλοίο, ή αντίστοιχα εκφορτώνεται. Η διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης της φορτηγίδας γίνεται εκτός λιμενικού χώρου, με τα μέσα του πλοίου και με αποτέλεσμα τη μείωση σε πολύ σημαντικό βαθμό του χρόνου και του κόστους. Επομένως, μπορούν να πραγματοποιούνται μεταφορές φορτίων μεγάλου όγκου που δεν έχουν προέλευση ή/και προορισμό ένα μόνο λιμένα και μάλιστα σε μεγάλες αποστάσεις.

Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Containerships)

Η τεράστια βιομηχανική ανάπτυξη οδήγησε σε μια γενικότερη εξέλιξη των πλοίων ώστε να εξυπηρετούνται καλύτερα. Ανάλογα λοιπόν με την εξέλιξη τους κατηγοριοποιούνται ως εξής^[18]:

Πλοία 1^{ης} γενιάς (Κατηγορία Α) (Early Containerships)

Η πρώτη γενιά των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αποτελούνταν από τροποποιημένα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην ή δεξαμενόπλοια και μετέφεραν έως 1000 TEU. Το πρώτο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ήταν το Ideal – X που ήταν ένα κατάλληλα τροποποιημένο δεξαμενόπλοιο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων δεν αποτελούσε δοκιμασμένο μέσο μεταφορών και έτσι η τροποποίηση των υπάρχοντων πλοίων ήταν η λιγότερο δαπανηρή λύση καθώς τα πλοία αυτά είχαν ίδια μέσα φορτοεκφόρτωσης ενώ οι περισσότεροι λιμενικοί τερματικοί σταθμοί δεν ήταν κατάλληλα εξοπλισμένοι για να χειριστούν τα εμπορευματοκιβώτια. Όμως, είχαν ένα μεγάλο μειονέκτημα, που ήταν η δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μόνο πάνω στο κατάλληλα διαμορφωμένο κατάστρωμα τους και όχι στους χώρους κυτών.

Πλοία 2^{ης} γενιάς (Κατηγορία Α) (Fully Cellular)

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων άρχισε να χρησιμοποιείται περισσότερο στις θαλάσσιες μεταφορές και η μεταφορική τους ικανότητα ήταν της τάξης των 2000 TEU κατασκευάστηκαν τα πρώτα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων πλήρως κυψελοειδούς δομής (Fully Cellular Containerships, FCC). Τα πλοία αυτού του τύπου διαθέτουν κυψέλες στις οποίες τοποθετούνται τα εμπορευματοκιβώτια σε στοίβες διαφορετικού ύψους, ανάλογα με τη χωρητικότητα του πλοίου, και υπάρχει το πλεονέκτημα φόρτωσης του πλοίου με εμπορευματοκιβώτια πάνω και κάτω από το κύριο κατάστρωμα. Παράλληλα, τα πλοία αυτά δεν έχουν γερανούς, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης περισσότερων εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κύριο κατάστρωμα. Αυτό είχε ως συνέπεια τη δημιουργία εξειδικευμένων τερματικών σταθμών εμπορευματοκιβωτίων σε όλο τον κόσμο.

Πλοία 3^{ης} γενιάς (Κατηγορία Β) (Panamax)

Οι οικονομίες κλίμακας οδήγησαν στη ναυπήγηση μεγαλύτερων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τη δεκαετία του 1980. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που μεταφέρονται τόσο χαμηλότερο είναι το κόστος ανά TEU γεγονός που οδήγησε στην σχεδίαση πλοίων με χωρητικότητες της τάξης των 3000 TEU.

Πλοία 4^{ης} γενιάς (Κατηγορία Β) (Panamax Max)

Το όριο μεγέθους της Διώρυγας του Παναμά οδήγησε στην κατασκευή πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας περίπου 4000 TEU το 1985. Ο σχεδιασμός των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ώστε να ικανοποιούν

τους περιορισμούς αυτούς έχει ως αποτέλεσμα ένα στενό και μακρύ σχεδιασμό του πλοίου.

Πλοία 5^{ης} γενιάς (Κατηγορία C) (Post Panamax)

Το 1988 κατασκευάστηκαν τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων APL C10 που ήταν η πρώτη κατηγορία πλοίων που υπερέβη το όριο των 32,2m, πλάτος της Διώρυγας του Παναμά. Μέχρι το 1996 τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Post Panamax είχαν μεταφορική ικανότητα που έφτανε τα 6.600 TEU.

Πλοία 6^{ης} γενιάς (Κατηγορία C) (Post Panamax Plus)

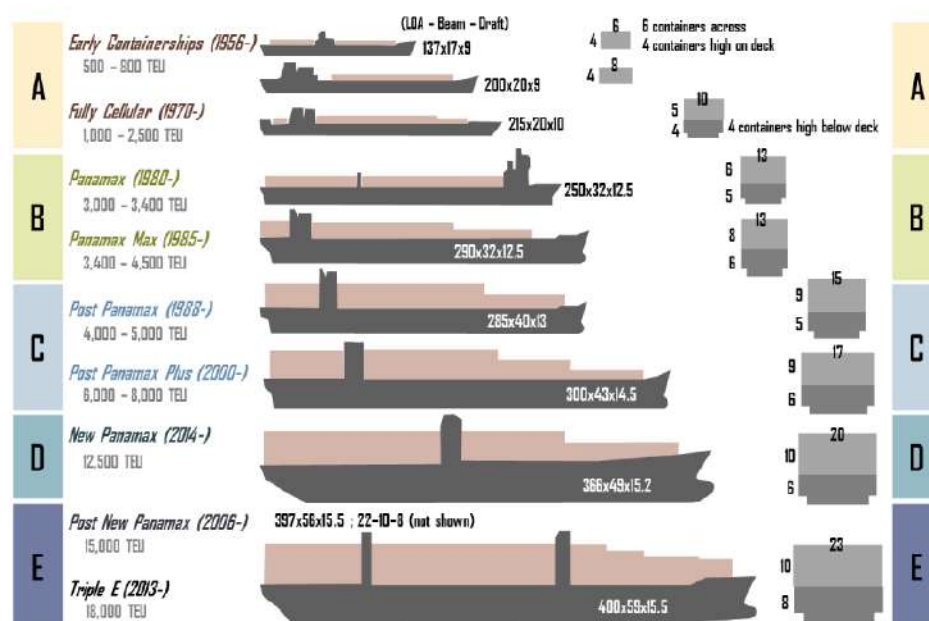
Το μέγεθος των πλοίων 6ης Γενιάς αφορά χωρητικότητες που φτάνουν τα 8.000 TEU. Τα πλοία αυτού του τύπου απαιτούν λιμάνια με μεγάλο βάθος νερού και κατάλληλο εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης και ξεπερνούν τους περιορισμούς της Διώρυγας του Παναμά.

New Panamax (Κατηγορία D)

Τα πλοία αυτά έχουν σχεδιαστεί για να ικανοποιούν τους περιορισμούς της διευρυμένης διώρυγας του Παναμά, και έχουν χωρητικότητες της τάξης των 12500 TEU. Όπως τα πλοία Panamax έτσι και τα πλοία New Panamax θα συνθέτουν μια συγκεκριμένη κατηγορία πλοίου που θα εξυπηρετεί αποτελεσματικά την Αμερική και την Καραϊβική, είτε από την Ευρώπη είτε από την Ασία.

Post New Panamax (Κατηγορία E)

Το 2006 παρουσιάστηκε μια νέα γενιά πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, όταν η ναυτιλιακή εταιρεία Maersk παρουσίασε τα πλοία Emma Maersk E Class με χωρητικότητα που κυμαίνεται από 11000 έως 14500 TEU. Τα πλοία αυτού του τύπου είναι μεγαλύτερα σε διαστάσεις σε σχέση με τις προδιαγραφές της διευρυμένης Διώρυγας του Παναμά και μπορούν να μεταφέρουν μέχρι και 18000 TEU (Triple E Class).



Εικόνα 1. 2: Εξέλιξη των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Πηγή: [18]

Μηχανολογικός εξοπλισμός

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στις λιμενικές εγκαταστάσεις μπορεί να διαχωριστεί στον εξοπλισμό που υπάρχει στη θαλάσσια πλευρά, στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων από τη θαλάσσια στη χερσαία πλευρά και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη χερσαία πλευρά.

Εξοπλισμός θαλάσσιας πλευράς

Στη θαλάσσια πλευρά χρησιμοποιούνται οι γερανογέφυρες κρηπιδώματος (quay or gantry cranes, QC) για την φόρτωση και την εκφόρτωση του πλοίων. Οι γερανογέφυρες κρηπιδώματος είναι μεταλλικές πλαισιωτές κατασκευές που κινούνται πάνω σε σιδηροτροχιές και παρατάσσονται ή μια δίπλα στην άλλη σε απόσταση περίπου 15 μέτρα, εγκάρσια στο πλοίο. Οι βασικοί τύποι που έχουν διαμορφωθεί με βάση τα πλοία που είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν (Εικόνα 1.3) (μήκος έκτασης του βραχίονα προς τη θάλασσα) είναι οι εξής:

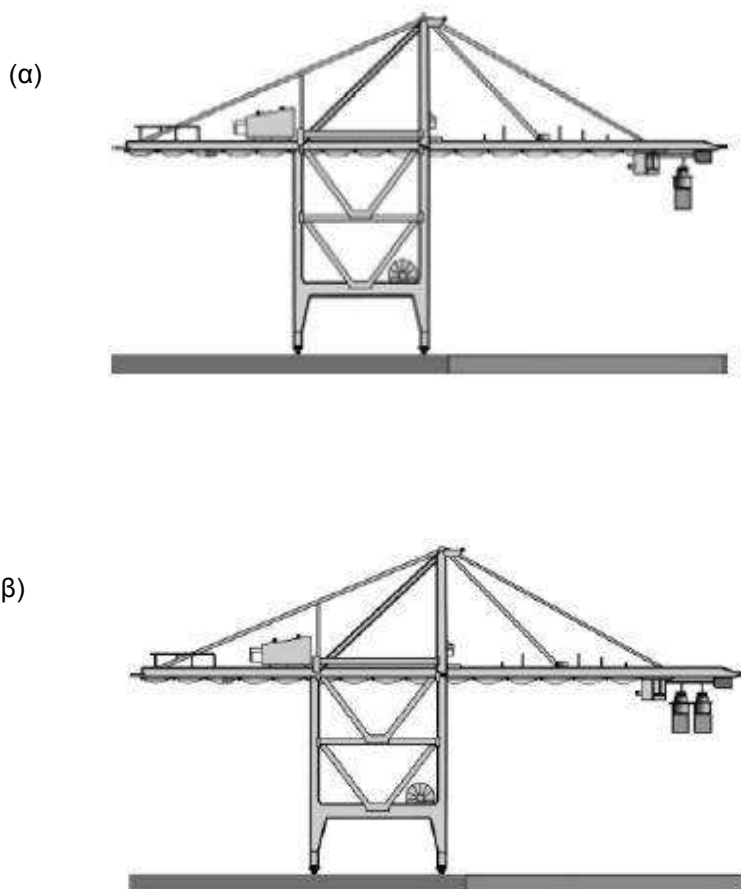
- Small Panamax κάτω από 36 μέτρα,
- Standard Panamax 36-44 μέτρα,
- Post Panamax 44-48 μέτρα,
- Super Post Panamax 48 μέτρα και πάνω.



Εικόνα 1. 3: Τύποι γερανογεφυρών κρηπιδώματος. Πηγή: [3]

Μπορούν να διακριθούν δύο είδη γερανογεφυρών κρητιδώματος, οι γερανογέφυρες με μονό βαγονέτο (single-trolley cranes) και οι γερανογέφυρες με διπλό βαγονέτο (dual-trolley cranes) (Εικόνα 1.4). Τα βαγονέτα κινούνται μαζί με τις γερανογέφυρες και είναι εξοπλισμένα με ειδικές κλίμακες για τη συλλογή των ε/κ. Οι σύγχρονες κλίμακες επιτρέπουν την κίνηση 2 εμπορευματοκιβωτίων 20 ποδών ταυτόχρονα. Συνήθως στους ΣΕΜΠΟ υπάρχουν γερανογέφυρες μονού βαγονέτου. Μεταφέρουν τα εμπορευματοκιβώτια από το πλοίο και τα τοποθετούν στην αποβάθρα ή σε κάποιο όχημα (αντίστροφη διαδικασία γίνεται στον κύκλο φόρτωσης του πλοίου). Οι γερανογέφυρες με ένα βαγονέτο είναι χειροκίνητες. Οι γερανογέφυρες διπλού βαγονέτου αποτελούν καινοτομία και χρησιμοποιούνται σε ορισμένους σταθμούς. Στις σύγχρονες γερανογέφυρες και στους δύο τύπους, ο οδηγός υποστηρίζεται με ένα ημιαυτόματο οδηγητικό σύστημα.

Η επίδοση των γερανογεφυρών είναι συνάρτηση των χειρισμών που πραγματοποιούν σε μία ώρα. Οι συμβατικού τύπου γερανογέφυρες εκτελούν περίπου 20 κινήσεις/ώρα, δηλαδή χρειάζονται τρία λεπτά για κάθε εμπορευματοκιβώτιο. Οι εξειδικευμένες γερανογέφυρες εκτελούν περίπου 30 κινήσεις/ώρα, δηλαδή 2 λεπτά για κάθε εμπορευματοκιβώτιο και τέλος οι γερανογέφυρες υψηλής τεχνολογίας οι οποίες διαθέτουν διπλό βαγονέτο εκτελούν περίπου 60 κινήσεις/ώρα, δηλαδή ένα λεπτό για κάθε εμπορευματοκιβώτιο^[22].



Εικόνα 1. 4: (α) Γερανογέφυρα με μονό βαγονέτο (β) Γερανογέφυρα με διπλό βαγονέτο.
Πηγή: [31]

Εξοπλισμός μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ θαλάσσιας και χερσαίας πλευράς

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων, εκτελεί τη διαδρομή από το κρηπίδωμα στους χώρους προσωρινής αποθήκευσης όταν πρόκειται για εκφόρτωση πλοίου και την αντίστροφη διαδρομή όταν πρόκειται για φόρτωση πλοίου. Ο εξοπλισμός αυτός μπορεί να είναι:

Ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις

Οι ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις (terminal tractors) (Εικόνα 1.5) είναι γνωστά και ως φορτηγά^[14] (yard trucks) και μεταφέρουν τα εμπορευματοκιβώτια χωρίς όμως να μπορούν να τα ανυψώσουν. Αποτελούνται από την καμπίνα για τον οδηγό και από την βάση στην οποία τοποθετούνται απευθείας τα εμπορευματοκιβώτια. Χρησιμοποιούνται σε Lo-Lo (Lift on – Lift off) μετακινήσεις εντός των τερματικών σταθμών και σε Ro-Ro (Roll on – Roll off) διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης αφού μπορούν να συνδέσουν στη βάση τους και κινητά αμαξώματα. Έχουν χαμηλά λειτουργικά κόστη και παρέχουν ασφάλεια και άνεση. Θεωρητικά η ταχύτητα τους μπορεί να φτάσει τα 53km/h, ωστόσο δεν αναπτύσσουν ταχύτητες μεγαλύτερες των 25km/h στο χώρο τους λιμανιού, λόγω κανονισμού μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας.



Εικόνα 1. 5: Ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις. Πηγή: [6]

Ελκυστήρες με δυνατότητα ρυμούλκησης πολλών τρέιλερ

Οι ελκυστήρες που έχουν τη δυνατότητα ρυμούλκησης πολλών τρέιλερ (multi – Trailers) (Εικόνα 1.6) έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των ελκυστήρων που μεταφέρουν ένα εμπορευματοκιβώτιο τη φορά. Συγκεκριμένα, μειώνουν τις συνολικές κινήσεις στον τερματικό σταθμό, μειώνουν τις καθυστερήσεις των γερανογεφυρών, μειώνουν το συνολικό κόστος επενδύσεων για εξοπλισμό, μειώνουν το κόστος εργασίας, το κόστος καυσίμων και κατ' επέκταση το κόστος συντήρησης. Αποτελούνται από τρία τμήματα όπου κάθε τμήμα μπορεί να μεταφέρει δύο εμπορευματοκιβώτια 20' ή ένα εμπορευματοκιβώτιο 40'.



Εικόνα 1. 6: Ελκυστήρας με δυνατότητα ρυμούλκησης πολλών τρέιλερ. Πηγή: [2]

Οχήματα πλαίσια

Τα οχήματα πλαίσια (straddle carriers) (Εικόνα 1.7) είναι τα σημαντικότερα μέσα μεταφοράς γιατί έχουν την δυνατότητα όχι μόνο να μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια αλλά και να τα στοιβάζουν. Μπορούν να θεωρηθούν ως 'γερανοί' με την ευρεία έννοια, αφού έχουν ελεύθερη πρόσβαση στα εμπορευματοκιβώτια, ανεξάρτητα από τη θέση τους στο χώρο. Τα οχήματα πλαίσια επιτρέπουν τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων 20' ή 40' και είναι ικανά για ταυτόχρονη μεταφορά και στοιβασία δύο εμπορευματοκιβωτίων 20'. Εξαιτίας των εξαρτημάτων τους, είναι πολύ ευέλικτα και δυναμικά και υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία. Συνήθως είναι χειροκίνητα και ικανά να στοιβάξουν δύο ή τρία εμπορευματοκιβώτια σε ύψος, και να μετακινήσουν ένα εμπορευματοκιβώτιο πάνω από δύο ή τρία άλλα. Η ταχύτητα που μπορούν να αναπτύξουν είναι μεταξύ 24-30km/h.



Εικόνα 1. 7: Οχήματα πλαίσια. Πηγή: [6]

Αυτομάτως καθοδηγούμενα οχήματα μεταφοράς

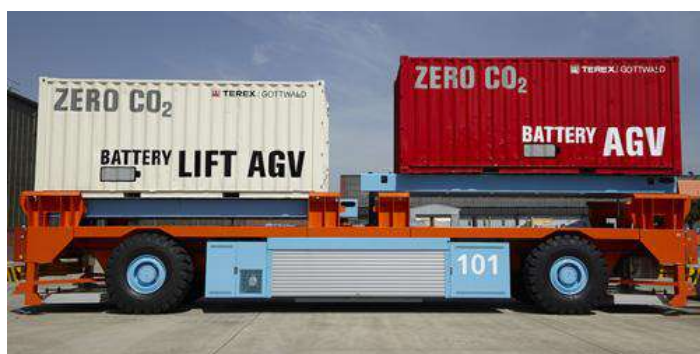
Τα αυτομάτως καθοδηγούμενα οχήματα μεταφοράς (Automatic Guided Vehicle, AGV) (Εικόνα 1.8) είναι ικανά να κινούνται σε οδικό δίκτυο που υπάρχουν ηλεκτρικές γραμμές ή ράγες μεταφοράς στο έδαφος για να ελέγχουν τη θέση τους. Κάθε AGV μπορεί να φορτώσει ένα 40'/45' εμπορευματοκιβώτιο ή δύο 20' εμπορευματοκιβώτια, είναι δηλαδή ικανό για πιθανές λειτουργίες πολλαπλής φόρτωσης. Έχουν μήκος περίπου 14,8m, πλάτος 3m και ύψος πλατφόρμας 1,9m περίπου. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορούν να αναπτύξουν είναι 6m/sec στις ευθυγραμμίες, ενώ στις καμπύλες φτάνουν μέχρι τα 3m/sec. Τα συστήματα με AGV απαιτούν εγκαταστάσεις υψηλού κόστους και συνεπώς η λειτουργία τέτοιων συστημάτων είναι συμφέρουσα σε περιοχές όπου το εργατικό κόστος είναι υψηλό. Σήμερα, είναι σε λειτουργία στο Ρότερνταμ και στο Αμβούργο, σε συνδυασμό με αυτόματες γερανογέφυρες.



Εικόνα 1. 8: Αυτόματα οχήματα μεταφοράς. Πηγή: [10]

Αυτοματοποιημένα οχήματα με δυνατότητα ανύψωσης

Σε αντίθεση με τα συμβατικά αυτομάτως καθοδηγούμενα οχήματα μεταφοράς (AGVs), αυτοματοποιημένα οχήματα με δυνατότητα ανύψωσης (Automated Lifting Vehicle, ALV) (Εικόνα 1.9) έχουν δύο ενεργές πλατφόρμες ανύψωσης. Μπορούν να μεταφέρουν δύο εμπορευματοκιβώτια 20' ανεξάρτητα ή ένα εμπορευματοκιβώτιο 40'. Έχουν μήκος 14,8m, πλάτος 3m και ύψος πλατφόρμας 2,4m περίπου. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορούν να αναπτύξουν είναι 6m/sec στις ευθυγραμμίες, ενώ στις καμπύλες φτάνουν μέχρι τα 3m/sec, όμοια με τα αυτομάτως καθοδηγούμενα οχήματα μεταφοράς.



Εικόνα 1. 9: Αυτόματα οχήματα ανύψωσης. Πηγή: [10]

Εξοπλισμός χερσαίας πλευράς

Ο εξοπλισμός της χερσαίας πλευράς χρησιμοποιείται για την μεταφορά και την στοιβάση των εμπορευματοκιβωτίων στους χώρους αποθήκευσης. Ο εξοπλισμός αυτός μπορεί να είναι:

Περονοφόρα ανυψωτικά οχήματα

Τα περονοφόρα ανυψωτικά οχήματα (forklift trucks) (Εικόνα 1.10) είναι γρήγορα, εύχρηστα και ιδιαίτερα ευέλικτα. Είναι απλά στη λειτουργία τους και ασφαλή εξαιτίας της στιβαρής κατασκευής τους με χαμηλό κέντρο βάρους. Ο χειριστής έχει πολύ καλή εποπτεία του χώρου όμως το μεγάλο μειονέκτημα τους είναι ότι δεν μπορούν να τοποθετήσουν φορτία σε μεγάλο ύψος.



Εικόνα 1. 10: Περονοφόρο ανυψωτικό όχημα. Πηγή: [6]

Οχήματα εμπρόσθιας στοιβάσεως

Τα οχήματα εμπρόσθιας στοιβάσεως (reach stackers) (Εικόνα 1.11) έχουν ευρεία χρήση στη μεταφορά και στοιβάση εμπορευματοκιβωτίων σε λιμενικούς τερματικούς σταθμούς, σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και σε άλλα συστήματα μεταφορών. Είναι εύκολα στο χειρισμό, ασφαλή και έχουν υψηλή ικανότητα στο χειρισμό των φορτίων και υψηλές ταχύτητες εργασίας με μέγιστη τα 25km/hr.



Εικόνα 1. 11: Όχημα εμπρόσθιας στοιβάσεως. Πηγή: [6]

Γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών

Οι γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών (Rail Mounted Gantry Cranes, RMG) (Εικόνα 1.12) είναι πλασιωτές μεταλλικές κατασκευές εξοπλισμένες με ανυψωτικό μηχανισμό και αρπάγη που χρησιμοποιούνται για την στοιβάση των εμπορευματοκιβωτίων. Έχουν πλάτος που φτάνει τα 50m και μπορούν να στοιβάζουν εμπορευματοκιβώτια μέχρι και σε 10 σειρές κατά τον άξονα τους.

Συνήθως στοιβάζουν από 3 έως 9 εμπορευματοκιβώτια καθ' ύψος. Η κατά μήκος ταχύτητα τους φτάνει μέχρι τα 100m/min όταν είναι σε έμφορτη κατάσταση ενώ μπορεί να φτάσει τα 120m/min όταν είναι κενές. Η ταχύτητα ανύψωσης των εμπορευματοκιβωτίων φτάνει μέχρι τα 40m/min. Τέλος έχουν ανυψωτική ικανότητα μέχρι 65 τόνους.



Εικόνα 1. 12: Γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών. Πηγή: [7]

Γερανογέφυρες επί ελαστικών τροχών

Οι ελαστικοφόρες γερανογέφυρες (Rail Tired Gantries, RTG) (Εικόνα 1.13) είναι πιο ευέλικτες λειτουργικά ενώ οι γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών είναι πιο σταθερές. Οι γερανογέφυρες αυτές έχουν σχεδιαστεί για εξοικονόμηση χώρου αποθήκευσης εμπορευματοκιβωτίων και χρησιμοποιούνται μεσαίου μεγέθους τερματικούς σταθμούς. Έχουν πλάτος που φτάνουν τα 36,50m και μπορούν να στοιβάζουν εμπορευματοκιβώτια μέχρι και σε 8 σειρές κατά τον άξονα τους.

Συνήθως στοιβάζουν από 3 έως 7 εμπορευματοκιβώτια καθ' ύψος. Η κατά μήκος ταχύτητα τους φτάνει μέχρι τα 100m/min όταν είναι σε έμφορτη κατάσταση ενώ μπορεί να φτάσει τα 120m/min όταν είναι κενές. Η ταχύτητα ανύψωσης των εμπορευματοκιβωτίων φτάνει μέχρι τα 30m/min. Τέλος έχουν ανυψωτική ικανότητα μέχρι 65 τόνους.

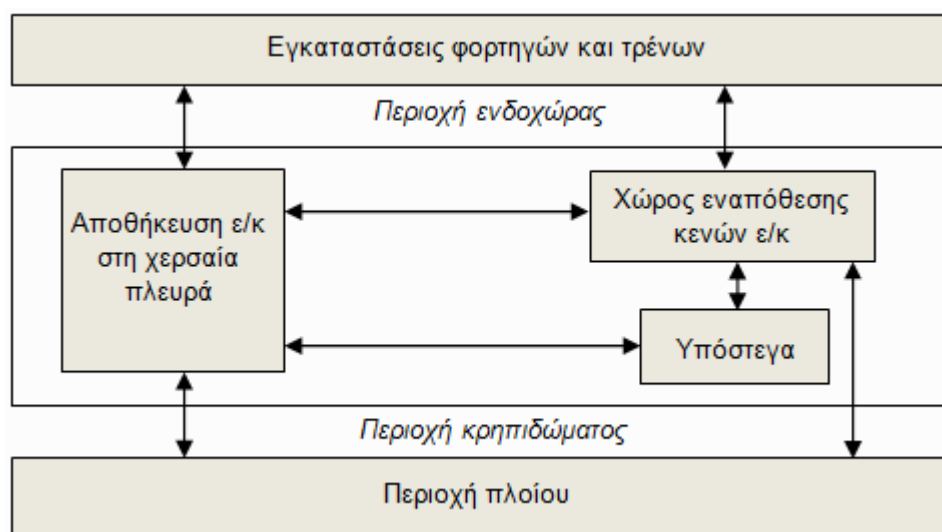


Εικόνα 1. 13: Γερανογέφυρες επί ελαστικών τροχών. Πηγή: [7]

Δομή και λειτουργίες λιμενικού τερματικού σταθμού

Ο λιμενικός τερματικός σταθμός εμπορευματοκιβωτίων (container terminal) μπορεί να περιγραφεί σαν ένα ανοιχτό σύστημα ροής υλικών με δύο εξωτερικές διασυνδέσεις. Οι διασυνδέσεις αυτές είναι η θαλάσσια πλευρά, όπου γίνεται η φόρτωση και η εκφόρτωση των πλοίων και η χερσαία πλευρά, όπου γίνεται η φόρτωση και η εκφόρτωση φορτηγών και τρένων (Σχήμα 1.1). Για τη σωστή λειτουργία του θα πρέπει να μπορεί να παρέχει τα εξής:

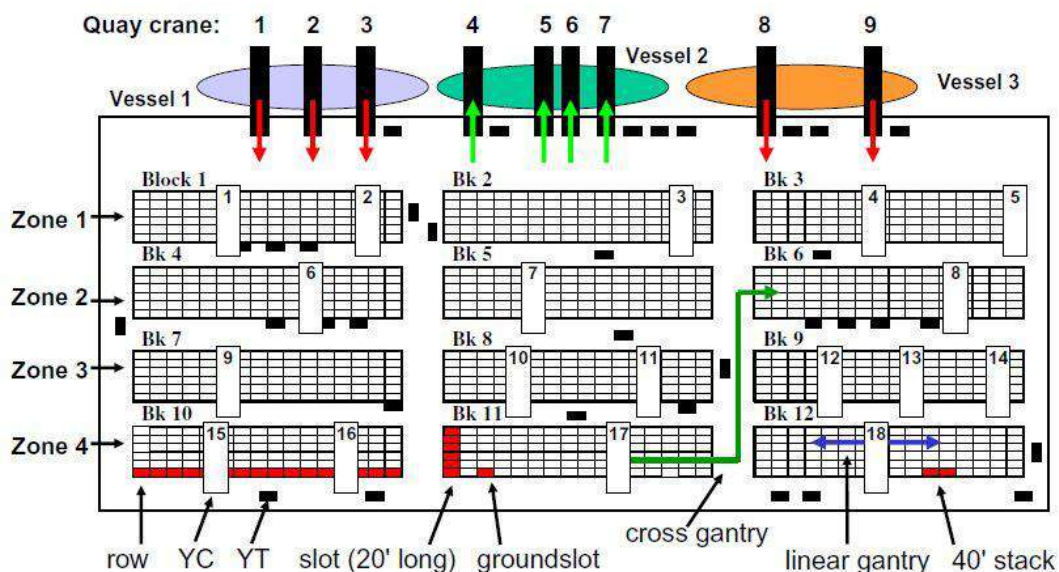
1. Δυνατότητα προσέγγισης από τη θάλασσα
2. Θέσεις παραβολής και γερανογέφυρες για τη φόρτωση/εκφόρτωση των πλοίων
3. Χώρο αγκυροβόλησης των πλοίων εκτός λιμένα που περιμένουν να εισέλθουν σε μια θέση παραβολής
4. Χώρους για τη διαχείριση του φορτίου όπως:
 - Περιοχή αποθήκευσης των έμφορτων εμπορευματοκιβωτίων
 - Περιοχή αποθήκευσης των κενών εμπορευματοκιβωτίων
 - Υπόστεγο πλήρωσης και εκκένωσης των εμπορευματοκιβωτίων για μοναδοποίηση και απομονοποίηση
5. Βοηθητικούς χώρους όπως:
 - Χώρους στάθμευσης του μηχανολογικού εξοπλισμού
 - Χώρους φύλαξης των μηχανημάτων
 - Χώρους συντήρησης εξοπλισμού
 - Χώρους στάθμευσης οχημάτων
 - Χώρους για εσωτερικούς αυτοκινητόδρομους
 - Χώρους για σύνδεση των συρμών των τρένων
6. Σύνδεση με τα χερσαία μέσα μεταφοράς
7. Συστήματα διαχείρισης του φορτίου μέσα στον σταθμό
8. Λοιποί χώροι όπως:
 - Γραφεία διοίκησης
 - Τελωνείο
 - Χώρους για στέγαση και άλλων υπηρεσιών



Σχήμα 1. 1: Περιοχές λειτουργιών ενός τερματικού σταθμού ε/κ και ροή των μεταφορών. Πηγή: [83]

Μόλις φτάσει ένα πλοίο στο λιμάνι, εκχωρείται σε μια θέση παραβολής (berth), της οποίας το μήκος και το βάθος καθορίζει το μέγεθος του πλοίου που μπορεί να εξυπηρετηθεί. Η θέση παραβολής είναι εξοπλισμένη με γερανογέφυρες που θα φορτώσουν ή θα εκφορτώσουν τα εμπορευματοκιβώτια. Τα εισαγόμενα εμπορευματοκιβώτια που εκφορτώνονται μεταφέρονται στους χώρους προσωρινής αποθήκευσης της χερσαίας πλευρά όπου θα μεταφορτωθούν στη συνέχεια. Τα εμπορευματοκιβώτια που φτάνουν οδικώς ή σιδηροδρομικώς κινούνται στους χώρους των φορτηγών και των τρένων αντίστοιχα, όπου εξοπλισμός του λιμανιού θα διανείμει τα εμπορευματοκιβώτια σε χώρους αποθήκευσης. Άλλες κινήσεις εκτελούνται αν υπάρχουν υπόστεγα και άδειες αποθήκες στο σταθμό. Οι κινήσεις αυτές περιλαμβάνουν μεταφορές μεταξύ των άδειων αποθηκών, των κέντρων συσκευασίας και της αποθήκευσης εισαγόμενων και εξαγόμενων εμπορευματοκιβωτίων.

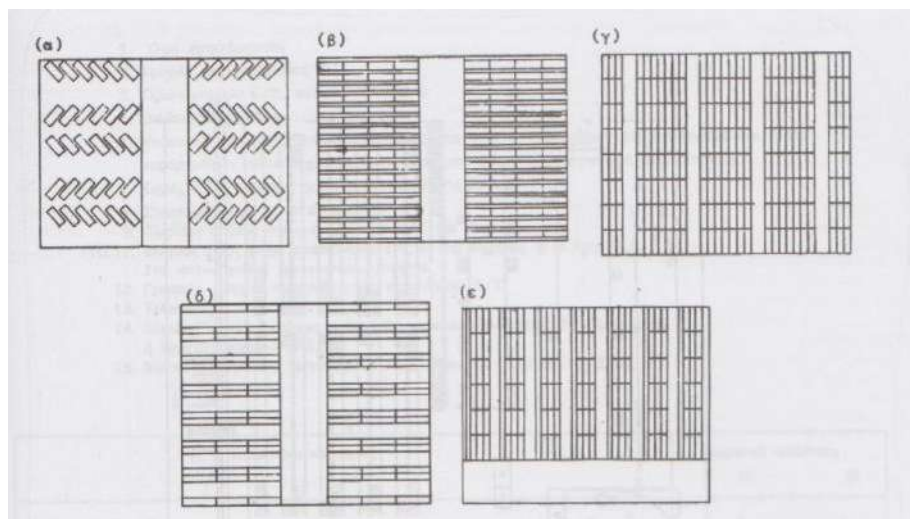
Στην Εικόνα 1.14 φαίνεται ένα τυπικό σχέδιο ενός λιμενικού τερματικού σταθμού μεταφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων, που αποτελείται από τρεις θέσεις παραβολής. Στην πρώτη θέση έχει παραβάσει το πρώτο πλοίο (vessel 1) που βρίσκεται σε κατάσταση εκφόρτωσης και διαθέτει τρεις γερανογέφυρες κρηπιδώματος (quay cranes 1,2,3). Στη δεύτερη θέση έχει παραβάσει το δεύτερο πλοίο (vessel 2) που βρίσκεται σε κατάσταση φόρτωσης και διαθέτει τέσσερις γερανογέφυρες κρηπιδώματος (quay cranes 4,5,6,7). Και στην τρίτη θέση έχει παραβάσει το τρίτο πλοίο (vessel 3) που βρίσκεται σε κατάσταση εκφόρτωσης και διαθέτει δύο γερανογέφυρες κρηπιδώματος (quay cranes 8,9). Η περιοχή της χερσαίας πλευράς διαθέτει δώδεκα τμήματα απόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων (blocks 1-12) που είναι ταξινομημένα σε τέσσερις ζώνες (zone 1-4). Ο εξοπλισμός της χερσαίας πλευράς αποτελείται από γερανογέφυρες (yard cranes, YC) και ελκυστήρες (yard trucks, YT).



Εικόνα 1. 14: Σχέδιο τερματικού σταθμού μεταφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων. Πηγή: [74]

Γενικά, ο χώρος στοιβάσεως των εμπορευματοκιβωτίων καταλαμβάνει το 60-70% του συνολικού χώρου που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των εμπορευματοκιβωτίων που πρόκειται να μετακινηθούν μέσα στο επόμενο διάστημα. Η ακριβής χωροταξική διάταξη των διάφορων τμημάτων εξαρτάται από τον τύπο των μηχανημάτων στοιβάσεως, καθώς και από τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ του χώρου αποθήκευσης και άλλων περιοχών.

Στην Εικόνα 1.15 φαίνονται οι τυπικές διατάξεις του χώρου απόθεσης εμπορευματοκιβωτίων. Η πρώτη διάταξη (α), είναι η διάταξη ψαροκόκαλου. Προσφέρεται για εναπόθεση εμπορευματοκιβωτίων επί συρομένων βάσεων ή/και για διάταξη αυτοκινήτων ή συνδυασμών αυτοκινήτου και συρομένου οχήματος, μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η δεύτερη διάταξη (β), είναι η γραμμική διάταξη. Γίνεται γραμμική απόθεση σε μία, δύο ή και τρεις σειρές εμπορευματοκιβωτίων καθ' ύψος. Η διάταξη αυτή είναι η πιο συνηθισμένη, όταν για τη διακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων χρησιμοποιούνται οχήματα πλαίσια (straddle carriers). Για την κυκλοφορία τους αφήνονται διάδρομοι περίπου 1,5m. Η τρίτη διάταξη (γ) είναι η απόθεση κατά ομάδες. Η διάταξη αυτή προσφέρεται όταν η διακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων γίνεται μόνο με περionoφόρα οχήματα πλαγιοφόρτωσης (side loaders, forklift). Είναι η μόνη διάταξη που δεν παρέχει δυνατότητα μετακίνησης των εμπορευματοκιβωτίων παρά μόνο καθ' ομάδες. Στις άλλες διατάξεις υπάρχει η ευχέρεια μετακίνησης οποιουδήποτε εμπορευματοκιβωτίου (χωρίς βέβαια να αλλάξει η καθ' ύψος σειρά), χωρίς να μετακινηθούν τα λοιπά εμπορευματοκιβώτια. Η τέταρτη διάταξη (δ), είναι η γραμμική απόθεση σε διπλή συστοιχία με ευρύτερους διαδρόμους. Προσφέρεται όταν η διακίνηση γίνεται με περionoφόρα οχήματα πλαγιοφόρτωσης. Η πέμπτη (ε) και τελευταία διάταξη, είναι η γραμμική απόθεση σε πολλαπλή συστοιχία. Χρησιμοποιείται κυρίως όταν η διακίνηση γίνεται με κινητές γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών ή ελαστικοφόρες (RMG, RTG). Ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων κατά ζυγό είναι συνάρτηση και του ανοίγματος της γερανογέφυρας. Συνήθως υπερβαίνει τον τρία, ακόμα και για γερανογέφυρες μεγάλου ανοίγματος, επειδή είναι σκόπιμο να υπάρχει ευχέρεια, μεταξύ των εμπορευματοκιβωτίων διακίνησης οδικών οχημάτων προς φόρτωση – εκφόρτωση.



Εικόνα 1. 15: Τυπικές διατάξεις χώρου στοιβάσεως εμπορευματοκιβωτίων.
Πηγή: [15]

Ανάγκη για έρευνα στα συστήματα λιμενικών εγκαταστάσεων

Οι λιμενικές εγκαταστάσεις διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων αναπτύσσονται συνήθως σε τμήματα μεγάλων εμπορικών λιμένων. Οι υψηλοί ρυθμοί φορτοεκφόρτωσης που επιτυγχάνονται στη θαλάσσια πλευρά των εγκαταστάσεων δημιουργούν απαιτήσεις για μεγάλους χώρους εναπόθεσης/στοιβάσας των εμπορευματοκιβωτίων ώστε να εναρμονίζονται με βραδύτερη ροή τους από/προς τα χερσαία μέσα μεταφοράς. Η έλλειψη επαρκών χώρων οδηγεί στη στοιβάσας των εμπορευματοκιβωτίων σε περισσότερες από μια στρώσεις, που με τη σειρά της οδηγεί σε απαιτήσεις προμήθειας ανάλογου μηχανολογικού εξοπλισμού. Κακή διευθέτηση χώρων, ανεπαρκής αριθμός μηχανημάτων και έλλειψη συντονισμού στην κατάρτιση των καθημερινών σχεδίων εργασίας είναι μερικές από τις δυσλειτουργίες που προκαλούνται από σφάλματα στο σχεδιασμό ή/και την οργάνωση των εγκαταστάσεων.

Αποτέλεσμα των δυσλειτουργιών είναι η δημιουργία καθυστερήσεων στα μέσα μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων που μετασχηματίζεται σε έμμεσο κόστος και είτε άμεσα (με τη μορφή υπερημεριών στις περιπτώσεις ναυλωμένων πλοίων) είτε έμμεσα (με την αύξηση των ναύλων των πλοίων ή των τιμολογίων των μεταφορέων της ενδοχώρας) μεταβιβάζεται στους χρήστες της λιμενικής εγκατάστασης εμπορευματοκιβωτίων.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση εναλλακτικών τεχνικών οργάνωσης στο υποσύστημα διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων εντός λιμενικών τερματικών σταθμών. Επικεντρώνεται στις τεχνικές οργάνωσης του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου.

Μελετάται η μέθοδος της προσομοίωσης και συμπεριλαμβάνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στα μοντέλα προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν και έχουν συμβάλει στη διερεύνηση των τεχνικών οργάνωσης του υπό μελέτη υποσυστήματος. Για την ανάπτυξη και την εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης Arena Rockwell Software.

Το υποσύστημα διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου μπορεί να οργανωθεί με περισσότερους από έναν τρόπους ανάλογα και με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Υπάρχουν ποικίλοι τύποι εξοπλισμού και ποικίλοι τρόποι διαμόρφωσης που μπορούν να εφαρμοστούν.

Οι τεχνικές οργάνωσης που μελετώνται αφορούν στη σταθερή ανάθεση εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες του ίδιου πλοίου (fixed allocation), στην ανάθεση ομάδας εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες του ίδιου πλοίου (pooled allocation to one ship) και στην ανάθεση ομάδας εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες διαφορετικών πλοίων (pooled allocation to many ships).

Η σημαντικότητα των διαδικασιών μεταφοράς στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσεως πηγάζει από το γεγονός ότι τυχόν ανεπάρκειες και καθυστερήσεις στην εξυπηρέτηση των γερανογεφυρών στο κρηπίδωμα επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση όλου του συστήματος στη θαλάσσια πλευρά.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθούν εναλλακτικές τεχνικές οργάνωσης στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσεως. Ακόλουθο της διερεύνησης είναι να αναπτυχθούν μοντέλα προσομοίωσης που να αξιολογούν τις εναλλακτικές τεχνικές οργάνωσης και να είναι δυνατό να αποφασιστεί η αποτελεσματικότερη στρατηγική που πρέπει να εφαρμοστεί υπό προϋποθέσεις.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το κεφάλαιο 1 είναι εισαγωγικό και έχει ως σκοπό να δώσει στον αναγνώστη τη δυνατότητα να σχηματίσει μια εικόνα για το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο υποκεφάλαιο 1.1 παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία για τις θαλάσσιες μεταφορές και τους τερματικούς σταθμούς εμπορευματοκιβωτίων. Στο υποκεφάλαιο 1.2 γίνεται αναφορά στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και στο υποκεφάλαιο 1.3 παρουσιάζεται ο σκοπός της. Τέλος στο υποκεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται η εισαγωγή με την παρουσίαση της δομής της διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 λαμβάνει μέρος η βιβλιογραφική επισκόπηση. Στο υποκεφάλαιο 2.1 γίνεται μια επισκόπηση των βασικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται από την επιχειρησιακή έρευνα για την επίλυση προβλημάτων στις λιμενικές εγκαταστάσεις. Στο υποκεφάλαιο 2.2 γίνεται επισκόπηση των προσεγγίσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί στα συστήματα λιμενικών εγκαταστάσεων και στο υποκεφάλαιο 2.3 γίνεται επισκόπηση των προσεγγίσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσεως. Στη συνέχεια στο υποκεφάλαιο 2.4 γίνεται μια επισκόπηση των δημοσιευμένων εργασιών που έχουν χρησιμοποιήσει τη προσομοίωση με χρήση του λογισμικού Arena για τη μελέτη λιμενικών εγκαταστάσεων.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης λιμενικών εγκαταστάσεων στο λογισμικό Arena. Αρχικά στο υποκεφάλαιο 3.1 παρουσιάζεται η μέθοδος της προσομοίωσης και αναλύεται το λογισμικό προσομοίωσης Arena. Στο υποκεφάλαιο 3.2 αναπτύσσονται τα μοντέλα λιμενικών εγκαταστάσεων και πραγματοποιείται έλεγχος εγκυρότητας τους σε σχέση με αντίστοιχα μοντέλα της θεωρίας αναμονής.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η προσομοίωση των στρατηγικών ανάθεσης εργασιών στα οχήματα μεταφοράς κατά τις διαδικασίες φόρτωσης/εκφόρτωσης πλοίων. Στο υποκεφάλαιο 4.1 δίνονται κάποια γενικά στοιχεία και ορισμοί. Στο υποκεφάλαιο 4.2 γίνεται προσομοίωση στρατηγικών ανάθεσης εργασιών στα οχήματα μεταφοράς κατά τις διαδικασίες εκφόρτωσης πλοίων. Στο υποκεφάλαιο 4.3 γίνεται προσομοίωση στρατηγικών ανάθεσης εργασιών στα οχήματα μεταφοράς με σταθερούς χρόνους κύκλου, κατά τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης πλοίων ενώ στο υποκεφάλαιο 4.4 πραγματοποιείται προσομοίωση που λαμβάνει υπόψη αποκλίσεις στους χρόνους κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς. Στο υποκεφάλαιο 4.5 παρουσιάζεται μέθοδος που εκτιμά την απόκλιση του χρόνου κύκλου των οχημάτων μεταφοράς που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε κάθε περίπτωση. Στο υποκεφάλαιο 4.6 δίνονται κάποια μερικά συμπεράσματα για τις στρατηγικές ανάθεσης εργασιών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας και οι εισηγήσεις για περεταίρω έρευνα με βάση τη παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο, την ελληνική και τη ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

Στο παράρτημα Α γίνεται μια παρουσίαση των μοναδοποιημένων φορτίων και του συστήματος των εμπορευματοκιβωτίων.

Στο παράρτημα Β παρουσιάζεται αναλυτικά η τεχνική της θεωρίας αναμονής και δίνονται οι αναλυτικοί μοντέλων της.

Στο παράρτημα Γ γίνεται έλεγχος εγκυρότητας των μοντέλων προσομοίωσης μέσω σύγκρισης με αναλυτική αριθμητική επίλυση.

Στο παράρτημα Δ γίνεται έλεγχος προσομοιωτικής διαδικασίας για την κατανομή εργασιών στα οχήματα μεταφοράς.

Στο παράρτημα Ε γίνεται έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων προσομοίωσης μέσω σύγκρισης με αντίστοιχο παράδειγμα στη δημοσιευμένη εργασία του Frankel.

Στο παράρτημα ΣΤ παρατίθενται οι ενδεικτικοί πίνακες των μοντέλων υπολογισμού χρόνων κύκλου των οχημάτων μεταφοράς για τις διάφορες περιπτώσεις διαμόρφωσης του χώρου στοιβάσεως. Λόγω του μεγέθους τους δίνονται οι 50 πρώτες τιμές των πινάκων.

Στο παράρτημα Ζ παρουσιάζεται η αναλυτική περιγραφή των λειτουργικών μονάδων των μοντέλων προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν για τα σενάρια 3 και 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΛΙΜΕΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Για την επίλυση των προβλημάτων στις λιμενικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται τεχνικές που έχουν ως βάση μαθηματικά μοντέλα. Οι τεχνικές αυτές αποτελούν αντικείμενο του τομέα της Επιχειρησιακής Έρευνας (Operation Research) και λειτουργούν ως εργαλείο υποβοήθησης για τη λήψη ορθολογικότερων αποφάσεων τόσο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής όσο και της λειτουργίας.

Οι συνήθεις τύποι μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται μπορούν να διαχωριστούν στα περιγραφικά μοντέλα (descriptive models), που προσφέρουν για ένα συγκεκριμένο αριθμό δεδομένων και αρχικών συνθηκών, μια περιγραφή του φαινομένου που μελετάται και στα καθοριστικά μοντέλα (prescriptive models), τα οποία η στρατηγική και ο σχεδιασμός που προτείνουν πετυχαίνουν τη βέλτιστη τιμή ενός αντικειμένου. Επίσης με βάση το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούν διαχωρίζονται στα προσδιοριστικά μοντέλα (deterministic models) και στα στοχαστικά μοντέλα (stochastic models). Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει συνοπτικά τις κατηγορίες αυτές, με τα βασικά μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας.

Πίνακας 2. 1: Τύποι συνήθων μαθηματικών μοντέλων. Πηγή: [16]

	Προσδιοριστικά μοντέλα (Deterministic models)	Στοχαστικά μοντέλα (Stochastic models)
Καθοριστικά μοντέλα (Prescriptive models)	▪ Γραμμικός προγραμματισμός ▪ Ακέραιος προγραμματισμός ▪ Πολυστοχικός προγραμματισμός ▪ Προβλήματα δικτύων ▪ Δυναμικός προγραμματισμός	▪ Στοχαστικός προγραμματισμός
Περιγραφικά μοντέλα (Descriptive models)	▪ Διαφορικός λογισμός ▪ Διαφορικές εξισώσεις	▪ Στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις ▪ Θεωρία αναμονής ▪ Προσομοίωση

Στα προσδιοριστικά μοντέλα (deterministic models) οι τιμές των δεδομένων είναι σταθερές ποσότητες, έχουν δηλαδή καθορισμένες τιμές και στα στοχαστικά μοντέλα (stochastic models) οι τιμές των δεδομένων ακολουθούν κάποια στατιστική κατανομή. Σε ένα πραγματικό σύστημα είναι πρακτικά αδύνατο όλα τα δεδομένα να έχουν σταθερά προκαθορισμένη τιμή. Γι αυτό η προσέγγιση μιας στατιστικής κατανομής με μέση τιμή και τυπική απόκλιση μπορεί να προσφέρει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις.

Στα πλαίσια λοιπόν της Επιχειρησιακής Έρευνας, σχεδιάζονται και επιλύονται συστήματα με τεχνικές τέτοιες ώστε να δίνουν το βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία και βασίζονται στις αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού (mathematical programming) ταξινομούνται γενικά σε πέντε μεγάλες κατηγορίες:

1. Γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming – LP)
Το μαθηματικό πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού επιλύει το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων κάτω από περιορισμούς (constraints) που είναι γραμμικοί όροι. Ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την αποτελεσματική αντιμετώπιση διαφόρων πολύπλοκων προβλημάτων αποφάσεων. Η ποιότητα των αποφάσεων εξαρτάται από την ακρίβεια της περιγραφής της κατάστασης που μελετάται, καθώς και από την καταλληλότητα των προϋποθέσεων ή των απλουστεύσεων που επιβάλλονται. Εξαρτάται δηλαδή από την ακρίβεια της διατύπωσης του προβλήματος.
2. Μη-Γραμμικός προγραμματισμός (Non-Linear Programming – NLP)
Είναι οι πιο διαδεδομένες τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού. Αντιμετωπίζουν γενικώς όλες τις περιπτώσεις όπου η αντικειμενική συνάρτηση ή μερικοί από τους περιορισμούς είναι μη γραμμικές συναρτήσεις.
3. Ακέραιος προγραμματισμός (Integer Programming – IP)
Τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού αποτελούν ειδική περίπτωση των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Πρόκειται για προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, στα οποία υπάρχει ο περιορισμός ότι όλες ή κάποιες μεταβλητές είναι ακέραιες. Οι περιπτώσεις που δεν είναι όλες οι μεταβλητές ακέραιες οδηγούν στα προβλήματα «Μικτού Ακέραιου προγραμματισμού» (Mixed Integer Programming – MIP). Όταν σε προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού δεν είναι δυνατόν να εντοπιστεί λύση με χρήση μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού, τότε γίνεται επίλυση με μεθόδους όπως η «Μέθοδος κλάδου και φράγματος» (branch and bound), η «Μέθοδος της απαρίθμησης» (enumeration) και οι ευρεστικές-προσεγγιστικές μέθοδοι που παρουσιάζονται σε επόμενη παράγραφο.
4. Γεωμετρικός προγραμματισμός (Geometric Programming – GP)
Αναφέρεται σε μια ειδική κατηγορία προβλημάτων όπου οι συναρτήσεις περιορισμού αλλά και η αντικειμενική συνάρτηση είναι πολυωνυμικής μορφής συναρτήσεις.
5. Δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming – DP)
Κύριος στόχος αυτών των μεθόδων είναι να διασπασθεί ένα σχετικά μεγάλο και πολύπλοκο πρόβλημα σε μικρότερα τα οποία μπορούν να αντιμετωπισθούν ως ξεχωριστά προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού.

Εκτός όμως των μαθηματικών μεθόδων υπάρχουν και οι ευρεστικές μέθοδοι (heuristics), οι οποίες είναι προσεγγιστικές και εφαρμογή τους αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ένα ευρύ πεδίο προβλημάτων. Οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να είναι:

- η μέθοδος των στρατηγικών εξέλιξης (evolution strategies)
- η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms)
- η μέθοδος της προσομοίωσης (simulation)

Ο συνδυασμός των τεχνικών που αναφέρθηκαν αλλά και η κάθε μία τεχνική ξεχωριστά, μπορούν να δώσουν λύση σε πολλά προβλήματα μεταφορών. Για παράδειγμα, τόσο ο γραμμικός όσο και ο ακέραιος και ο δυναμικός προγραμματισμός εφαρμόζονται στα προβλήματα δικτύων. Τα προβλήματα δικτύων αφορούν «οποιοδήποτε συνδυασμό ανθρώπων, δραστηριοτήτων αλλά και αντικειμένων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με νοητές ή απτές διασυνδέσεις για την επίτευξη ενός έργου ή μεταφοράς». Σε πολλές περιπτώσεις όπου η επίλυση τους αποτελεί μια δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία, η επίλυση μπορεί να γίνει με χρήση των προσεγγιστικών μεθόδων.

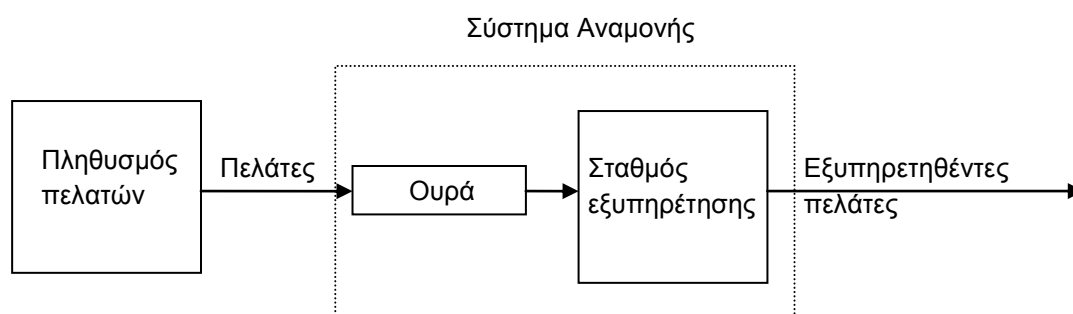
Λόγω της συνεχής αύξησης με έντονο ρυθμό των προκλήσεων στον τομέα προγραμματισμού και διαχείρισης ενός στόλου οχημάτων, που θα πραγματοποιούν μεταφορές, έχει γίνει μια προτυποποίηση προβλημάτων μεταφοράς. Τα κυριότερα πρότυπα προβλήματα της μορφής δικτύου είναι τα εξής:

- Πρόβλημα Διακίνησης (The Transshipment Problem)
- Πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή (The Travelling Salesman Problem)
- Προβλήματα προγραμματισμού και δρομολόγησης στόλου οχημάτων (Vehicle Routing and Scheduling Problems – VRP's)
- Πιθανοτικά προβλήματα προγραμματισμού και δρομολόγησης στόλου οχημάτων (Probabilistic Vehicle Routing and Scheduling Problems)

Όταν ολοκληρωθούν οι διαδικασίες ανάπτυξης του προβλήματος και επίλυσης του, θα πρέπει να ακολουθήσει η εφαρμογή και η αξιολόγηση της λύσης. Η λύση λοιπόν του προβλήματος συνοδεύεται από ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) των τιμών της. Εντοπίζονται με αυτό τον τρόπο, οι παράμετροι που είναι κρίσιμοι για την επίλυση του προβλήματος και η ευαισθησία της λύσης σε μεταβολή των παραμέτρων.

Από όλες τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν, η θεωρία αναμονής, ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός και η προσομοίωση συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη προτίμηση στη βιβλιογραφία, για επίλυση προβλημάτων στις λιμενικές εγκαταστάσεις.

Η θεωρία αναμονής (queueing theory) παρέχει ένα μεγάλο αριθμό μαθηματικών προτύπων για την περιγραφή των καταστάσεων των γραμμών αναμονής. Ένα βασικό σύστημα αναμονής μπορεί να περιγραφεί ως εξής: οι πελάτες φτάνουν για εξυπηρέτηση και στην περίπτωση που δεν είναι άμεσα διαθέσιμη περιμένουν για αυτήν στην ουρά αναμονής. Στην συνέχεια μετά την αναμονή τους στην ουρά φτάνουν σε έναν ή περισσότερους σταθμούς εξυπηρέτησης και μετά το πέρας της εξυπηρέτησης αυτής, αποχωρούν από το σύστημα (Εικόνα 2.1). Ο όρος πελάτης χρησιμοποιείται σε ευρύτερη έννοια και δεν εννοεί απαραίτητως τον ανθρώπινο πελάτη. Τα πιο συνηθισμένα στοχαστικά μοντέλα ουρών που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη διατύπωση προβλημάτων στις λιμενικές εγκαταστάσεις, υποθέτουν χρόνους άφιξης και εξυπηρέτησης των πελατών που ακολουθούν τις κατανομές Poisson και Erlang^[19].



Εικόνα 2. 1: Σύστημα αναμονής ενός σταθμού εξυπηρέτησης. Πηγή: [20]

Οι Edmond και Mags σε εργασία τους το 1978^[41], εξέτασαν κατά πόσο τα αποτελέσματα των μοντέλων αναμονής μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη λήψη αποφάσεων, για πραγματοποίηση επενδύσεων σε εγκαταστάσεις διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων. Χρησιμοποίησαν λοιπόν τα μοντέλα $M/M/s$, $D/M/s$ και $M/E_2/s$ και συμπέραναν ότι μερικά απλά μοντέλα αναμονής δίνουν μια καλή προσέγγιση σε ορισμένα μεγέθη σχεδιασμού.

Για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης ενός συστήματος με χρήση θεωρίας αναμονής είναι δυνατή η χρήση λογισμικών για γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά επιλογή κατάλληλου λογισμικού, το οποίο να μπορεί να περιγράψει το σύστημα και να μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα που επιθυμεί ο χρήστης. Παρακάτω δίνεται μια λίστα με λογισμικά τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν^[85].

Java Modelling Tools (<http://jmt.sourceforge.net/>)

Πρόκειται για μια σειρά εφαρμογών που αναπτύχθηκαν από το Πολυτεχνείο του Μιλάνο και το Imperial College του Λονδίνου και διατίθενται βάσει της άδειας GPL. Περιλαμβάνονται έξι εφαρμογές σε περιβάλλον Java οι οποίες εκτελούν προσομοιώσεις της θεωρίας αναμονής.

Solutions to Queueing Systems (<http://queueing-systems.ens-lyon.fr/>)

Παρουσιάζεται η αριθμητική επίλυση συστημάτων με ουρές αναμονής που περιγράφονται από τα μοντέλα $G/M/c$, $M/G/1$, $M/G/c$ και $G/G/c$.

Queueing Theory Calculator (<http://www.supositorio.com/rcalc/rcalclite.htm>)

Παρουσιάζεται η αριθμητική επίλυση συστημάτων με ουρές αναμονής που περιγράφονται από τα μοντέλα $M/M/c$, $M/M/\infty$, $M/M/c/K$ και $M/M/c/*M$.

Simple Queueing Demo (http://qswce.net/?page_id=358#SimpleQueueing)

Πρόκειται για ένα online λογισμικό το οποίο προσομοιώνει απλά συστήματα με χρήση θεωρία αναμονής και εξάγει αποτελέσματα. Γίνεται επιλογή των κατανομών άφιξης και εξυπηρέτησης που επιθυμεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει.

M/M/1 Queue Demo (<http://web.cs.dal.ca/~grundke/3171.2004.09/lectures/mm1/>)

Πρόκειται για μια εφαρμογή που προσομοιώνει ένα πρότυπο $M/M/1$.

M/M/1 Queues

(http://homepages.inf.ed.ac.uk/jeh/Simjava/queueing/mm1_q/mm1_q.html)

Πρόκειται για μια εφαρμογή που προσομοιώνει ένα πρότυπο $M/M/1$.

Queueing Networks

(<http://homepages.inf.ed.ac.uk/jeh/Simjava/queueing/Networks/networks.html>)

Αυτή η εφαρμογή επιτρέπει τον σχεδιασμό, την επίλυση και την προσομοίωση ενός συστήματος με χρήση της θεωρίας αναμονής.

Expokit (<http://www.maths.uq.edu.au/expokit/>)

Πρόκειται για ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί τις γλώσσες προγραμματισμού Matlab και Fortran και επιλύει μοντέλα με εκθετική κατανομή.

Qtsplus-xcel (ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/queueing_theory)

Πρόκειται για ένα λογισμικό το οποίο με χρήση του προγράμματος excel μπορεί να επιλύσει τους περισσότερους τύπους μοντέλων της θεωρίας αναμονής. Για την επίλυση των μοντέλων χρησιμοποιεί τους αναλυτικούς τύπους της θεωρίας αναμονής.

Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε στο επόμενο κεφάλαιο για την επίλυση μοντέλων λιμενικών εγκαταστάσεων.

Η μέθοδος της προσομοίωσης (simulation) έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία για την ανάλυση σύνθετων συστημάτων. Ένα λιμενικό σύστημα εμπορευματοκιβωτίων είναι σύνθετο λόγω των διαφορετικών χρόνων άφιξης των πλοίων, των διαφορετικών διαστάσεων των πλοίων, των πολλαπλών γερανογεφυρών και θέσεων παραβολής, των διαφορετικών ικανοτήτων και της παραγωγικότητας των γερανογεφυρών, της προνομιακής εξυπηρέτησης των πλοίων κτλ. Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ευελιξία που προσφέρει στο μελετητή ως προς τη διαμόρφωση του μοντέλου. Τα μοντέλα προσομοίωσης διακρίνονται ως εξής^[54] :

- Στατικά/Δυναμικά (Static/ Dynamic): 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.
- Συνεχή/Διακριτά (Continuous/Discrete): Σε ένα μοντέλο συνεχούς χρόνου η κατάσταση του συστήματος μπορεί να αλλάζει συνεχώς σε βάθος χρόνου. Αντιθέτως στα μοντέλα διακριτού χρόνου οι αλλαγές καταστάσεων συμβαίνουν μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές. Η συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων απεικονίζονται σε μοντέλου διακριτού χρόνου.
- Προσδιοριστικά/Στοχαστικά (Deterministic/Stochastic): Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα μοντέλα δίχως τυχαιότητα στα δεδομένα τους είναι προσδιοριστικά (ή ντετερμινιστικά), ενώ όταν τα δεδομένα τους ακολουθούν κάποια κατανομή είναι στοχαστικά.

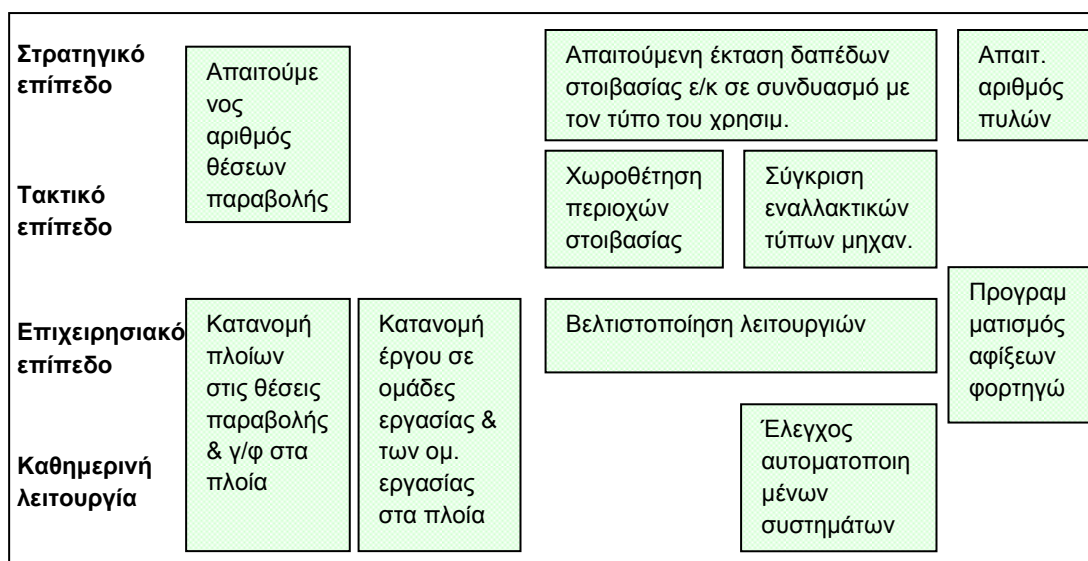
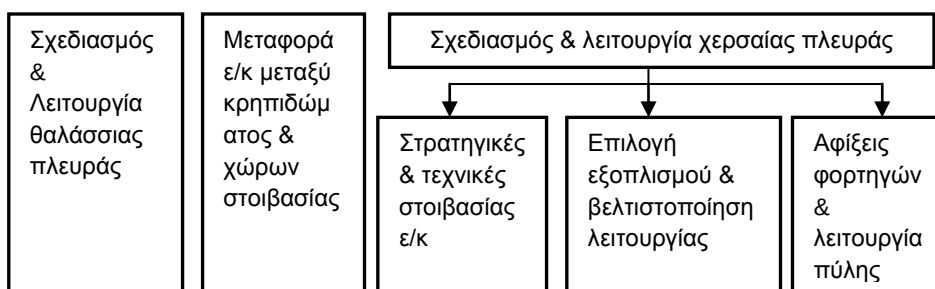
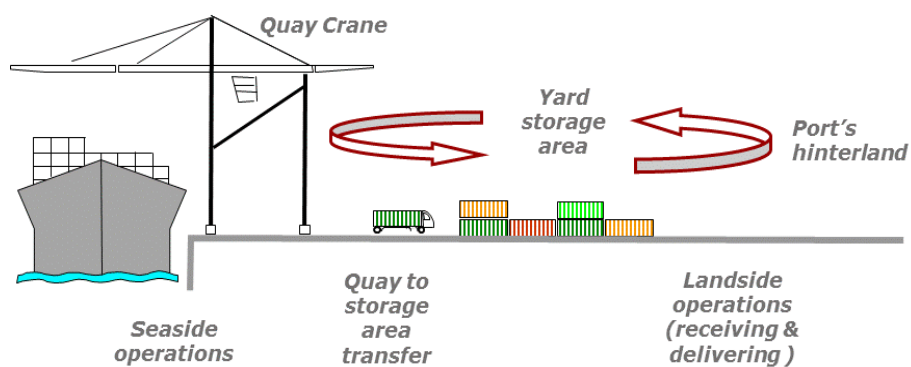
Η προσομοίωση μπορεί να υλοποιηθεί με το πείραμα του Monte Carlo, με κοινές γλώσσες προγραμματισμού (Fortran, Pascal, C/C++) και με γλώσσες προσομοίωσης (GPSS, Simscript, SLAM, SIMAN, AweSim). Η μέθοδος της προσομοίωσης περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Η ανάπτυξη ενός θαλάσσιου τερματικού σταθμού είναι συνήθως ένα μακροπρόθεσμο έργο που απαιτεί τη συνεχή λήψη αποφάσεων σε διάφορα επίπεδα^[94], τα οποία είναι το στρατηγικό, το τακτικό, το επιχειρησιακό επίπεδο και το επίπεδο που αφορά στην καθημερινή λειτουργία.

- Στο στρατηγικό επίπεδο, οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν αφορούν κυρίως στην τοποθεσία που θα φτιαχτεί το λιμάνι, στο μέγεθος του, στις πολυτροπικές διασυνδέσεις, και στο ρόλο του στο δίκτυο των μεταφορών. Ο χρονικός ορίζοντας των αποφάσεων αυτών μπορεί να είναι και μερικά χρόνια. Ορισμένες αποφάσεις στο επίπεδο αυτό, επιβάλλουν ένα αυστηρό πλαίσιο στις αποφάσεις που θα ληφθούν στα επόμενα επίπεδα. Για παράδειγμα, αν ληφθεί μια απόφαση στο στρατηγικό επίπεδο για την ανάπτυξη ενός μεγάλου λιμανιού με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης επιβάλλεται στο τακτικό επίπεδο η λήψη απόφασης για επιλογή προηγμένου εξοπλισμού.
- Στο τακτικό επίπεδο, οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν σχετίζονται με τις διαστάσεις και την τοποθεσία ποικίλων στοιχείων του χώρου του λιμανιού. Για παράδειγμα αφορούν στον αριθμό και στο μήκος των γερανογεφυρών κρηπιδώματος ή στην επιλογή του μηχανολογικού εξοπλισμού της χερσαίας πλευράς. Μπορούν επίσης να αφορούν στις διαστάσεις και στην κατανομή των χώρων αποθήκευσης και στοιβασίας ή στην εκτίμηση του αριθμού και της θέσης των πυλών εισόδων ή εξόδων στο λιμάνι. Ο χρονικός ορίζοντας αυτών των αποφάσεων μπορεί να είναι μερικοί μήνες. Επιπλέον μπορούν να ληφθούν ορισμένες ενδιάμεσες αποφάσεις που να αφορούν στην αποκλειστική διάθεση μιας ομάδας θέσεων παραβολής σε ορισμένους φορείς^[88].
- Στο επιχειρησιακό επίπεδο, οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν αφορούν στον προγραμματισμό της κατανομή των θέσεων παραβολής στα πλοία^[36], την εκχώρηση των γερανογεφυρών στις θέσεις παραβολής, τον προγραμματισμό στοιβασίας, την πολιτική αποθήκευσης και στοιβασίας, τον προγραμματισμό του εργατικού δυναμικού κ.α. Ο χρονικός ορίζοντας αυτών των αποφάσεων μπορεί να είναι μερικές μέρες του μήνα.
- Στο επίπεδο που αφορά την καθημερινή λειτουργία, οι αποφάσεις που λαμβάνονται αφορούν στον έλεγχο της λειτουργίας των οχημάτων και των γερανογεφυρών για κάθε λεπτό που περνάει. Στην περίπτωση που το λιμάνι έχει αυτοματοποιημένο εξοπλισμό οι καθημερινές αποφάσεις αφορούν κυρίως στα τεχνικά ζητήματα του συστήματος, όπως ο έλεγχος της ταχύτητας και η αποφυγή σύγκρουσης του εξοπλισμού^[36].

Η επόμενη εικόνα (Εικόνα 2.2) παρουσιάζει συνοπτικά μια επισκόπηση των βασικών προβλημάτων ενός τερματικού σταθμού στα διάφορα επίπεδα που αναφέρθηκαν παραπάνω.



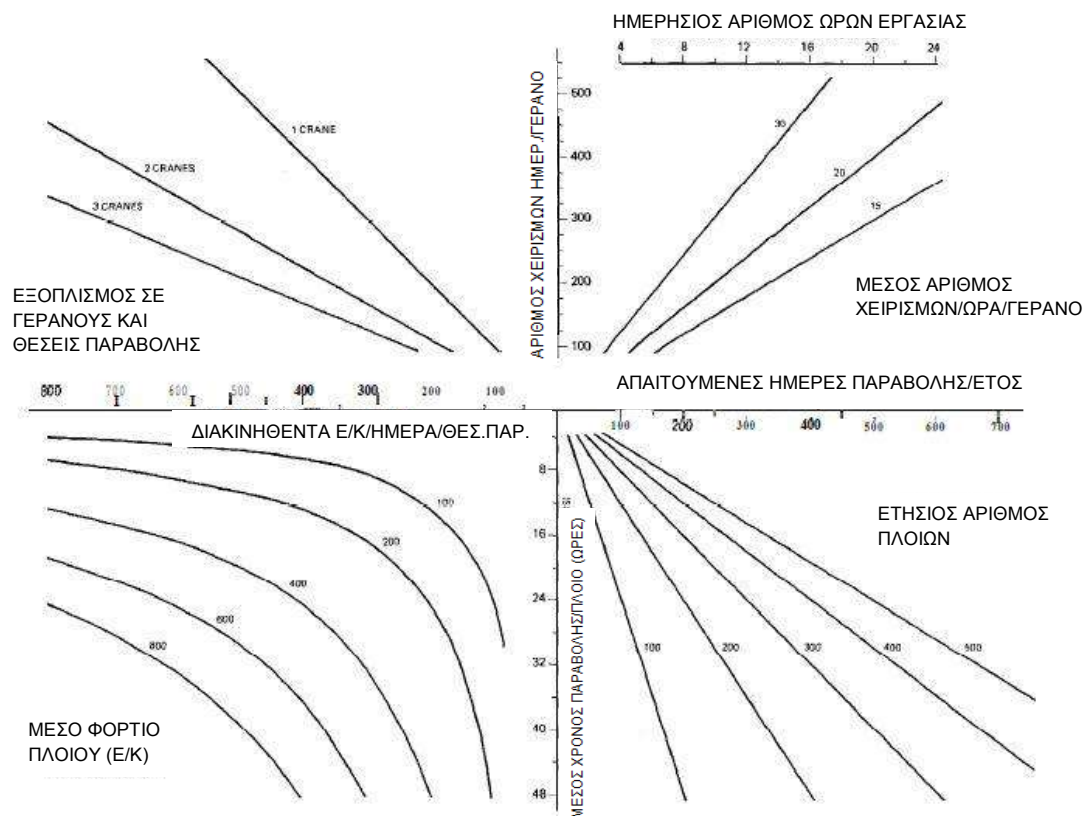
Εικόνα 2. 2: Βασικά προβλήματα λιμενικών εγκαταστάσεων. Πηγή: [29]

2.2.1 Σχεδιασμός και λειτουργία θαλάσσιας πλευράς

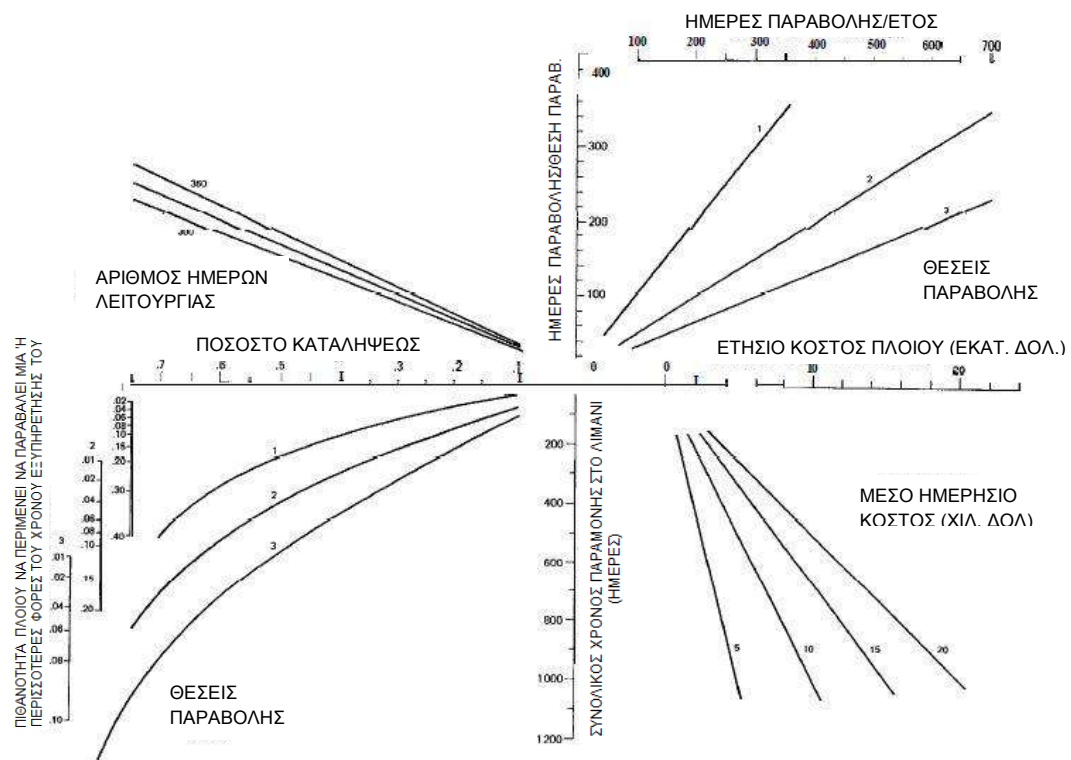
Ο σχεδιασμός της θαλάσσιας πλευράς στο στρατηγικό και τακτικό επίπεδο απαντά στο ερώτημα «Πόσες θέσεις παραβολής απαιτούνται για την αποτελεσματική λειτουργία του λιμανιού;», ενώ η λειτουργία της θαλάσσιας πλευράς στο επιχειρησιακό επίπεδο και στην καθημερινή λειτουργία αφορά στην κατανομή των πλοίων στις θέσεις παραβολής και στην κατανομή των γερανογεφυρών στα πλοία.

Ένα από τα πρώτα θέματα, χρονικά, που απασχόλησαν την επιστημονική κοινότητα ήταν η εύρεση του απαιτούμενου αριθμού θέσεων παραβολής σε ένα λιμάνι. Η πρώτη εργασία διεξήχθη από την «Βρετανική Ομοσπονδία Σιδήρου και Άνθρακα» (British Iron and Steel Federation – BISF) και μερικές ακόμη ενδιαφερόμενες εταιρίες χάλυβα στη Μεγάλη Βρετανία, όπου αναζήτησαν την βέλτιστη πολιτική, σε εθνική κλίμακα, για τις εισαγωγές σιδηρομεταλλευμάτων. Η σχετική μελέτη έγινε από το τμήμα της επιχειρησιακής έρευνας της «Βρετανικής Εταιρίας Έρευνας Σιδήρου και Άνθρακα» (British Iron and Steel Research Association – BISRA). Το πρόβλημα μελετήθηκε στο στάδιο της μεταφοράς του μεταλλεύματος δια θαλάσσης, στο στάδιο της εκφόρτωσης του μεταλλεύματος στους λιμένες και στο στάδιο της μεταφοράς στους αποθηκευτικούς χώρους. Κατά το 1951 λοιπόν πραγματοποιήθηκε η διεξοδική μελέτη της λειτουργίας εκφόρτωσης με μεθόδους επιχειρησιακής έρευνας (θεωρία αναμονής, προσομοίωση κλπ.) που οδήγησε στο εκπληκτικό για την εποχή συμπέρασμα ότι το συνολικό κόστος γινόταν ελάχιστο για βαθμό χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκφόρτωσης περίπου 50%^[20]. Στην μέθοδο της θεωρίας αναμονής τα πλοία είναι οι πελάτες του συστήματος ενώ οι θέσεις παραβολής αντιπροσωπεύουν τους σταθμούς εξυπηρέτησης. Τα συνήθη μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην θεωρία αναμονής για να περιγράψουν το σύστημα ενός λιμανιού είναι τα M/M/n, M/E₂/n και E₂/E₂/n^[36].

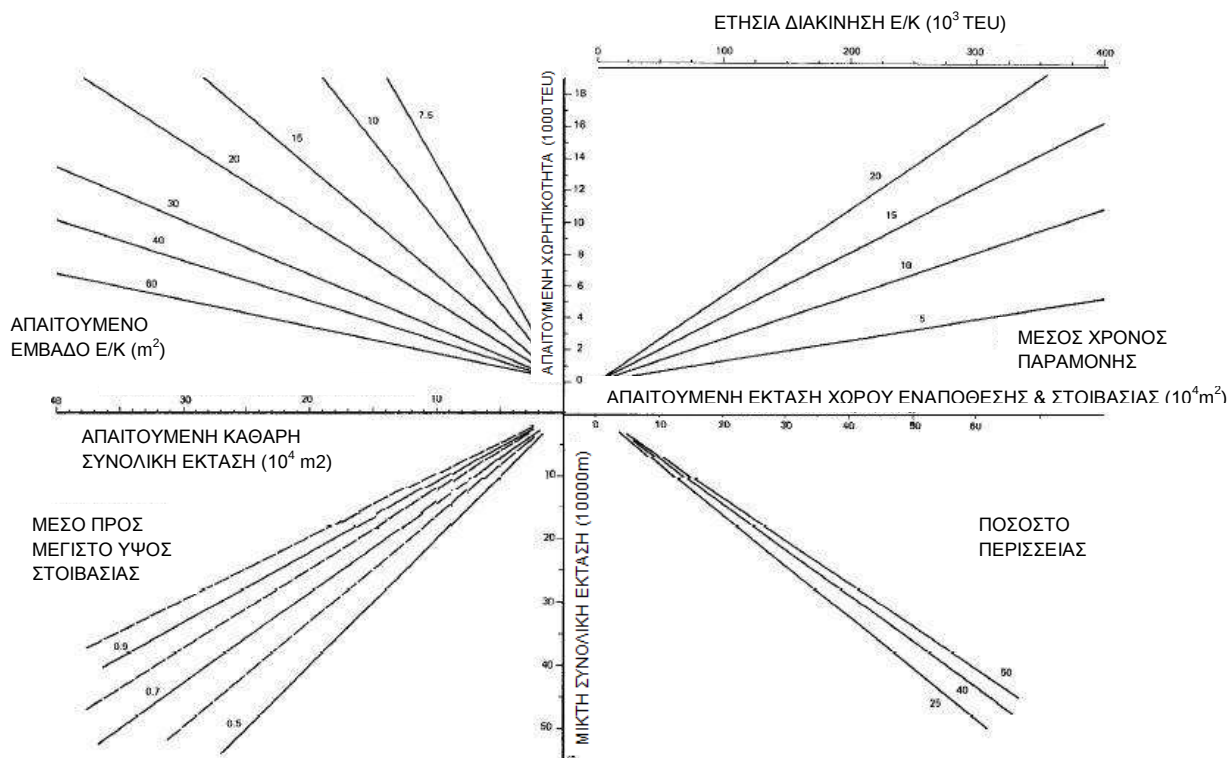
Σύμφωνα με το εγχειρίδιο ανάπτυξης λιμένων της Διάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη^[91] (United Nations Conference on Trade and Development – UNCTAD 1985), έχει προταθεί μέθοδος που έχει βάση της την θεωρία αναμονής και είναι απλοποιημένη όσον αφορά στην εφαρμογή της. Χρησιμοποιεί ως παραδοχή τον αριθμό των θέσεων παραβολής και επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων στο στρατηγικό επίπεδο. Η μέθοδος βασίζεται σε έναν αριθμό από νομογραφήματα που διευκολύνουν τους υπολογισμούς για την εύρεση του απαιτούμενου αριθμού θέσεων παραβολής (Σχήμα 2.1 και Σχήμα 2.2), το μέγεθος του χώρου στάθμευσης των εμπορευματοκιβωτίων και το μέγεθος του σταθμού μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων (Σχήμα 2.3). Με αυτό τον τρόπο ο σχεδιαστής έχει φτιάξει ένα προσχέδιο του κάθε τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις ικανότητες του σχεδιαστή, περιλαμβάνει βασικές παραμέτρους σχεδιασμού και η απλότητα και πληρότητα της την καθιστούν ένα πολύτιμο εργαλείο για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του λιμανιού.



Σχήμα 2. 1: Εύρεση απαιτούμενων ημερών παραβολής/έτος. Πηγή: [91]



Σχήμα 2. 2: Εύρεση απαιτούμενου αριθμού θέσεων παραβολής. Πηγή: [91]



Σχήμα 2. 3: Εύρεση απαιτούμενης έκτασης εναπόθεσης και στοιβασίας σε εκτάρια. Πηγή: [91]

Μετά το 1990, η έρευνα επικεντρώθηκε στο μαθηματικό προγραμματισμό και στην προσομοίωση αφού τα μοντέλα της θεωρίας αναμονής αδυνατούσαν να περιγράψουν κάποια χαρακτηριστικά του προβλήματος όπως ο διατιθέμενος χώρος για θέσεις παραβολής του τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων^[36]. Οι δημοσιευμένες εργασίες που αφορούν στο θέμα αυτό είναι περιορισμένες και περιλαμβάνουν τις εργασίες των Legato and Mazza (2001)^[63], Dragovic et al. (2006)^[40] και Bassan (2007)^[32]. Οι Legato και Mazza (2001) παρουσίασαν αρχικά, ένα μοντέλο βασισμένο στη θεωρία αναμονής, το οποίο περιγράφει τις διαδικασίες άφιξης πλοίων σε ένα λιμάνι, την εκχώρηση τους σε θέσεις παραβολής και την αναχώρησή τους. Όμως, η μη-σταθερή εξυπηρέτηση στο λιμάνι, οι διαφορετικοί χρόνοι εξυπηρέτησης λόγω προτεραιοτήτων και η περίπλοκη πολιτική που ακολουθούν τα λιμάνια όσον αφορά στην κατανομή των πόρων, αποτρέπει τη χρήση αναλυτικών μεθόδων για την επίλυση του μοντέλου. Υιοθετώντας λοιπόν την προσέγγιση που έγινε στο αρχικό μοντέλο, αναπτύχθηκε μοντέλο με βάση την τεχνική της προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Visual SLAM για ασυνεχή γεγονότα (discrete-event). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σταθερή κατάσταση (steady-state) έδειξαν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο με την προσέγγιση «τι θα γίνει αν – what if», ώστε να γίνεται εκτίμηση των επιπτώσεων της συμφόρησης στις θέσεις παραβολής. Ο Dragovic (2006) χρησιμοποίησε ένα μοντέλο με βάση τη θεωρία αναμονής και ένα άλλο μοντέλο με βάση την προσομοίωση για να εκτιμήσει την αποτελεσματικότητα των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων του Πουσάν στη Νότια Κορέα. Οι παράμετροι που χρησιμοποίησε για να αξιολογήσει τις λειτουργίες και τις διαδικασίες στο λιμάνι ήταν: ο βαθμός χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής, ο μέσος αριθμός των πλοίων που περίμεναν στην ουρά, ο μέσος χρόνος

που περιμένει το πλοίο στην ουρά, ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου, ο μέσος συνολικός χρόνος που παραμένει το πλοίο στο λιμάνι, η μέση παραγωγικότητα των γερανογεφυρών και ο μέσος αριθμός γερανογεφυρών που χρησιμοποιείται σε κάθε πλοίο. Για την επικύρωση και την επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης, τα αποτελέσματα του συγκρίθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα και προέκυψαν σε πλήρη συμφωνία. Στη συνέχεια, έγινε η αντιστοίχιση του μοντέλου της προσομοίωσης με το αναλυτικό μοντέλο ώστε να ελεγχθεί και σε αυτό η εγκυρότητα του. Προέκυψε αντιστοιχία των αποτελεσμάτων, επομένως επιτρέπει τη χρήση των συγκεκριμένων μοντέλων για βελτιστοποίηση των διαδικασιών εξυπηρέτησης των πλοίων. Τέλος ο Bassan (2007), προσπάθησε να επαναφέρει τη χρήση της θεωρίας αναμονής για τον σχεδιασμό των λιμανιών. Εισάγει τέσσερα μέτρα απόδοσης ώστε να καθιερώσει μια μεθοδολογία που να μπορεί να ποσοτικοποιήσει την ποιότητα των λειτουργιών του λιμανιού και να λειτουργεί ως ένα εργαλείο για αυτούς που πρέπει να πάρουν αποφάσεις, για να δικαιολογούν τις απαιτούμενες επενδύσεις.

Το πρόβλημα κατανομής των πλοίων στις θέσεις παραβολής (Berth Allocation Problem, BAP) είναι το πρόβλημα της ανάθεσης των πλοίων, που φτάνουν στο λιμάνι, στις θέσεις παραβολής του λιμανιού για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Η εκχώρηση των θέσεων παραβολής στα πλοία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε τερματικούς σταθμούς πολλαπλών χρηστών, δεδομένου ότι οι κακές επιλογές μπορούν να προκαλέσουν περιττές καθυστερήσεις στην εξυπηρέτηση των πλοίων και την επακόλουθη δυσαρέσκεια. Το πρόβλημα κατανομής των πλοίων μελετάται στο στρατηγικό, στο τακτικό και στο επιχειρησιακό επίπεδο σχεδιασμού του λιμανιού. Στο στρατηγικό επίπεδο ο αριθμός και το μήκος των θέσεων παραβολής και των γερανογεφυρών που πρέπει να είναι διαθέσιμα, είναι καθορισμένος. Στο τακτικό επίπεδο, το πρόβλημα αυτό αφορά ενδιάμεσες αποφάσεις, όπως η αποκλειστική διάθεση κάποιας ομάδας θέσεων παραβολής σε συγκεκριμένο τμήμα. Στο επιχειρησιακό επίπεδο, το πρόβλημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί η κατανομή των θέσεων παραβολής σε προγραμματισμένες αφίξεις πλοίων στο λιμάνι με χρονικό ορίζοντα μερικών ημερών. Το πρόβλημα κατανομής των πλοίων στις θέσεις παραβολής μπορεί να μελετηθεί και να διαμορφωθεί σύμφωνα με τις ακόλουθες παραλλαγές^{[88],[28]}:

- Συνεχής/Ασυνεχής χώρος θέσεων παραβολής. Τα μοντέλα που θεωρούν ασυνεχή χώρο θέσεων παραβολής (district berth space), θεωρούν ότι ο χώρος διαιρείται σε ένα σύνολο τμημάτων (θέσεις παραβολής), όπου κάθε θέση παραβολής καταλαμβάνεται το πολύ από ένα πλοίο σε μια στιγμή. Αντίθετα, τα μοντέλα που θεωρούν συνεχή χώρο θέσεων παραβολής (continuous berthing space), θεωρούν τον χώρο σαν μια γραμμική εγκατάσταση όπου τα πλοία μπορούν να παραβάλλουν οπουδήποτε (πολλά πλοία μπορούν να παραβάλλουν και ταυτόχρονα). Το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκο αν πρέπει να ληφθούν υπόψη τεχνικοί περιορισμοί όπως το βάθος παρά το κρηπίδωμα.
- Στατικές/Δυναμικές αφίξεις πλοίων. Η στατική παραλλαγή (Static Berth Allocation Problem, SBAP) θεωρεί τα πλοία διαθέσιμα για να παραβάλλουν στο λιμάνι σε σταθερές χρονικές περιόδους. Ο χρόνος δηλαδή, είναι εξαρτημένη μεταβλητή. Ενώ η δυναμική παραλλαγή (Dynamic Berth

Allocation Problem, DBAP) επιτρέπει την άφιξη των πλοίων να γίνεται σε διαφορετικούς χρόνους (όμως οι χρόνοι άφιξης να είναι γνωστοί, εκ των προτέρων). Ο χρόνος στην περίπτωση αυτή είναι ανεξάρτητη μεταβλητή.

- Στατικό/Δυναμικό χρόνο εξυπηρέτησης. Ο χρόνος εξυπηρέτησης σε κάθε θέση παραβολής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Οι δύο πιο σημαντικοί είναι ο αριθμός των γερανογεφυρών που λειτουργούν σε κάθε πλοίο και η απόσταση από την προνομιούχα θέση. Η προνομιούχα θέση παραβολής είναι συνήθως η θέση με την ελάχιστη απόσταση από τον αποθηκευτικό χώρο. Η στατική (static) περίπτωση θεωρεί σταθερούς και γνωστούς χρόνους χειρισμού του πλοίου. Αντίθετα η δυναμική (dynamic) περίπτωση θεωρεί ότι οι χρόνοι χειρισμού του πλοίου προσδιορίζονται σύμφωνα με τον αριθμό των γερανογεφυρών που λειτουργούν σε κάθε πλοίο και επηρεάζονται από την απόσταση της θέσης παραβολής που είναι το πλοίο από την προνομιούχα θέση παραβολής.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί, ένα ευρύ φάσμα μεθόδους βελτιστοποίησης και μαθηματικές προσεγγίσεις για να επιλύσει το πρόβλημα κατανομής των πλοίων στις θέσεις παραβολής (BAP). Οι στατικές και δυναμικές περιπτώσεις μαζί με τις συνεχείς και ασυνεχείς περιπτώσεις έχουν ευρέως μελετηθεί σε διαφορετικούς συνδυασμούς. Επίσης έχουν αναπτυχθεί μοντέλα για τον προγραμματισμό των γερανογεφυρών κρηπιδώματος (Quay Crane Scheduling Problem – QCSP). Τα πλοία αποτελούνται από ένα αριθμό από τμήματα όπου σε κάθε τμήμα μπορεί να είναι μόνο μία γερανογέφυρα τη φορά. Καθώς οι γερανογέφυρες είναι τοποθετημένες στην ίδια θέση παραβολής και λειτουργούν σε κοινές σιδηροτροχιές, δεν μπορεί να προσπεράσει η μία την άλλη. Το πρόβλημα προγραμματισμού των γερανογεφυρών έχει μελετηθεί για στατικά και δυναμικά μοντέλα. Στην πράξη ο προγραμματισμός των θέσεων παραβολής και ο προγραμματισμός των γερανογεφυρών μελετάται διαδοχικά από τους φορείς διαχείρισης του τερματικού σταθμού. Δηλαδή, προσδιορίζουν πρώτα το πρόγραμμα των θέσεων παραβολής χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις για το κάθε πλοίο και έπειτα προσπαθούν να κατανείμουν τις γερανογέφυρες στα πλοία^[28].

Επίσης, έχει μελετηθεί και ταυτοχρόνως ο προγραμματισμός των θέσεων παραβολής και των γερανογεφυρών (Berth and Quay Crane Scheduling Problem – BQCSP) από τους Park και Kim (2003)^[71]. Οι Park και Kim (2003) λοιπόν, διατύπωσαν ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού (IP), εξετάζοντας κάθε φορά διαφορετικούς πρακτικούς περιορισμούς. Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, πρότειναν την επίλυση με μια διαδικασία δύο φάσεων. Η πρώτη φάση καθορίζει τη θέση παραβολής και την ώρα που φτάνει το πλοίο καθώς και τον αριθμό των γερανογεφυρών που θα εκχωρηθούν στο κάθε τμήμα του. Η τεχνική αυτή βελτιστοποίησης εφαρμόζεται για να ληφθεί μια αρχική, σχεδόν βέλτιστη λύση κατά την πρώτη φάση. Στη δεύτερη φάση, κατασκευάστηκε ένα λεπτομερές χρονοδιάγραμμα για κάθε γερανογέφυρα, σύμφωνα όμως με τη λύση που βρέθηκε στην πρώτη φάση. Για την επίλυση της δεύτερης φάσης εφαρμόστηκε η τεχνική του δυναμικού προγραμματισμού (DP). Διεξάχθηκε λοιπόν ένας αριθμός από πειράματα, για να ελέγξουν την απόδοση των αλγορίθμων που διατύπωσαν.

Οι Theofanis et al. (2009)^[88] εξέτασαν περισσότερες από 50 υφιστάμενες δημοσιεύσεις σχετικά με τις διάφορες παραλλαγές στο πρόβλημα κατανομής των πλοίων στις θέσεις παραβολής (BAP). Συμπέραναν ότι οι περισσότερες μελέτες προσπάθησαν να ελαχιστοποιήσουν τη συνολική εξυπηρέτηση, το χρόνο αναμονής και τον διαχωρισμό των προνομιούχων θέσεων από τις υπόλοιπες, αφού αναμένεται ότι η ελαχιστοποίηση των προνομιούχων θέσεων, θα μειώσει τον χρόνο εξυπηρέτησης και τα λειτουργικά κόστη. Οι στόχοι αυτοί ικανοποιούν τους φορείς διαχείρισης του λιμανιού όμως αποτυγχάνουν να απεικονίσουν τις συμφωνίες προτεραιότητας εξυπηρέτησης. Επίσης παρουσίασαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των υφιστάμενων μοντέλων να περιγράψουν τις πραγματικές συνθήκες σε ένα σύστημα και πρότειναν κάποιες ιδέες για μελλοντικές εκδόσεις των δημοσιεύσεων.

Οι συμφωνίες εξυπηρέτησης μεταξύ των ναυτιλιακών εταιριών και των διαχειριστών του λιμανιού, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία των λιμένων: τα συμβόλαια συνήθως περιλαμβάνουν προδιαγραφές με στόχο τη διασφάλιση γρήγορου χειρισμού του πλοίου της συγκεκριμένης ναυτιλιακής εταιρίας, με την επιβολή μιας ελάχιστης παραγωγικότητας στο κρηπίδωμα (για παράδειγμα 120 TEU την ώρα/το πλοίο), ή με την επιβολή ενός αριθμού γερανογεφυρών που θα χρησιμοποιηθούν. Οι καθυστερήσεις στο λιμάνι, όχι μόνο μειώνουν την αξιοπιστία της παρεχόμενης εξυπηρέτησης αλλά μπορούν επίσης να επιβαρύνουν τον πελάτη με επιπλέον κόστη στην εφοδιαστική αλυσίδα, ως συνέπεια των πρόσθετων εξόδων απογραφής και σε ορισμένες περιπτώσεις των πρόσθετων εξόδων παραγωγής (για παράδειγμα μια παραγωγή σταματά εξαιτίας της καθυστέρησης της διανομής των υλικών). Για τους παραπάνω λόγους, οι ναυτιλιακές αγορές και οι αγορές μεταφορών έχουν αναπτύξει μηχανισμούς τιμολόγησης για να προβλέψουν προσδοκώμενες καθυστερήσεις (π.χ. επιβαρύνσεις λόγω συμφόρησης) ή καθυστερήσεις εκ των υστέρων (τέλη υπεραναμονής). Οι φορείς διαχείρισης του λιμανιού λοιπόν, για να αντισταθμίσουν τον εντατικό φόρτο εργασίας με τις κυρώσεις, ζητούν συνήθως εγγυήσεις από τις ναυτιλιακές εταιρίες όσον αφορά στην ελάχιστη διακίνηση^{[68],[8]}. Επίσης, οι φορείς διαχείρισης του λιμανιού μπορεί να ζητήσουν προμηθευτές αν οι λειτουργίες στο πλοίο ολοκληρωθούν νωρίτερα από το συμφωνηθέντα χρόνο. Παρόλο που σπάνια αναφέρεται κάποιο πλοίο να αναχωρεί νωρίτερα από το συμφωνηθέν, η νωρίτερα αποχώρηση είναι ευνοϊκή καθώς παρέχει ρύθμιση του χρόνου ώστε να αντιμετωπιστούν απροσδόκητες καθυστερήσεις στο επόμενο τμήμα του ταξιδιού επιστροφής. Πρόσφατα, ορισμένα μοντέλα επιχειρήσαν να λάβουν υπόψη τους τις συμφωνίες παροχής υπηρεσιών μεταξύ του φορέα διαχείρισης του λιμανιού και των ναυτιλιακών εταιριών^{[47],[45]}

2.2.2 Μεταφορά ε/κ μεταξύ κρηπιδώματος και χώρων στοιβασίας

Σε μια τυπική μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων από το κρηπίδωμα στους χώρους στοιβασίας, τα εισαγόμενα εμπορευματοκιβώτια εκφορτώνονται από τα πλοία με χρήση γερανογεφυρών κρηπιδώματος, μεταφέρονται στη συνέχεια στο χώρο στοιβασίας και τοποθετούνται στο έδαφος ή στοιβάζονται πάνω σε άλλα εμπορευματοκιβώτια. Η αντίστροφη λειτουργία συμβαίνει στα εξαγόμενα εμπορευματοκιβώτια. Οι παραπάνω διαδικασίες εκτελούνται με διάφορους τύπους μηχανολογικού εξοπλισμού και διάφορους τρόπους διαμόρφωσης του, με ποικίλους

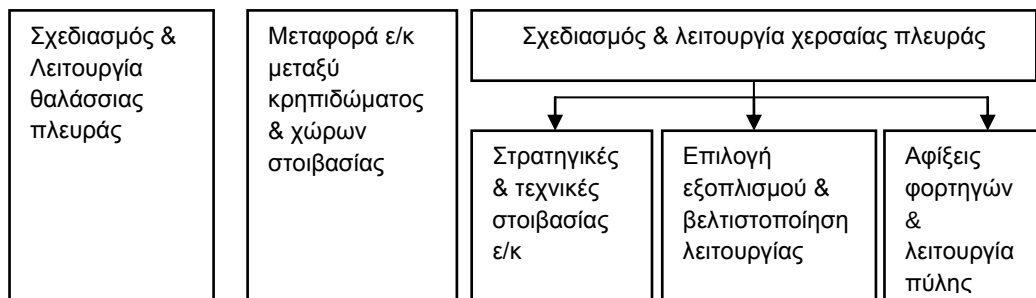
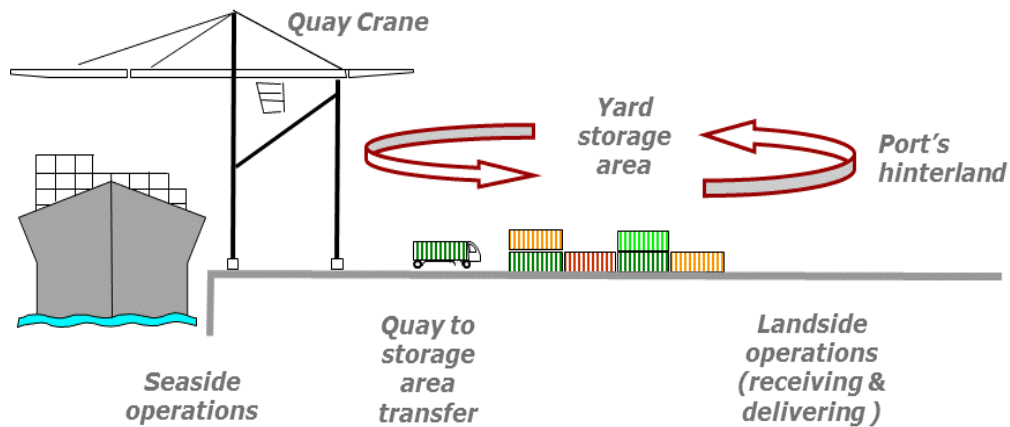
τρόπους προγραμματισμού της φόρτωσης/εκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων και ανάθεσης του εξοπλισμού και με αρχές προτεραιότητας εξυπηρέτησης. Πλήθος ερευνητικών εργασιών έχουν διεξαχθεί με σκοπό να μελετήσουν αυτό το υποσύστημα και να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση του. Καθυστερήσεις στο ενδιαμέσο αυτό τμήμα έχουν ως αποτέλεσμα καθυστερήσεις σε ολόκληρο το σύστημα του λιμανιού, γι' αυτό και η βελτιστοποίηση του έχει μελετηθεί διεξοδικά. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι εξοπλισμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, η διαμόρφωση τους και οι στρατηγικές που μπορούν να ακολουθήσουν σύμφωνα με όσα έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία. Επίσης παρουσιάζονται συνοπτικά ερευνητικές εργασίες που μελετούν αυτό το υποσύστημα και οι τεχνικές που χρησιμοποίησαν για να το προσεγγίσουν. Επιγραμματικά οι τεχνικές αυτές είναι: αναλυτικοί υπολογισμοί, προσομοίωση, ευρεστικές μέθοδοι, μέθοδος κλάδου φράγματος και γενετικοί αλγόριθμοι.

2.2.3 Σχεδιασμός και λειτουργία χερσαίας πλευράς

Ο σχεδιασμός της χερσαίας πλευράς στο στρατηγικό και τακτικό επίπεδο αφορά στην εύρεση της απαιτούμενης έκτασης των δαπέδων στοιβάδας των εμπορευματοκιβωτίων και στην χωροθέτηση των διάφορων περιοχών στοιβάδας, στον απαιτούμενο αριθμό πυλών του λιμανιού και στην εύρεση των εναλλακτικών τύπων του μηχανολογικού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί. Η ύπαρξη μεγάλων χώρων στοιβάδας είναι απαραίτητη για τους λιμενικούς τερματικούς σταθμούς Lo-Lo, γιατί τα εμπορευματοκιβώτια χρειάζεται να παραμείνουν για μεγάλο διάστημα, πριν και μετά την άφιξη του πλοίου. Ενώ η λειτουργία της χερσαίας πλευράς στο επιχειρησιακό επίπεδο και στην καθημερινή λειτουργία αφορά στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών, στον έλεγχο των αυτοματοποιημένων συστημάτων που υπάρχουν και στον προγραμματισμό της άφιξης των φορτηγών στις πύλες του λιμανιού.

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ανησυχίες για τις καθυστερήσεις των φορτηγών στην πύλη. Η έρευνα του Strauss (2002)^[84] για τα λιμάνια έδειξε ότι το 40% των καλύτερων λιμανιών στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν αναφέρει την πύλη εισόδου ως απαράδεκτη. Αναγνωρίζοντας το πρόβλημα των καθυστερήσεων των φορτηγών στις πύλες, τα λιμενικά γραφεία έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές στρατηγικές, που περιλαμβάνουν συστήματα ραντεβού των φορτηγών στις πύλες και εκτεταμένα ωράρια, για να μειώσουν τις καθυστερήσεις. Μια από τις πιο παλιές εργασίες επί του θέματος ήταν αυτή του Hatzitheodorou (1983)^[48], όπου μελέτησε το σχεδιασμό της πύλης στο στρατηγικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας την θεωρία αναμονής. Η θεωρία αναμονής και η προσομοίωση έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς από ερευνητές που μελέτησαν τη συμπεριφορά των αφίξεων των φορτηγών στην πύλη, τα συστήματα ραντεβού, τη χάραξη πολιτικής και τις δημοσιονομικές προοπτικές του υποσυστήματος της πύλης. Ο Tsai (2010)^[89] πραγματοποίησε μια επισκόπηση των τεχνικών που αφορούν στον σχεδιασμό και στην λειτουργία της πύλης.

Κάνοντας λοιπόν μια επισκόπηση όλων των μαθηματικών προσεγγίσεων και των μοντέλων που έχουν χρησιμοποιηθεί, από διάφορους συγγραφείς, για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία λιμενικών εγκαταστάσεων προκύπτει η Εικόνα 2.3.



Θεωρία αναμονής	Αναλυτικοί υπολογισμοί	Αναλυτικοί υπολογισμοί		Θεωρία αναμονής
Single processor scheduling	Προσομοίωση		Προσομοίωση	Προσομοίωση
2D packaging	Προβλήματα ανάθεσης εργασίας			
Μικτός ακέραιος προγραμματισμός (MIP): ευρεστικές μέθοδοι, προσομοίωση ανόπτησης, βελτιστοποίηση, γενετικοί αλγόριθμοι	IP, MIP (ευρεστικές μέθοδοι, μέθοδος κλάδου και φράγματος, γενετικοί αλγόριθμοι)		Γραμμικός προγραμματισμός (IP) και Μικτός ακέραιος προγραμματισμός (MIP)	

Εικόνα 2. 3: Επισκόπηση των προσεγγίσεων για το σχεδιασμό και τη λειτουργία λιμενικών εγκαταστάσεων. Πηγή: [29]

2.3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΣΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΚΡΗΠΙΔΩΜΑΤΟΣ – ΧΩΡΟΣ ΣΤΟΙΒΑΣΙΑΣ

2.3.1 Τύποι και εναλλακτικές διαμορφώσεις του εξοπλισμού μεταξύ κρηπιδώματος και χώρου στοιβασίας

Ένας σύγχρονος τερματικός σταθμός κατακόρυφης φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων (Lo-Lo Container Terminal), μπορεί να αποτελείται από ποικίλους τύπους εξοπλισμού, που να εκτελούν τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης, μεταφοράς και στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων. Ενδεικτικά ο εξοπλισμός αυτός μπορεί να είναι: γερανογέφυρες κρηπιδώματος (quay cranes), οχήματα πλαίσια (straddle carriers), γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών (rail mounted gantry cranes – RMG), γερανογέφυρες επί ελαστικών τροχών (rubber tired gantry cranes – RTG), οχήματα εμπρόσθιας στοιβασίας (reach stackers), ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις ή φορτηγά (yard trucks), ελκυστήρες με δυνατότητα ρυμούλκησης πολλών τρέιλερ (multi – trailers), αυτόματα οχήματα μεταφοράς (automated guided vehicles – AGV), αυτόματα οχήματα ανύψωσης (automated lifting vehicles – ALV) κτλ. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται περισσότεροι από έναν τύπο εξοπλισμού για την ίδια λειτουργία. Ο όρος «όχημα μεταφοράς» (transfer vehicle) χρησιμοποιείται για τους ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις, τους ελκυστήρες με δυνατότητα ρυμούλκησης πολλών τρέιλερ ή τα αυτόματα οχήματα ανύψωσης, ενώ ο όρος «γερανογέφυρες χερσαίας πλευράς» (yard crane) χρησιμοποιείται για τα οχήματα πλαίσια, τις γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών, τις γερανογέφυρες επί ελαστικών, τα οχήματα εμπρόσθιας στοιβασίας κτλ. Ωστόσο όταν ένα όχημα πλαίσιο λειτουργεί ως όχημα μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων από τις γερανογέφυρες κρηπιδώματος στους χώρους στοιβασίας, τότε θα χαρακτηρίζεται ως όχημα μεταφοράς.

Όταν κατασκευάζεται ένα μοντέλο που θα περιγράφει τις διαδικασίες μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας ή αντίστροφα, τα οχήματα πλαίσια αποτελούν το ευκολότερο όχημα για μοντελοποίηση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα οχήματα πλαίσια έχουν την δυνατότητα να αποσυνδέουν τις λειτουργίες τους από τις γερανογέφυρες. Μπορούν δηλαδή από μόνα τους να πάρουν ένα εμπορευματοκιβώτιο, να ακολουθήσουν μια διαδρομή και να το εναποθέσουν όπου απαιτείται. Αντίθετα, τα φορτηγά, τα πολύ – ρυμουλκά και τα αυτόματα οχήματα μεταφοράς απαιτούν συγχρονισμό με τις γερανογέφυρες κρηπιδώματος και με τις γερανογέφυρες στην χερσαία πλευρά. Τα αυτόματα οχήματα ανύψωσης μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα είτε στην περιοχή κρηπιδώματος είτε στην χερσαία πλευρά. Όμως τα οχήματα αυτά μπορούν να χειριστούν τα εμπορευματοκιβώτια μόνο στο επίπεδο του εδάφους, καθώς υπάρχει όριο στην αυτόνομη λειτουργία τους. Σε πολλές προσεγγίσεις μοντελοποίησης, ιδίως προσομοίωσης, ο εξοπλισμός χειρισμού των εμπορευματοκιβωτίων παρουσιάζεται ως ανεξάρτητες οντότητες, ενώ σε άλλες προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται άλλες μορφές^[30]. Για παράδειγμα:

- Η λειτουργία μιας γερανογέφυρας κρηπίδωματος μπορεί να διαμορφωθεί μέσα από τις χρονικές στιγμές που πρέπει να πάρει ή να αφήσει ένα εμπορευματοκιβώτιο στο φορτηγό.
- Οι λειτουργίες χειρισμού και στοιβασίας των γερανογεφυρών στους χώρους αποθήκευσης αντικαθίσταται από (σταθερό ή γνωστό) χρόνο κύκλου εξυπηρέτησης. Σε πολλά μοντέλα, η παραδοχή ότι υπάρχει πάντα ένα διαθέσιμο φορτηγό στους χώρους αποθήκευσης έτοιμο να ξεκινήσει την λειτουργία του, εξαλείφει την ανάγκη για ανεξάρτητη αντιπροσώπευση από τις γερανογέφυρες στην χερσαία πλευρά.

Οι παραπάνω απλοποιήσεις έχουν οδηγήσει σε αποκλίσεις από τις πραγματικές λειτουργίες. Για παράδειγμα, όταν ένα φορτηγό δεν είναι στην ώρα του κάτω από τη γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα για να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο, ο κύκλος φόρτωσης/εκφόρτωσης διαταράσσεται και κατά συνέπεια δημιουργούνται καθυστερήσεις και σε μεταγενέστερες λειτουργίες. Βέβαια, η γερανογέφυρα μπορεί να εναποθέσει προσωρινά το εμπορευματοκιβώτιο στο κρηπίδωμα και να συνεχίσει την εκφόρτωση, όμως ακόμα και τότε οι καθυστερήσεις δεν μπορούν να αποφευχθούν. Η ίδια αναστάτωση και οι καθυστερήσεις μπορούν να συμβούν στους αποθηκευτικούς χώρους που η εξυπηρέτηση γίνεται από γερανογέφυρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ένα μοντέλο προσομοίωσης όλες οι παραπάνω συμπεριφορές μπορούν εύκολα να ληφθούν υπόψη, ενώ στις τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού η διαμόρφωση του προβλήματος είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Όσον αφορά στην επίδραση που μπορεί να έχει η παραπάνω παραδοχή στα αποτελέσματα του μοντέλου, η απάντηση δεν είναι εύκολη ούτε μπορεί να δοθεί απευθείας, αλλά εξαρτάται από τη διαμόρφωση του εξοπλισμού και την σκοπιά της ανάλυσης που γίνεται. Όταν, για παράδειγμα, η έρευνα αποσκοπεί στον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού φορτηγών, μια τέτοια παραδοχή θα έφερνε λανθασμένα αποτελέσματα. Όμως, αν η έρευνα αποσκοπούσε στη σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων ανάθεσης εργασιών και ένας καθορισμένος αριθμός φορτηγών έχει εκχωρηθεί στην γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα, τότε τα αποτελέσματα δεν θα επηρεάζονταν σε σημαντικό βαθμό.

Γενικά ο χρόνος κύκλου μιας εξυπηρέτησης^[19] προκύπτει ως άθροισμα των εξής επιμέρους τμημάτων:

- Απαιτούμενος χρόνος για τις μετακινήσεις του οχήματος στους χώρους της τερματικής εγκατάστασης καθώς και απαιτούμενος χρόνος για την παραλαβή/εναπόθεση και τη μεταφόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου.
- Απώλειες χρόνου λόγω έλλειψης συγχρονισμού μεταξύ των οχημάτων του συστήματος.
- Απώλειες χρόνου λόγω κυκλοφοριακών εμπλοκών μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στο εσωτερικό οδικό δίκτυο της λιμενικής εγκατάστασης.
- Απώλειες χρόνου λόγω των (κατά περίπτωση) απαιτούμενων ενεργειών για την αναδιάρθρωση άλλων υπερκείμενων εμπορευματοκιβωτίων ώστε να αποκτηθεί πρόσβαση στο ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Ο απαιτούμενος χρόνος για τις μετακινήσεις του οχήματος στους χώρους της τερματικής εγκατάστασης σύμφωνα με τους Rendel, Palmer, Tritton^[73] δίνεται από την εξής σχέση:

$$T = \alpha + d / s$$

όπου:

T = απαιτούμενος χρόνος κύκλου της εργασίας

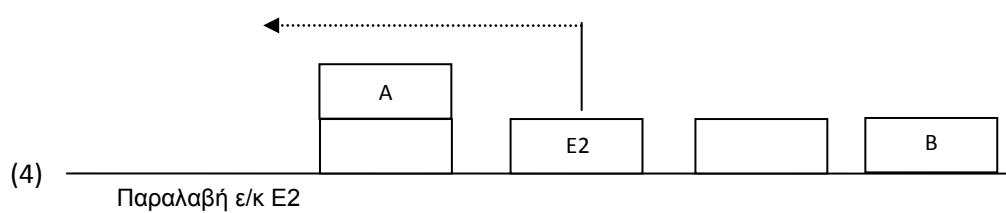
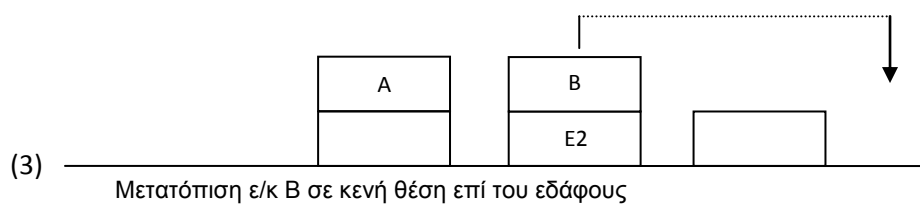
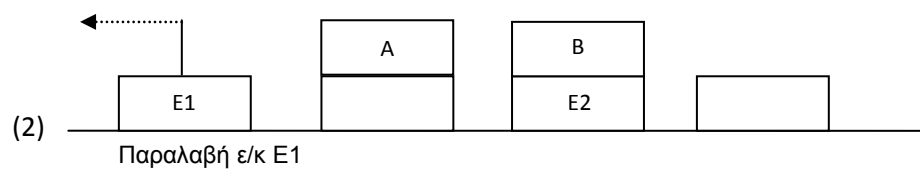
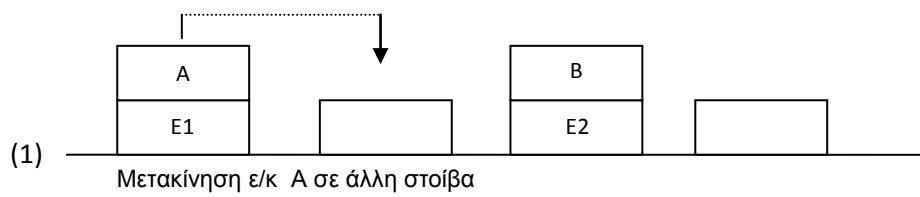
α = σταθερή τιμή, που περιλαμβάνει τις απώλειες χρόνων λόγω επιτάχυνσης/επιβράδυνσης και τους χρόνους ελιγμών για τη μεταφόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου

d = η απόσταση μετακίνησης του οχήματος που καθορίζεται από τα σημεία προέλευσης και προορισμού του εμπορευματοκιβωτίου. Όλες οι μετακινήσεις αναφέρονται σε εσωτερικό οδικό δίκτυο που καθορίζεται από το χρήστη. Στην περίπτωση εναλλακτικών διαδρομών, επιλέγεται η συντομότερη.

s = μέση ταχύτητα μετακίνησης του οχήματος

Οι απώλειες του χρόνου λόγω συγχρονισμού του υπό εξέταση οχήματος με συνεργαζόμενα οχήματα και οι απώλειες χρόνου λόγω κυκλοφοριακών εμπλοκών μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στο εσωτερικό οδικό δίκτυο της λιμενικής εγκατάστασης αντιμετωπίζονται ανάλογα με τη δομή του συστήματος και τον τύπο των οχημάτων/εξοπλισμού που χρησιμοποιεί η λιμενική εγκατάσταση.

Οι απώλειες χρόνου λόγω αναδιάταξης εμπορευματοκιβωτίων οφείλονται στις αλλαγές των θέσεων των εμπορευματοκιβωτίων ώστε να υπάρξει πρόσβαση σε εμπορευματοκιβώτιο που δεν είναι στη κορυφή της στοίβας και είναι ζητούμενο. Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται οι απαιτούμενες αναδιατάξεις ώστε να παραληφθούν συγκεκριμένα εμπορευματοκιβώτια. Οι κινήσεις αναδιάταξης είναι λογικό επακόλουθο της στοιβασίας των εμπορευματοκιβωτίων σε δύο ή περισσότερες στρώσεις καθ' ύψος, που με τη σειρά της είναι επακόλουθο της έλλειψης επαρκούς χώρου για την εναπόθεση όλων των εμπορευματοκιβωτίων σε μια στρώση. Σε κάθε λιμενική τερματική εγκατάσταση το “πλάνο φορτοεκφόρτωσης”, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο οργανώνονται οι χώροι στοιβασίας και τα κριτήρια διαχωρισμού των εμπορευματοκιβωτίων είναι διαφορετικό και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με βασικότερο όλων την έκταση και τη διαμόρφωση που έχουν οι χώροι στοιβασίας.



Σχήμα 2. 4: Απαιτούμενες αναδιατάξεις ώστε να πραγματοποιηθεί η παραλαβή των ε/κ E1 και E2. Πηγή: [19]

Ο υπολογισμός των απωλειών χρόνου λόγω αναδιάταξης εμπορευματοκιβωτίων ανάγεται στον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης του ενδεχόμενου αυτού. Οι Rendel, Palmer, Tritton^[73] χρησιμοποιούν μια επαναληπτική διαδικασία βασισμένη στη διωνυμική κατανομή, (δειγματοληψία χωρίς επανατοποθέτηση) όπου ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στον σχηματισμό υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε νέα δειγματοληψία. Η πιθανότητα λοιπόν να υπάρχουν k εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα είναι:

$$P(k) = \binom{h}{k} * \left(\frac{M}{h * L}\right)^k * \left(1 - \frac{M}{h * L}\right)^{h-k}$$

όπου:

L = το μήκος της σειράς σε εμπορευματοκιβώτια

h = μέγιστο ύψος στοιβάσας

M = αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων

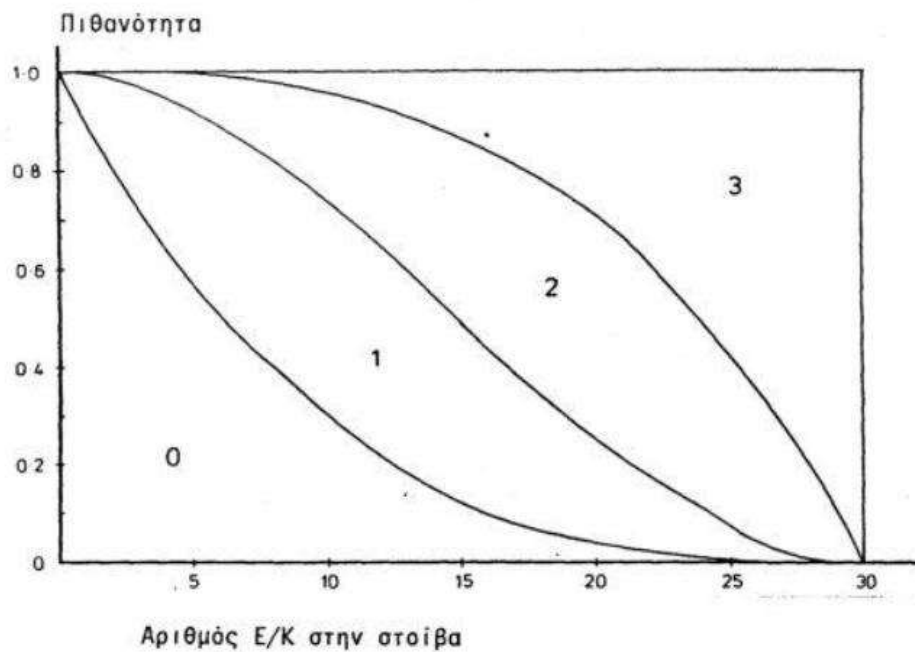
Η πιθανότητα λοιπόν αναδιάταξης δίδεται από τη σχέση:

$$Ps(j) = \sum_{k=j+1}^h P(k)/k$$

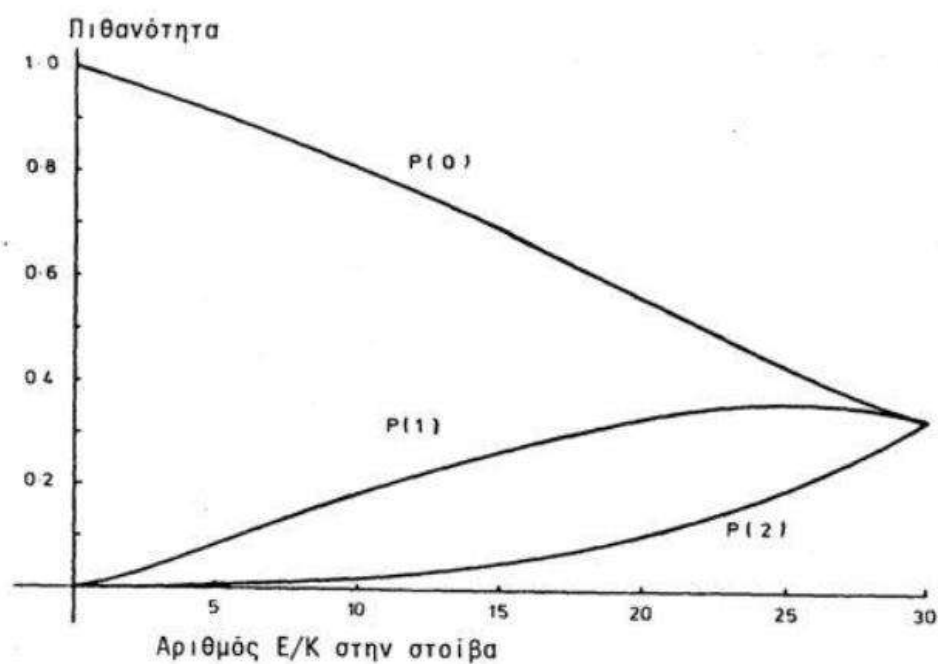
όπου, j = αριθμός των αναδιατάξεων

και $P(k)$ είναι η πιθανότητα να υπάρχουν k εμπορευματοκιβώτια, σε κάθε στοίβα, δεδομένου ότι υπάρχει ένα τουλάχιστον εμπορευματοκιβώτιο.

Οι Rendel, Palmer και Tritton^[73] χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αυτές υπολόγισαν τις πιθανότητες να υπάρχουν 0,1,2,3 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε θέση εναπόθεσης καθώς τις πιθανότητες αναδιάταξης σε σχέση με τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων, για στοίβα που περιλαμβάνει 10 θέσεις εναπόθεσης και έχει μέγιστο ύψος στοιβάσας 3 εμπορευματοκιβώτια. Κατέληξαν λοιπόν στη διαμόρφωση των επόμενων δύο σχημάτων που απεικονίζουν την πιθανότητα εμφάνισης 0,1,2,3 εμπορευματοκιβωτίων σε οποιαδήποτε θέση και την πιθανότητα ανάγκης για 0,1,2 αναδιατάξεις.



Σχήμα 2. 6: Πιθανότητα εμφάνισης 0,1,2,3 ε/κ σε οποιαδήποτε θέση εναπόθεσης. Πηγή: [73]



Σχήμα 2. 5: Πιθανότητα 0,1,2 αναδιατάξεων υπερκείμενων ε/κ για στοίβα με 10 θέσεις εναπόθεσης και μέγιστο ύψος στοιβάσας 3 ε/κ. Πηγή: [73]

2.3.2 Πλάνο φόρτωσης/εκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων και ανάθεσης εξοπλισμού

Η τυπική διαδικασία εξυπηρέτησης ενός πλοίου περιλαμβάνει τις λειτουργίες φόρτωσης και εκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων καθώς και μια σειρά από αναδιατάξεις εμπορευματοκιβωτίων προκειμένου να απλοποιηθεί η εκφόρτωση του πλοίου σε επόμενη ζήτηση. Οι παραπάνω λειτουργίες πραγματοποιούνται από μια ή περισσότερες γερανογέφυρες στο κρηπίδωμα.

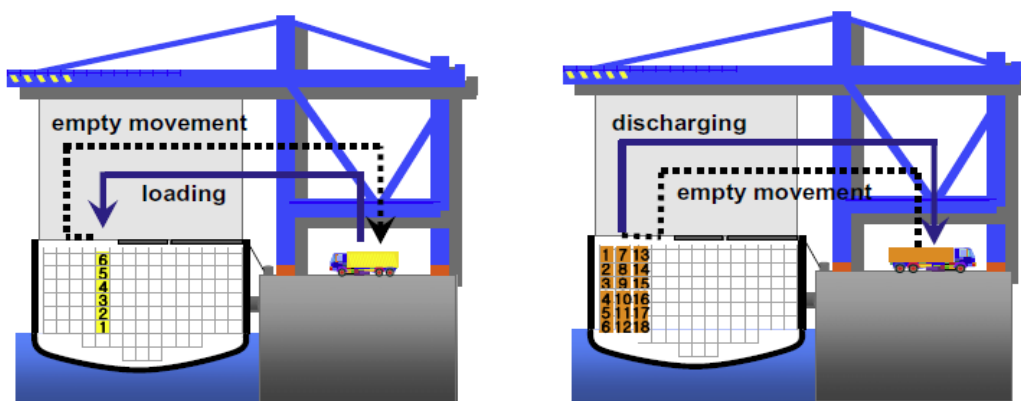
Μια γερανογέφυρα κρηπιδώματος είναι σε λειτουργία *μονού κύκλου* (single cycle) όταν παίρνει ένα εμπορευματοκιβώτιο από το πλοίο, το φορτώνει στο όχημα μεταφοράς (ή εξοπλισμό) και επιστρέφει σε κενή κατάσταση στο πλοίο για να πάρει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Αντίστροφα, μπορεί να είναι σε λειτουργία *μονού κύκλου* (single cycle) όταν παίρνει ένα εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς, το φορτώνει στο πλοίο και επιστρέφει σε κενή κατάσταση να πάρει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Επίσης, μια γερανογέφυρα κρηπιδώματος είναι σε λειτουργία *διπλού κύκλου* (dual cycle) όταν παίρνει ένα εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς, το φορτώνει στο πλοίο και στη συνέχεια παραλαμβάνει ένα άλλο εμπορευματοκιβώτιο από το πλοίο και το φορτώνει στο όχημα μεταφοράς που αναμένει στο κρηπίδωμα. Με αυτό τον τρόπο, οι διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης εκτελούνται σε έναν κύκλο εξυπηρέτησης.

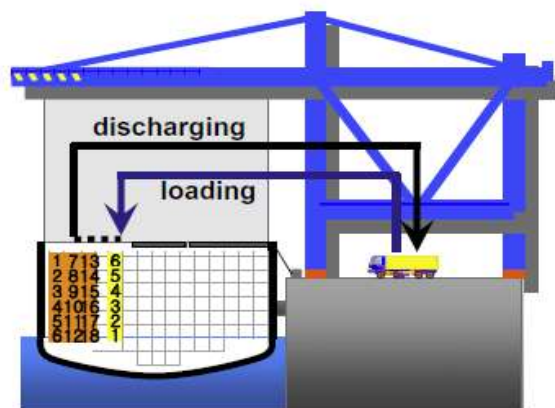
Οι λειτουργίες διπλού κύκλου έχουν εξεταστεί ρητά. Ο Goodchild (2005)^[46] εξέτασε πως επηρεάζουν οι λειτουργίες διπλού κύκλου το χρόνο που παραμένει το πλοίο στο λιμάνι για να εξυπηρετηθεί. Στην εργασία του παρουσιάζει επίλυση του προβλήματος κάνοντας χρήση δύο αλγορίθμων και μίας απλής φόρμουλας για να εκτιμήσει την μείωση που γίνεται στον αριθμό των λειτουργιών και στον χρόνο λειτουργίας. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλημα προγραμματισμού (scheduling problem). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για πολλά πλοία και συγκρίνονται με εμπειρικά δεδομένα από δοκιμές που έχουν γίνει στην πραγματικότητα. Η εργασία αυτή δείχνει πως οι αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιούνται επιπλέον των αριθμητικών μεθόδων για να παρέχουν διορατικότητα. Τελικά αποδεικνύεται ότι όταν οι γερανογέφυρες εκτελούν λειτουργίες διπλού κύκλου, υπάρχει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος. Αν και το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του κύκλου είναι η οικονομία χρόνου, η λειτουργία διπλού κύκλου μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για ένα μέρος των λειτουργιών των εμπορευματοκιβωτίων στο κρηπίδωμα. Ορισμένοι έμπειροι χειριστές των γερανογεφυρών κρηπιδώματος έχουν εφαρμόσει κατά καιρούς τη λειτουργία διπλού κύκλου σε ένα μικρό μέρος της εργασίας τους. Παρόλο που ορισμένοι τερματικοί σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων έχουν ήδη εφαρμόσει αυτή τη τεχνική στην πράξη, όπως οι τερματικοί σταθμοί στη Σαγκάη (Κίνα), στο Χονγκ Κονγκ (Κίνα), στο Μπουσάν (Νότια Κορέα) και στο Σεντζέν (Κίνα)^[97], οι διαχειριστές των τερματικών σταθμών αποφεύγουν την ευρύτερη εφαρμογή της λόγω των πολύπλοκων απαιτήσεων διαχείρισης και επικοινωνίας. Οι Zhang και Kim (2009)^[97] επιχείρησαν να ελαχιστοποιήσουν τον αριθμό των λειτουργιών σε ένα κύκλο των γερανογεφυρών κρηπιδώματος για την φόρτωση και την εκφόρτωση εμπορευματοκιβωτίων από ένα πλοίο. Η ελαχιστοποίηση αυτή έγινε με τη

μεγιστοποίηση του αριθμού των λειτουργιών διπλού κύκλου. Για τη διαμόρφωση του προβλήματος προγραμματισμού των γερανογεφυρών (QCSP) πρότειναν ένα μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP) το οποίο επιλύθηκε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων (heuristics). Για την αξιολόγηση της προσέγγισης που πρότειναν χρησιμοποίησαν στοιχεία από πραγματικά δεδομένα.

Μόνο φόρτωση (ή μόνο εκφόρτωση) περιλαμβάνει κενές κινήσεις



Δεν υπάρχουν κενές κινήσεις στις λειτουργίες διπλού κύκλου

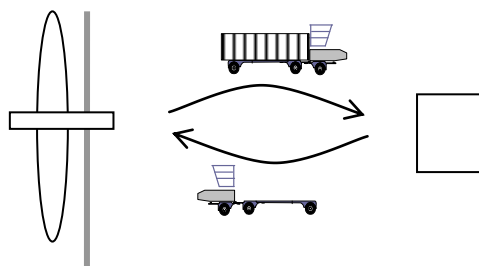


Εικόνα 2. 4: Σύγκριση των λειτουργιών μονού και διπλού κύκλου. Πηγή: [97]

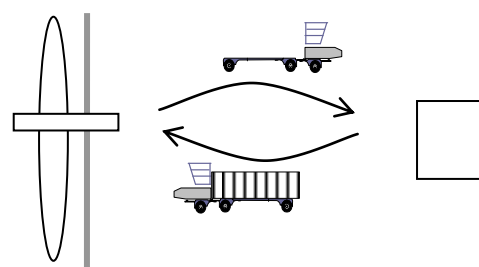
Τα οχήματα μεταφοράς (ή ο εξοπλισμός) μπορούν επίσης να εκτελούν σε συνδυασμό τις δραστηριότητες για τα εισαγόμενα και τα εξαγόμενα εμπορευματοκιβώτια, ακόμα και όταν οι γερανογέφυρες κρηπιδώματος είναι σε λειτουργία μονού κύκλου. Όταν βέβαια περισσότερες από μια γερανογέφυρες λειτουργούν σε ένα πλοίο, τότε κάποιες μπορεί να είναι σε κατάσταση εκφόρτωσης και οι υπόλοιπες σε κατάσταση φόρτωσης. Η Εικόνα 2.5 παρουσιάζει τις τέσσερις βασικές εργασίες που μπορεί να εκτελέσει ένα όχημα μεταφοράς^[50] και είναι οι εξής:

- Οι εργασίες τύπου L/E (Loaded/Empty, Έμφορτο/Κενό) περιλαμβάνουν μια διαδρομή του κάθε οχήματος μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που αρχικά παραλαμβάνει ένα εμπορευματοκιβώτιο στο κρηπίδωμα, το μεταφέρει στους χώρους στοιβάδας όπου και το παραδίδει (π.χ. παραλαμβάνεται από μια γερανογέφυρα χερσαίου χώρου) και στη συνέχεια επιστρέφει στο κρηπίδωμα χωρίς φορτίο.
- Οι εργασίες τύπου E/L (Empty/Loaded, Κενό/Έμφορτο) περιλαμβάνουν μια διαδρομή του κάθε οχήματος μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που αρχικά παραλαμβάνει ένα εμπορευματοκιβώτιο στο χώρο στοιβάδας, το μεταφέρει στο κρηπίδωμα όπου εκεί το παραλαμβάνει η γερανογέφυρα κρηπιδώματος και στη συνέχεια επιστρέφει στο χώρο στοιβάδας χωρίς φορτίο.
- Αντίθετα στις εργασίες τύπου L/L (Loaded/Loaded, Έμφορτο/Έμφορτο) μεταφέρονται δυο εμπορευματοκιβώτια σε κάθε κύκλο χωρίς να υπάρχουν διαδρομές που το όχημα μεταφοράς να είναι κενό. Οι εργασίες αυτές γίνονται υποθέτοντας ότι τα εισερχόμενα και τα εξερχόμενα εμπορευματοκιβώτια αποθηκεύονται ή είναι ήδη αποθηκευμένα στον ίδιο χώρο. Η υπόθεση αυτή ισχύει μόνο για ορισμένες διαμορφώσεις.
- Οι εργασίες τύπου L/E/L (Έμφορτο/Κενό/Έμφορτο) περιλαμβάνουν μία μόνο διαδρομή όπου το όχημα μεταφοράς θα είναι κενό ενώ γίνεται η μεταφορά δυο εμπορευματοκιβωτίων, όπου το ένα θα είναι σε κατάσταση φόρτωσης και το άλλο εκφόρτωσης (ή αντίστροφα). Τα δύο αυτά συσχετιζόμενα εμπορευματοκιβώτια βρίσκονται σε διαφορετικούς αποθηκευτικούς χώρους, μια τυπική περίπτωση στα περισσότερα συμβατικά λιμάνια.

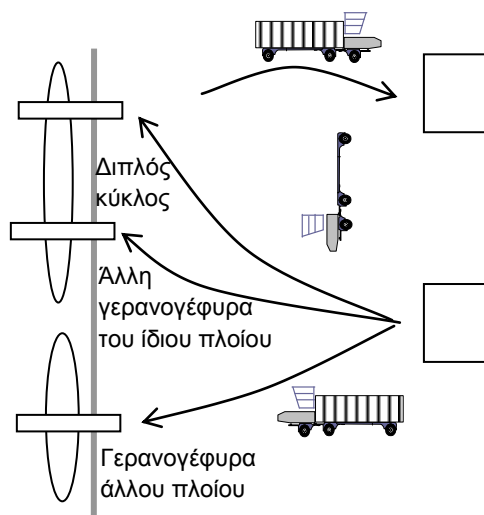
L/E: Η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα φορτώνει ένα εισαγόμενο ε/κ στο όχημα μεταφοράς το οποίο κινείται από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας σε έμφορτη κατάσταση και εκφορτώνεται στο χώρο στοιβασίας από μια γερανογέφυρα του χερσαίου χώρου. Ύστερα το όχημα μεταφοράς επιστρέφει σε κενή κατάσταση για να επαναλάβει τη διαδικασία.



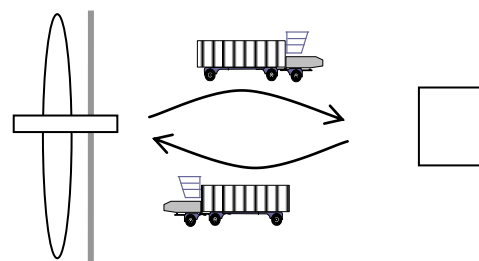
E/L: Πρόκειται για τον αντίστροφο κύκλο από το L/E. Η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα εκφορτώνει ένα εξαγόμενο ε/κ από το όχημα μεταφοράς, το οποίο επιστρέφει χωρίς φορτίο στο χώρο στοιβασίας για να παραλάβει ένα άλλο εξαγόμενο ε/κ και να επιστρέψει στο κρηπίδωμα σε έμφορτη κατάσταση.



L/E/L: Η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα φορτώνει ένα εισαγόμενο ε/κ στο όχημα μεταφοράς το οποίο κινείται από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας σε έμφορτη κατάσταση και εκφορτώνεται στο χώρο στοιβασίας από μια γερανογέφυρα του χερσαίου χώρου. Ύστερα το όχημα μεταφοράς πηγαίνει σε ένα άλλο χώρο στοιβασίας χωρίς φορτίο για να παραλάβει ένα άλλο ε/κ και να επιστρέψει σε έμφορτη κατάσταση στο κρηπίδωμα.



L/L: Η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα φορτώνει ένα εισαγόμενο ε/κ στο όχημα μεταφοράς το οποίο κινείται από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας σε έμφορτη κατάσταση και εκφορτώνεται στο χώρο στοιβασίας. Ύστερα φορτώνεται με ένα εξερχόμενο ε/κ και επιστρέφει στο κρηπίδωμα σε έμφορτη κατάσταση.



Εικόνα 2. 5: Εναλλακτικές εργασίες ενός οχήματος μεταφοράς κατά τη διαδικασία φόρτωσης/εκφόρτωσης ενός πλοίου. Πηγή: [30]

Οι Hau-An και Jing-Yi (2005)^[50] λοιπόν, εξέτασαν αυτές τις περιπτώσεις διατυπώνοντας μοντέλο μη γραμμικού προγραμματισμού (NLP), το οποίο επιλύθηκε σε δύο φάσεις με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων (heuristics). Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε για τις τέσσερις εργασίες μεταφοράς των φορτηγών, με ανάλυση πραγματικών περιπτώσεων σε ένα συγκεκριμένο τερματικό σταθμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εκχώρηση των φορτηγών σε κοντινές θέσεις είναι καλύτερη τακτική όταν το πρόβλημα που μελετάται είναι μεγάλης κλίμακας. Επίσης, έδειξαν ότι υπάρχει ένας κρίσιμος αριθμός φορτηγών, στο σύστημα, που όσο και αν ξεπεραστεί, η απόδοση του συστήματος δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω.

Η στρατηγική ανάθεσης των οχημάτων μεταφοράς (ή του εξοπλισμού) στις γερανογέφυρες κρηπιδώματος επηρεάζει την επίδοση του υποσυστήματος κρηπίδωμα και χώρος στοιβάδας. Γενικά μπορούν να εφαρμοστούν τρεις στρατηγικές^[34]:

- Σταθερή ανάθεση εξυπηρετητών στις γερανογέφυρες του ίδιου πλοίου (Fixed allocation). Στη στρατηγική αυτή, συγκεκριμένα οχήματα μεταφοράς (ή εξοπλισμός) έχουν ανατεθεί σε συγκεκριμένες γερανογέφυρες.
- Ανάθεση ομάδας εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες του ίδιου πλοίου (Pooled allocation to one ship). Στη στρατηγική αυτή, μια ομάδα από οχήματα μεταφοράς (ή εξοπλισμό) έχουν ανατεθεί να εξυπηρετούν όλες τις γερανογέφυρες ενός συγκεκριμένου πλοίου.
- Ανάθεση ομάδας εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες διαφορετικών πλοίων (Pooled allocation to many ships). Στη στρατηγική αυτή, μια ομάδα από οχήματα μεταφοράς (ή εξοπλισμό) έχουν ανατεθεί να εξυπηρετούν όλες τις γερανογέφυρες μιας ομάδας πλοίων.

Οι Bose et. al. (2000)^[34] επικεντρώθηκαν στην διαδικασία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με οχήματα πλαίσια μεταξύ του κρηπιδώματος και του χερσαίου χώρου. Στόχος τους ήταν να μειώσουν το χρόνο που παραμένει ένα πλοίο στο λιμάνι, μεγιστοποιώντας την παραγωγικότητα των γερανογεφυρών ή με άλλα λόγια, ελαχιστοποιώντας τους χρόνους καθυστέρησης μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων που αναγκάζει τη γερανογέφυρα να περιμένει. Κατέληξαν στα εξής δύο συμπεράσματα: μια προσεκτική αναδιοργάνωση και ανασχεδιασμός των διαδικασιών και των στρατηγικών, που ακολουθεί ο σταθμός, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις και επίσης, η χρήση αλγορίθμων για ορισμένα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης μπορεί να βοηθήσει αυτόν που σχεδιάζει τις λειτουργίες του τερματικού και να οδηγήσει σε περαιτέρω βελτιώσεις. Πιο συγκεκριμένα, πρότειναν ότι, μια δυναμική στρατηγική μπορεί να συμβάλλει στη βελτίωση της χρήσης των γερανογεφυρών και των οχημάτων πλαισίων και στην καλύτερη αλληλεπίδραση τους κατά την φόρτωση και εκφόρτωση των πλοίων. Επίσης, πρότειναν την χρήση απλών εξελικτικών αλγορίθμων για να εφαρμοστούν σε πραγματικά προβλήματα. Στην δημοσίευσή τους ερεύνησαν τις διάφορες στρατηγικές με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος, δηλαδή την ελαχιστοποίηση των διαδικασιών εξυπηρέτησης ενός πλοίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια καλή απόδοση της χρήσης γενετικών αλγορίθμων σε συνδυασμό με την αναδιοργάνωση.

Στην πράξη, ο εξοπλισμός συνήθως εκτελεί την στρατηγική της σταθερής ανάθεσης, ενώ τα αυτόματα οχήματα μεταφοράς λειτουργούν πάντα σε ομάδες^[82]. Ένας σημαντικός αριθμός από δημοσιεύσεις αφορά στο κέρδος των επιδόσεων που υπάρχει από την ομαδοποιημένη στρατηγική. Σε γενικές γραμμές, εκχωρώντας μια ομάδα από οχήματα μεταφοράς (ή εξοπλισμού) σε γερανογέφυρες ενός συγκεκριμένου πλοίου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μειώνεται τελικά η απόσταση των οχημάτων και ο χρόνος που χρειάζονται. Μεγαλύτερη μάλιστα πιθανότητα υπάρχει αν εκχωρηθεί μια ομάδα από οχήματα μεταφοράς σε μια ομάδα πλοίων, δεδομένου ότι υπάρχουν ευνοϊκές διατάξεις και ευνοϊκά σχέδια φόρτωσης και εκφόρτωσης των οχημάτων^[34].

Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις η στρατηγική της ομαδοποιημένης κατανομής μπορεί να μην είναι αποτελεσματική για τη μείωση του χρόνου εξυπηρέτησης του πλοίου, ειδικά όταν η απόσταση μεταξύ του πλοίου και της χερσαίας πλευράς είναι μεγάλη^[33].

Ο Bish (2003)^[33], μελέτησε τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης, σε ένα τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων, από μια ομάδα πλοίων που έχουν παραβάλει. Κάθε πλοίο εξυπηρετείται από έναν αριθμό γερανογεφυρών που φορτώνουν και εκφορτώνουν τα εμπορευματοκιβώτια. Τα εμπορευματοκιβώτια κινούνται μεταξύ των πλοίων και του χερσαίου χώρου, χρησιμοποιώντας ένα στόλο οχημάτων. Το πρόβλημα λοιπόν που μελέτησε εμπεριείχε τα εξής:

- καθορισμός ενός χώρου εναπόθεσης για κάθε εμπορευματοκιβώτιο που εκφορτώνεται
- ανάθεση στα οχήματα μεταφοράς τα εμπορευματοκιβώτια που θα μετακινήσουν
- προγραμματισμός των λειτουργιών φόρτωσης και εκφόρτωσης των γερανογεφυρών ώστε να ελαχιστοποιείται ο μέγιστος χρόνος που χρειάζεται μια ομάδα πλοίων, για να εξυπηρετηθεί.

Το πρόβλημα διαμορφώθηκε ως πρόβλημα μεταφόρτωσης (transshipment problem) και αναπτύχθηκε ευρεστικός αλγόριθμος (heuristic) για να επιλυθεί. Η υπολογιστική ανάλυση έδειξε ότι αυτός ο αλγόριθμος αυτός είναι αρκετά ρεαλιστικός σε πραγματικές καταστάσεις, όταν τα πλοία που μοιράζονται τα οχήματα είναι σε κοντινές αποστάσεις και όταν ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που φορτώνονται/εκφορτώνονται σε κάθε πλοίο είναι σε εκατοντάδες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι στρατηγικές ανάθεσης (σταθερή ανάθεση, ανάθεση σε ομάδες για το ίδιο ή διαφορετικά πλοία) θεωρούνται ως απομονωμένες με το υπόλοιπο σύστημα του τερματικού σταθμού. Η υπόθεση αυτή δεν συμπίπτει πάντα με ρεαλιστικές καταστάσεις. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου εργασίας στη χερσαία πλευρά, επηρεάζει ο προγραμματισμός των λειτουργιών στη θαλάσσια πλευρά^[51]. Επιπλέον, καθώς πολλά οχήματα θα πρέπει να μοιράζονται την ίδια διαδρομή για να εξυπηρετήσουν τις γερανογέφυρες, μπορεί να προκύψει συμφόρηση με αποτέλεσμα οι ταχύτητες των οχημάτων να μειωθούν και να επηρεαστεί ο κύκλος λειτουργίας^[44]. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της στρατηγικής ανάθεσης σε ομάδες είναι ότι αυξάνεται η διακύμανση του κύκλου εξυπηρέτησης των οχημάτων μεταφοράς (σε σχέση με την στρατηγική της σταθερής ανάθεσης), καθώς περιέχει μία επιπλέον λειτουργία χειρισμού στην χερσαία πλευρά και ένα επιπλέον

ταξίδι μεταφοράς μεταξύ των δύο χώρων στοιβασίας. Μια μεγάλη διακύμανση στον κύκλο εξυπηρέτησης επηρεάζει αρνητικά τον συγχρονισμό της γερανογέφυρας στο κρηπίδωμα και του οχήματος μεταφοράς και έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους αναμονής^[42].

Η κατανομή λοιπόν των εργασιών στα οχήματα μεταφοράς και στον εξοπλισμό επηρεάζει την απόδοση του συστήματος ακόμα και στην απλή περίπτωση μίας γερανογέφυρας που εξυπηρετείται από μια ομάδα οχημάτων μεταφοράς. Δύο μεθοδολογικές προσεγγίσεις έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία:

1. Μέθοδοι που προτίθενται να βελτιστοποιήσουν το συνολικό πρόγραμμα εργασίας, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός (IP) και οι αλγόριθμοι (algorithms). Το μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι τυχόν αλλαγές του προγράμματος, όπως απρόβλεπτων καθυστερήσεων που συμβαίνουν στην πραγματικότητα, θα απαιτούσε διαμόρφωση του προβλήματος από την αρχή.
2. Ευρεστικές μέθοδοι (heuristics) που απαιτούν λίγες πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος. Κάποιοι γνωστοί κανόνες εξυπηρέτησης (dispatching rules) που αναπτύχθηκαν για τον προγραμματισμό των αυτόματων οχημάτων μεταφοράς (AGVs)^[65], αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα οχήματα μεταφοράς ή εξοπλισμό είναι οι εξής:
 - Κατά προτεραιότητα άφιξης (First Come First Served): ο κανόνας αυτός εκχωρεί το πρώτο όχημα μεταφοράς/εξοπλισμό που είναι ανενεργό στο φορτίο που είναι διαθέσιμο για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
 - Το πιο κοντινό όχημα/σταθμός πρώτο (Nearest Vehicle/Workstation First): ο κανόνας αυτός εκχωρεί ένα ανενεργό όχημα μεταφοράς/εξοπλισμό στο πιο κοντινό διαθέσιμο φορτίο ή, εναλλακτικά, ένα φορτίο εκχωρείται στο πιο κοντινό ανενεργό όχημα μεταφοράς/εξοπλισμό.
 - Αυτό που υπολείπεται της περισσότερης δουλειάς (Most Work Remaining): η επόμενη εργασία που έχει προγραμματιστεί για ένα ανενεργό μηχάνημα είναι η εργασία που έχει τον μεγαλύτερο χρόνο χειρισμού^[65].
 - Με την παλαιότερη ημερομηνία (Earliest Due Data): εκχωρείτε, σε ένα ανενεργό μηχάνημα, η εργασία που είναι πιο επιτακτική σε σχέση με την ημερομηνία λήξης^[65].

Ο χώρος αποθήκευσης σε ένα τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων είναι συνήθως χωρισμένος σε τμήματα (blocks) από εμπορευματοκιβώτια. Κάθε τμήμα αποτελείται από έναν αριθμό εμπορευματοκιβωτίων που είναι τοποθετημένα σε στοίβες με πολλές βαθμίδες. Οι στοίβες είναι συνήθως τοποθετημένες σε σειρά παράλληλων διαδρόμων. Ο αριθμός των παράλληλων διαδρόμων, η απόσταση μεταξύ τους και ο αριθμός των βαθμίδων εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις δυνατότητες του εξοπλισμού καθώς και από τις στρατηγικές στοίβαξης και τους ανασχηματισμούς των εμπορευματοκιβωτίων. Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές στοίβαξης^{[83],[38],[96],[87]}. Τα εμπορευματοκιβώτια που εκφορτώνονται από το πλοίο, μεταφέρονται στους αποθηκευτικούς χώρους με αύξοντα αριθμό, μόλις είναι διαθέσιμα από τις γερανογέφυρες κρηπιδώματος. Όμως, κατά τη διάρκεια φόρτωσης

του πλοίου, η απαιτούμενη αλληλουχία, δεν προσδιορίζει συγκεκριμένα εμπορευματοκιβώτια αλλά τα εμπορευματοκιβώτια που πληρούν ορισμένα χαρακτηριστικά όπως το πλοίο που πρέπει να φορτωθούν, το λιμάνι προορισμού, το μέγεθος και το βάρος του εμπορευματοκιβωτίου κτλ. Καθώς περισσότερα από ένα εμπορευματοκιβώτια στη χερσαία πλευρά μπορεί να έχει αυτές τις ιδιότητες, υπάρχει ένας βαθμός ευελιξίας στη διαδικασία σχεδιασμού που επιτρέπει, για λόγους εξοικονόμησης απόστασης και χρόνου, τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών. Επομένως, για δύο τύπους εμπορευματοκιβωτίων, η σειρά φόρτωσης μπορεί να είναι:

- Σταθερή σειρά φόρτωσης (Fixed loading order), όπου τα εμπορευματοκιβώτια, στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσεως, έχουν μια προκαθορισμένη σειρά. Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα εργασίας του πλοίου έχει οριστικοποιηθεί εκ των προτέρων.
- Σειρά φόρτωσης σε ομάδες (Group loading order), όπου το πρόγραμμα εργασίας καθορίζει τα εμπορευματοκιβώτια που πληρούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (το πλοίο που θα φορτωθούν, το λιμάνι προορισμού, το μέγεθος, το βάρος κτλ.) και όχι κάποιο συγκεκριμένο εμπορευματοκιβώτιο.

Οι εργασίες λοιπόν, από άποψη μοντελοποίησης, στα πραγματικά συστήματα λιμενικών εγκαταστάσεων, είναι δύο. Το πρόβλημα τοποθέτησης, δηλαδή ο προσδιορισμός της θέσης του εμπορευματοκιβωτίου που βελτιστοποιεί τις διαδικασίες μεταφοράς στους χώρους αποθήκευσης και το πρόβλημα του καταμερισμού της εργασίας, δηλαδή τα οχήματα μεταφοράς να ακολουθούν σχέδιο τέτοιο ώστε να γίνεται βελτιστοποίηση χρόνου και κόστους. Ορισμένες προσεγγίσεις επίλυσης που έχουν πραγματοποιηθεί, υποθέτουν ότι τα εμπορευματοκιβώτια μεταφέρονται στο κρηπίδωμα με συγκεκριμένη σειρά φόρτωσης, ώστε το πρόβλημα τοποθέτησης να θεωρείται ότι έχει επιλυθεί, και το προς διερεύνηση πρόβλημα είναι η κατανομή των θέσεων εργασίας στα οχήματα μεταφοράς. Αντίθετα, άλλες προσεγγίσεις που έχουν γίνει, θεωρούν ότι έχει ακολουθηθεί ομαδική σειρά φόρτωσης και επιλύουν είτε το πρόβλημα τοποθέτησης είτε το πρόβλημα τοποθέτησης και καταμερισμού της εργασίας μαζί.

Οι Ballis et. al. (2010)^[30], εξέτασαν συστηματικά τις δημοσιευμένες εργασίες για το υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσεως και απεικόνισαν σχηματικά τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, τις παραδοχές που έγιναν, τις προσεγγιστικές λύσεις που δόθηκαν και την εφαρμογή τους σε πραγματικά προβλήματα. Οι προσεγγιστικές λύσεις περιλάμβαναν σχηματισμούς ανάθεσης εργασίας με ελέγχους για τυχόν αδιέξοδα που ενδέχεται να προκύψουν από ανέφικτα χρονοδιαγράμματα^[65], τη μέθοδο κλάδου και φράγματος (branch and bound method)^[61], καθώς και ευρεστικές μεθόδους, ιδίως τη προσομοίωση ανόπτησης (simulation annealing)^[57] και γενετικούς αλγορίθμους^[49].

Μερικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση είναι τα εξής:

- Με εξαίρεση την περίπτωση που χρησιμοποιεί μία μόνο γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα και πολλά οχήματα μεταφοράς για τις διαδικασίες εκφόρτωσης (που μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τον απλό κανόνα πειθαρχίας FIFO), όλες οι άλλες λειτουργίες στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρο αποθήκευσης απαιτούν μεθόδους βελτιστοποίησης.
- Η διαχείριση του υποσυστήματος που γίνεται μέσω υπολογιστή και συστημάτων ελέγχου, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή προηγμένων διαδικασιών εξοικονόμησης χρόνου, ώστε να υπολογίζεται το βέλτιστο σχέδιο εργασίας, ο έλεγχος και η παρακολούθηση του εξοπλισμού και ο ανασχηματισμός του σχεδίου εργασίας όταν οι πραγματικές λειτουργίες αποκλίνουν από το πρόγραμμα).
- Σε περιπτώσεις ευνοϊκής διάταξης του χερσαίου χώρου και ταυτόχρονα κοντινής απόστασης των πλοίων, για τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης τους, αν χρησιμοποιηθεί μια ομαδοποιημένη κατανομή των οχημάτων μεταφοράς τότε μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος έως και 25%.
- Στην περίπτωση των συμβατικών σταθμών εμπορευματοκιβωτίων με επανδρωμένο εξοπλισμό που λειτουργεί σε σταθερή κατανομή (συγκεκριμένα φορτηγά εκχωρούνται σε συγκεκριμένες γερανογέφυρες ώστε να απλοποιηθεί ο έλεγχος και να μειωθεί η πιθανότητα ανθρώπινου λάθους) η συνήθης πρακτική που χρησιμοποιείται για τον προσχεδιασμό της στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων που θα εξέλθουν από το λιμάνι (πριν την άφιξη των πλοίων), μπορεί να είναι απλοί κανόνες διαχείρισης που τελικά θα οδηγήσουν σε σχεδόν βέλτιστες λύσεις.

2.3.3 Επισκόπηση των δημοσιευμένων εργασιών που μελετούν το υποσύστημα κρηπίδωμα-χώρος στοίβαξης

Η σημαντικότητα των διαδικασιών μεταφοράς στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοίβαξης πηγάζει από το γεγονός ότι τυχόν ανεπάρκειες και καθυστερήσεις στην εξυπηρέτηση των γερανογεφυρών στο κρηπίδωμα επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση όλου του συστήματος στη θαλάσσια πλευρά. Δικαιολογείται επομένως η προσπάθεια προσέγγισης και ανάλυσης των προβλημάτων του πραγματικού κόσμου μαθηματικά, ώστε να βρεθεί λύση που θα αποδίδει τη βέλτιστη απόδοση.

Οι Kim and Kim (1999)^[56] ερεύνησαν τις διαδικασίες δρομολόγησης των οχημάτων πλαισίων κατά τη διάρκεια της φόρτωσης τους με εξαγόμενα εμπορευματοκιβώτια ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική απόσταση που πρέπει να διανύσουν καθώς και ο χρόνος τους στη χερσαία πλευρά. Εφόσον το όχημα πλαίσιο μπορεί να εκτελέσει όλες τις όλες τις μεταφορές, μεταφορά και στοίβαξη, δεν χρειάζεται να συνεργαστεί με άλλους τύπους εξοπλισμού όπως με τις γερανογέφυρες στο κρηπίδωμα ή με τις γερανογέφυρες στη χερσαία πλευρά. Χρησιμοποιήθηκε λοιπόν η τεχνική του μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP) και διερευνήθηκε μια αποτελεσματική διαδικασία επίλυσης. Παρ' όλα αυτά η θεώρηση ενός οχήματος πλαισίου αποτελεί μια στενή

αντίληψη που αποκλίνει σημαντικά από τις δραστηριότητες που συμβαίνουν σε πραγματικά συστήματα και έτσι περιορίζεται η πρακτική δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης λύσης.

Οι Bish et al.^[33] προκειμένου να κατανοήσουν την απόδοση του συστήματος, ερεύνησαν διεξοδικά τη διαμόρφωση του εξοπλισμού με ελκυστήρες με συρόμενες βάσεις (yard trucks). Αρχικά ανέλυσαν τις λειτουργίες εκφόρτωσης ενός μόνο πλοίου με μία γερανογέφυρα κρηπιδώματος και πολλούς ελκυστήρες. Έπειτα επέκτειναν την προσέγγιση τους περιλαμβάνοντας διαδικασίες φόρτωσης, εκφόρτωσης και συνδυασμό αυτών με πολλές γερανογέφυρες κρηπιδώματος. Χρησιμοποιούν την έννοια του ολικού χρόνου “makespan” που ορίζεται ως ο χρόνος από την αρχή λειτουργίας μέχρι και το τελευταίο όχημα να επιστρέψει στην περιοχή του πλοίου εφόσον όλα τα εμπορευματοκιβώτια έχουν εκφορτωθεί και τοποθετηθεί στη χερσαία πλευρά, στους χώρους στοιβασίας καθώς επίσης και τα εξαγόμενα εμπορευματοκιβώτια έχουν φορτωθεί στο πλοίο. Εφάρμοσαν προσεγγιστικές μεθόδους ώστε να βρουν μια αποτελεσματική στρατηγική που θα ελαχιστοποιεί το συνολικό χρόνο εργασιών. Ωστόσο έγιναν οι παραδοχές ότι οι εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης πραγματοποιούνταν με σταθερή ανάθεση εξυπηρετητών και ότι υπήρχε πάντα μία γερανογέφυρα στο χώρο στοιβασίας που ήταν διαθέσιμη να εξυπηρετήσει τους ελκυστήρες.

Οι Lu and Jeng^[64] ερεύνησαν την απόδοση ενός αριθμού ελκυστήρων που εξυπηρετούν μια γερανογέφυρα κρηπιδώματος χρησιμοποιώντας μια παρόμοια προσέγγιση με τους Bish et al.^[33] και κάνοντας τις ίδιες παραδοχές. Ανέπτυξαν λοιπόν μια προσεγγιστική μέθοδο και συμπέραναν ότι η επιλογή του εξοπλισμού βάση της κοντινής του θέσης είναι αποτελεσματικότερη από μια τυχαία επιλογή και ότι όσο ο αριθμός του στόλου των οχημάτων μεταφοράς αυξάνεται τόσο οι διαφορές μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών ανάθεσης εξοπλισμού μειώνονται και τότε, κρίσιμος παράγοντας απόδοσης είναι ο χρόνος κύκλου της γερανογέφυρας.

Οι Ng and Mak^[66] ερεύνησαν τις λειτουργίες που πραγματοποιούνται στη χερσαία πλευρά από τις γερανογέφυρες. Διατύπωσαν ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP) και ανέπτυξαν όρια για την αντικειμενική συνάρτηση. Η λύση του προβλήματος παρέχει το βέλτιστο προγραμματισμό εργασίας μια γερανογέφυρας στη χερσαία πλευρά. Το πρόβλημα περιλαμβάνει όλες τις εργασίες στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων και λαμβάνει υπόψη ότι η εξυπηρέτηση εκτελείται σύμφωνα με καθορισμένη σειρά φόρτωσης σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Ο αλγόριθμος επίλυσης βασίστηκε στη μέθοδο «κλάδου και φράγματος», προγραμματίστηκε με C++ και εφαρμόστηκαν δεδομένα από τον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων στη Σιγκαπούρη και στο Χονγκ Κόνγκ.

Οι Bose et al.^[34] μελέτησαν τον συνδυασμό των λειτουργιών φόρτωσης και εκφόρτωσης από οχήματα πλαίσια. Χρησιμοποίησαν έναν γενετικό αλγόριθμο για να ελαχιστοποιήσουν τις καθυστερήσεις των μεταφορών των εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου. Συγκεκριμένα ερεύνησαν τις τρεις στρατηγικές ανάθεσης εργασιών που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Δηλαδή τη σταθερή ανάθεση εξυπηρετητών στις γερανογέφυρες του ίδιου πλοίου (fixed allocation), την ανάθεση ομάδας εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες του ίδιου

πλοίου (pooled allocation to one ship) και σε γερανογέφυρες διαφορετικών πλοίων (pooled allocation to many ships). Πραγματοποιήθηκαν διάφορα σενάρια στα οποία υπήρχαν 4 πλοία, 2 γερανογέφυρες κρηπιδώματος σε κάθε πλοίο και 24 οχήματα πλαίσια. Τελικά αποδείχθηκε ότι η τρίτη στρατηγική (της ομάδας ανάθεσης σε διαφορετικά πλοία) είχε καλύτερα αποτελέσματα από τη δεύτερη στρατηγική και πολύ καλύτερα από την πρώτη στρατηγική.

Τα αποτελέσματα των ανωτέρων στρατηγικών ανάθεσης ερευνήθηκαν και από τους Park et. al.^[72] χρησιμοποιώντας δεδομένα και πληροφορίες από τον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων στο Busan στην Νότια Κορέα. Εξέτασαν ένα σύστημα που αποτελείται από ελκυστήρες και γερανογέφυρες κρηπιδώματος. Έγινε σύγκριση της στρατηγικής της σταθερής ανάθεσης που χρησιμοποιεί το λιμάνι με την στρατηγική της ανάθεσης ομάδας σε γερανογέφυρες πολλών πλοίων. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της προσομοίωσης, συμπέραναν ότι η στρατηγική της ανάθεσης ομάδας σε γερανογέφυρες οδηγεί σε 25% βελτίωση της παραγωγικότητας.

Οι Soriguera et. al.^[81] ερευνήσαν το πρόβλημα βελτιστοποίησης του εξοπλισμού στον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων της Μπαρτσελόνα. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία αναμονής και τη προσομοίωση ερευνήσαν τις συμβατικές διαμορφώσεις του εξοπλισμού (οχήματα πλαίσια και ελκυστήρες) και εκτίμησαν τη πιθανή ετήσια εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της βελτιστοποίησης των διαδικασιών. Τελικά συμπέραναν ότι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να λειτουργεί το λιμάνι της Μπαρτσελόνα είναι να ανατίθενται οι μονάδες του εξοπλισμού σε όλες τις θέσεις παραβολής. Επιπλέον οι συγγραφείς βρήκαν ότι ο βέλτιστος αριθμός μονάδων, για τις εσωτερικές μεταφορές στο χώρο του λιμανιού, που πρέπει να ανατεθεί σε κάθε λειτουργία εξαρτάται από τον αριθμό των γερανογεφυρών που δουλεύουν σε κάθε πλοίο, τον τύπο του εξοπλισμού και το αν πραγματοποιείται λειτουργία φόρτωσης ή εκφόρτωσης.

Οι Kozan and Preston^[58] μελέτησαν τη βελτιστοποίηση των μεταφορών εμπορευματοκιβωτίων χρησιμοποιώντας οχήματα πλαίσια. Σκοπός τους ήταν να ελαχιστοποιήσουν το χρόνο που παραμένουν τα πλοία στο λιμάνι. Το μοντέλο τους διατυπώθηκε με μικτό ακέραιο προγραμματισμό και αφορά την ανακατανομή των εμπορευματοκιβωτίων που εξαρτάται από τη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα εμπορευματοκιβώτια στους χώρους στοιβάσεως. Η επίλυση του προβλήματος έγινε με προσεγγιστικές μεθόδους. Η προσέγγιση τους εφαρμόστηκε στο λιμάνι Brisbane της Αυστραλίας όπου διαπιστώθηκε ότι η επίλυση τους έδινε ικανοποιητική λύση σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

Οι Chen et. al.^[37] παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό των γερανογεφυρών κρηπιδώματος, των οχημάτων μεταφοράς και των γερανογεφυρών της χερσαίας πλευράς. Σκοπός τους ήταν να ελαχιστοποιήσουν το ολικό χρονικό διάστημα ή αλλιώς το χρόνο που χρειαζόταν για να εξυπηρετήσουν έναν αριθμό πλοίων. Οι κύριες παραδοχές που έκαναν στο σχηματισμό του μοντέλου τους ήταν ότι (α) όλα τα οχήματα μεταφοράς μπορούν να χειριστούν ένα εμπορευματοκιβώτιο τη φορά και η απόσταση ταξιδιού τους είναι ντετερμινιστική (δεν υπολογίζονται καθυστερήσεις που οφείλονται σε συμφόρηση του δικτύου) είτε είναι σε έμφορτη είτε σε κενή κατάσταση, (β) οι λειτουργίες φόρτωσης

του πλοίου ξεκινούν μόνο εφόσον έχουν ολοκληρωθεί οι λειτουργίες εκφόρτωσης του και (γ) καμία γερανογέφυρα στο χερσαίο χώρο δεν μπορεί να κατανέμεται μεταξύ διαφορετικών τμημάτων στοιβάσις “blocks”. Το πρόβλημα διατυπώθηκε με μια μορφή υβριδικού προγραμματισμού (Hybrid Flow Shop Scheduling) με προτεραιότητες και περιορισμούς. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε επικεντρώθηκε σε έναν αριθμό από παραδείγματα που έλεγχαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Οι Imai et. al.^[52] ερεύνησαν το συνδυασμένο πρόβλημα στοιβάσις στο πλοίο και σχέδιο φόρτωσης. Η προσέγγιση τους έγινε με την τεχνική του δυναμικού προγραμματισμού και παρόλο που απευθύνεται στη θαλάσσια πλευρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο υποσύστημα κρηπίδωμα-χώρος στοιβάσις.

Οι Lau και Zhao^[62] ερεύνησαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα χειρισμού, που συμπεριλάμβανε προγραμματισμό των γερανογεφυρών, των αυτόματων οχημάτων μεταφοράς (AGVs) και των αυτόματων γερανογεφυρών στοιβάσις (ASCs). Διατυπώθηκε η τεχνική του Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP), όπου η αντικειμενική συνάρτηση ισούταν με το άθροισμα, του συνολικού χρόνου ταξιδιού των AGVs και των ASCs και τον χρόνο αναμονής τους για τις γερανογέφυρες. Αυτό το δυναμικό πρόβλημα προγραμματισμού για το σύνολο του εξοπλισμού, αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια δύο υβριδικών μορφών γενετικών αλγορίθμων (GA). Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε σε σχέση με τον αριθμό των SGVs, τον ορίζοντα προγραμματισμού και αβεβαιότητα στο χρόνο λειτουργίας των γερανογεφυρών κρηπιδώματος. Τα αποτελέσματα των δυο αλγορίθμων βελτιστοποίησης παρουσιάστηκαν σε σχέση με την επίδοση και τον χρόνο που υπολογίστηκε ότι παραμένει εντός εύλογου εύρους το σύστημα, για προβλήματα μέχρι και περίπου χιλίων εμπορευματοκιβωτίων.

Ο Meersmans^[65] μελέτησε τον προγραμματισμό του εξοπλισμού σε ένα αυτοματοποιημένο τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων για δύο τύπους διατάξεων. Η πρώτη διάταξη μοιάζει με τωρινή κατάσταση του Ευρωπαϊκού Τερματικού Σταθμού εμπορευματοκιβωτίων του Ρότερνταμ ενώ η δεύτερη διάταξη μοιάζει με ένα τερματικό σταθμό επόμενης γενιάς. Η κατανομή της δουλειάς των AGVs μελετήθηκε και διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού (IP). Με τον αλγόριθμο της μεθόδου κλάδου και φράγματος (branch and bound) και με έναν προσεγγιστικό αλγόριθμο (heuristic) αναπτύχθηκε η λύση της πρώτης διάταξης. Το συμπέρασμα της μελέτης αυτής ήταν πως, παρόλο που ένα πιο ευέλικτο πρότυπο καθοδήγησης των AGVs (από αυτό που ήδη υπάρχει) μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες αποστάσεις (και επομένως μεγαλύτερη παραγωγικότητα), αυτή η αύξηση της παραγωγικότητας μπορεί να μειωθεί σημαντικά αφού η επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού γίνεται ιδιαίτερα δύσκολη.

Οι Froyland et al.^[43] μελέτησαν διαμορφώσεις του εξοπλισμού σε ένα τερματικό σταθμό, με οχήματα πλαίσια (straddle carriers) ως οχήματα μεταφοράς μεταξύ κρηπιδώματος και χώρων στοιβάσις και γερανογέφυρες επί σιδηροτροχιών (RMG) και επί ελαστικών τροχών (RTG) στην χερσαία πλευρά. Σκοπός της μελέτης ήταν ο προσδιορισμός της αποτελεσματικότερης στρατηγικής κατανομής των γερανογεφυρών στους χώρους στοιβάσις. Οι συγγραφείς αυτοί ανέπτυξαν μια

τεχνική γραμμικού προγραμματισμού (IP) που βασίζεται σε προσεγγιστικές μεθόδους (heuristics) και περιλαμβάνει τρία διαφορετικά στάδια: (α) στρατηγικός σχεδιασμός όπου η κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων προσδιορίζεται σε ωριαίο επίπεδο, με ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (IP), (β) ρύθμιση σε τακτικό επίπεδο όπου τα εισερχόμενα εμπορευματοκιβώτια εκχωρούνται σε θέσεις κοντά στις γερανογέφυρες της χερσαίας πλευράς με μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού (IP) και (γ) λεπτομερή λήψη αποφάσεων στο επιχειρησιακό επίπεδο όπου τα εμπορευματοκιβώτια εκχωρούνται προσωρινά θέσεις στοίβαξης και σχεδιάζεται η ακριβής λειτουργία των RMG. Η προσέγγιση τους χρησιμοποιήθηκε στο λιμάνι Botany του Σύδνεϋ και συμπέραναν ότι η στρατηγική κατανομής των γερανογεφυρών όπου κάθε γερανογέφυρα είχε τον δικό της χώρο εργασίας, ήταν η πιο αποτελεσματική.

Οι Yang et al.^[95] σύγκριναν την επίδοση των αυτόματων οχημάτων μεταφοράς (AGVs) με την επίδοση των αυτόματων οχημάτων ανύψωσης (ALVs). Αυτοί οι συγγραφείς προσομοίωσαν την λειτουργία μιας θέσης παραβολής με τρεις γερανογέφυρες κρηπιδώματος και έξι χώρους στοίβαξης όπου ο καθένας ήταν εξοπλισμένος με 2 αυτόματες γερανογέφυρες στοίβαξης (ASCs). Έγινε η υπόθεση ότι οι διαδικασίες εκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων πρέπει να ολοκληρωθούν προτού ξεκινήσει η φόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων. Τελικά συμπέραναν ότι τα αυτόματα οχήματα ανύψωσης (ALVs) υπερέχουν των αυτόματων οχημάτων μεταφοράς (AGVs) γιατί εξαλείφουν τους χρόνους αναμονής.

Οι Saanen και Valkengoed^[75] μελέτησαν την επίδοση τριών εναλλακτικών διαμορφώσεων των γερανογεφυρών επί σιδηροτροχιών (RMG): (α) μια γερανογέφυρα για κάθε χώρο στοίβαξης, (β) δυο γερανογέφυρες να εργάζονται στον ίδιο χώρο στοίβαξης και (γ) μια γερανογέφυρα με ύψος όσο τέσσερα εμπορευματοκιβώτια να δουλεύει μέσα σε μια άλλη γερανογέφυρα με ύψος όσο πέντε εμπορευματοκιβώτια. Χρησιμοποίησαν λοιπόν ένα μοντέλο προσομοίωσης του τερματικού σταθμού για να αναλύσουν (α) ένα μεμονωμένο μοντέλο για την στοίβαξη και (β) ένα μοντέλο για ολόκληρο το σταθμό. Σύγκριναν τα αποτελέσματα αυτών των εναλλακτικών όσον αφορά στην παραγωγικότητα της θαλάσσιας πλευράς, στην παραγωγικότητα των γερανογεφυρών στη χερσαία πλευρά και στους χρόνους εξυπηρέτησης των φορτηγών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τρίτη διαμόρφωση, με την μια γερανογέφυρα να δουλεύει μέσα στην άλλη, είχε τις καλύτερες επιδόσεις.

Ο Vis^[93] σύγκρινε τη διαμόρφωση εξοπλισμού με οχήματα πλαίσια (SCs) ή με αυτόματες γερανογέφυρες στοίβαξης (AGV/ASC), με σκοπό την παροχή συμβουλών για την ορθή επιλογή ενός συγκεκριμένου συστήματος, στην περίπτωση που υπάρχουν ειδικές διατάξεις στους χώρους στοίβαξης. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η ανάλυση ευαισθησίας, όσον αφορά στην απόδοση, έδειξαν ότι οι αυτόματες γερανογέφυρες (AGV/ASC) υπερέχουν των οχημάτων πλαισίων (SCs) όταν το πλάτος σε μια στοίβα είναι μικρότερο από εννιά εμπορευματοκιβώτια. Όταν ξεπεραστεί αυτό το πλάτος τα οχήματα πλαίσια και οι αυτόματες γερανογέφυρες παρουσιάζουν ίδιες επιδόσεις και τότε το υψηλό κόστος των αυτόματων γερανογεφυρών καθιστά τα οχήματα πλαίσια ευνοϊκότερα.

2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARENA

Πλήθος δημοσιευμένων εργασιών, διδακτορικών και διπλωματικών εργασιών έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο της προσομοίωσης κάνοντας χρήση του λογισμικού Arena. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά ορισμένες εργασίες που κάνουν χρήση του λογισμικού προσομοίωσης Arena.

Οι Tahar and Hussain^[86] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης με χρήση του λογισμικού Arena για να βοηθήσει τις λειτουργίες και την διαχείριση του τερματικού σταθμού Kelang στη Μαλαισία. Το μοντέλο προσομοιώνει όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται για να λειτουργήσει το λιμάνι αποτελεσματικά και παρέχει λεπτομερή στοιχεία για τον όγκο διακίνησης του λιμανιού και τους βαθμούς χρησιμοποίησης με ένα υψηλό επίπεδο ακρίβειας. Η κατανομή των γερανογεφυρών κρηπιδώματος, των πόρων του συστήματος και ο προγραμματισμός των διαφορετικών λειτουργιών μοντελοποιούνται ώστε να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της απόδοσης του λιμανιού.

Οι Assuma and Vivetta^[27] πρότειναν ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων για να προσομοιώσουν τις λειτουργίες φόρτωσης/εκφόρτωσης με χρήση ενός σιδηροδρομικού συστήματος σε ένα Ro-Ro τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων. Με χρήση του λογισμικού Arena δημιούργησαν ένα μοντέλο ώστε να μπορούν να ελέγχουν τα κρίσιμα γεγονότα, όπως την πιθανότητα να προβλημάτων που μπορεί να παρουσιαστούν και επηρεάζουν τις συνηθισμένες λειτουργίες. Προσομοιώνοντας λοιπόν το σύστημα άντλησαν πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Ο Solomenikovs^[80] στη διδακτορική διατριβή του κάνει χρήση του λογισμικού Arena για να προσομοιώσει τη λειτουργία του λιμανιού της Ρίγας στη Λετονία. Η εργασία παρουσιάζει μια πρωτότυπη μεθοδολογία που βασίζεται σε παραμετρικές και μη παραμετρικές μεθόδους της στατιστικής, για τη δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης των λιμενικών τερματικών σταθμών εμπορευματοκιβωτίων, σε ένα απαιτούμενο επίπεδο ρεαλισμού.

Οι Park et. al.^[72] χρησιμοποιώντας δεδομένα και πληροφορίες από τον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων στο Busan στη Νότια Κορέα, εξέτασαν ένα σύστημα που αποτελείται από ελκυστήρες και γερανογέφυρες κρηπιδώματος. Έγινε σύγκριση της στρατηγικής της σταθερής ανάθεσης που χρησιμοποιεί το λιμάνι με την στρατηγική της ανάθεσης ομάδας σε γερανογέφυρες πολλών πλοίων. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της προσομοίωσης με χρήση του λογισμικού Arena, συμπέραναν ότι η στρατηγική της ανάθεσης ομάδας σε γερανογέφυρες οδηγεί σε 25% βελτίωση της παραγωγικότητας.

Ο Shammoon^[78] στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του, μελετά το λιμάνι στις Μαλδίβες λόγω του ότι η χώρα εισάγει σχεδόν όλα τα προϊόντα που καταναλώνει και η συμφόρηση είναι μεγάλη. Εξετάστηκαν διάφορα σενάρια για το λιμάνι τα οποία προσομοιώθηκαν με χρήση του λογισμικού Arena. Τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση, του χρόνου ολοκλήρωσης των διαδικασιών στα πλοία, την χωρητικότητα των θέσεων παραβολής, την χωρητικότητα της χερσαίας πλευράς, τον χρόνο παραμονής των εμπορευματοκιβωτίων στο λιμάνι και των βαθμών χρησιμοποίησης των γερανογεφυρών κρηπιδώματος και άλλου εξοπλισμού. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι η μειωμένη χωρητικότητα των θέσεων παραβολής είναι ο κύριος λόγος που δημιουργεί ουρές και καθυστερήσεις των πλοίων.

Οι Tsitsamis and Vlachos^[90] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία βασισμένη στη προσομοίωση με χρήση του λογισμικού Arena για την αξιολόγηση των αποφάσεων σε ότι αφορά στον προγραμματισμό λειτουργίας των φορτηγών που ενσωματώνει τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές παραμέτρους, σε ένα λιμενικό τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων. Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε στο λιμενικό τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων της Θεσσαλονίκης.

Οι Arango et. al.^[26] μελέτησαν τα προβλήματα που συνδέονται με την κατανομή των θέσεων παραβολής στα πλοία εμπορευματοκιβωτίων, στο λιμάνι της Σεβίλλης. Χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της προσομοίωσης κάνοντας χρήση του λογισμικού Arena. Το μοντέλο προσομοίωσης είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εξυπηρέτησης για το κάθε πλοίο, θεωρώντας ότι η στρατηγική ανάθεσης των θέσεων παραβολής υπακούει στον κανόνα FIFO.

Οι Sheikholeslami et. al.^[79] μελέτησαν το πρόβλημα κατανομής των πλοίων στις θέσεις παραβολής, με χρήση προσομοίωσης. Διατύπωσαν το πρόβλημα στο λογισμικό προσομοίωσης Arena και αξιολόγησαν διάφορες στρατηγικές στο λιμάνι Rajaei στο Ιράν. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι διαφορετικές επιλογές επέκτασης του λιμανιού έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στην επίδοση του λιμανιού.

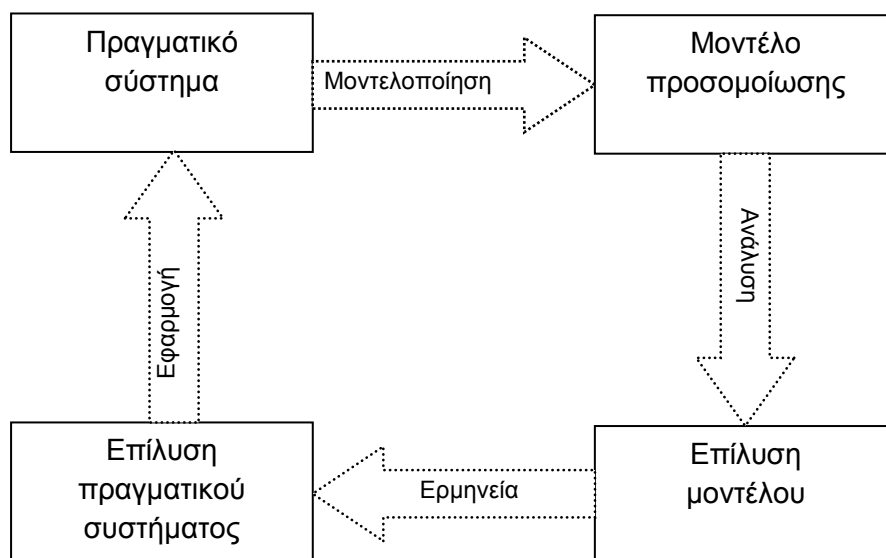
Ο Shahpanah^[77] επικεντρώθηκε στο χρόνο αναμονής των πλοίων στο χώρο αγκυροβόλησης προκειμένου να παραβάλουν σε μια θέση στο λιμάνι. Ασχολήθηκε λοιπόν με το πρόβλημα αναμονής στις λειτουργίες ρυμούλκησης των πλοίων ώστε να μειωθεί ο μέσος χρόνος αναμονής τους. Το πρόβλημα μελετήθηκε με τη μέθοδο της προσομοίωσης κάνοντας χρήση του λογισμικού Arena. Για την επικύρωση του μοντέλου που σχηματίστηκε, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα από τον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων στη Μαλαισία. Εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια ρυμούλκησης των πλοίων στις θέσεις παραβολής και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την εφαρμογή αυτών των σεναρίων, ο μέσος χρόνος αναμονής των πλοίων στην περιοχή αγκυροβόλησης μειώθηκε δραματικά από 180 ώρες σε 140 ώρες για το κάθε πλοίο.

Σε μια βιβλιογραφική μελέτη που πραγματοποιήθηκε^[17] για τις περιπτώσεις χρήσης του λογισμικού Arena βρέθηκε ότι το λογισμικό αυτό μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο μοντελοποίησης σε πολλές περιπτώσεις, εκτός της προσομοίωσης των λιμενικών τερματικών σταθμών. Συγκεκριμένα έχει αποτελέσει εργαλείο μοντελοποίησης στις τηλεπικοινωνίες, σε στρατιωτικές και αμυντικές επιχειρήσεις, σε επιχειρηματικές διαδικασίες, στον τομέα της υγείας, στη βιομηχανία και στις εφοδιαστικές αλυσίδες.

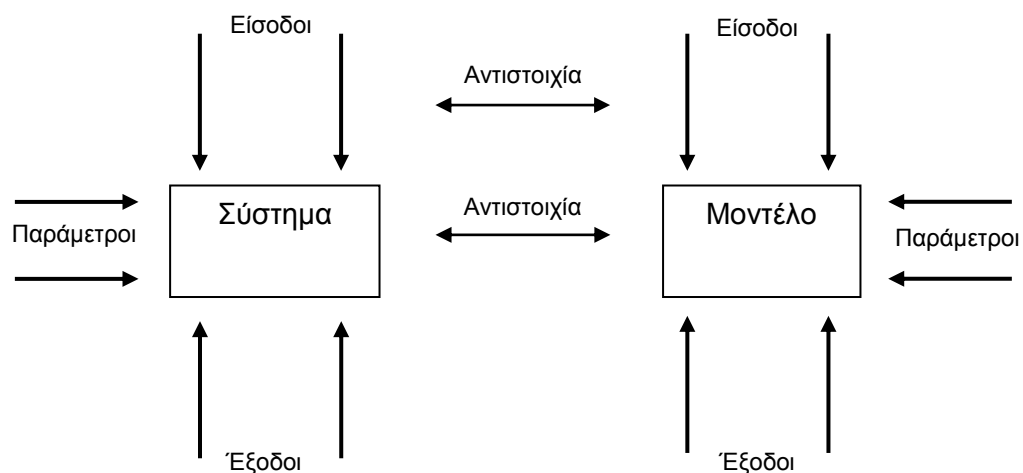
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARENA

3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η μέθοδος της προσομοίωσης αποτελεί έναν από τους στοχαστικούς τρόπους μοντελοποίησης, που κατατάσσονται στην Επιχειρησιακή Έρευνα (Operational Research). Σκοπός της προσομοίωσης είναι η κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος και η περεταίρω αξιολόγηση στρατηγικών βελτιστοποίησης καθώς και εύρεσης αδυναμιών κατά τη διάρκεια δυσμενών συνθηκών λειτουργίας του συστήματος. Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην προσομοίωση φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.1 και τα στάδια ανάλυσης του συστήματος στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3. 1: Σχηματική παράσταση της μεθοδολογίας προσομοίωσης. Πηγή: [24]



Σχήμα 3. 2: Στάδια ανάλυσης συστήματος. Πηγή: [24]

Μονολότι η αρχή της προσομοίωσης δεν στηρίζεται στην ύπαρξη ηλεκτρονικού υπολογιστή, η ραγδαία ανάπτυξη και ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι αυτή που κατέστησε την προσομοίωση ένα πρακτικό εργαλείο ανάλυσης. Η προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή αναφέρεται σε μεθόδους μελέτης μιας πληθώρας μοντέλων πραγματικών συστημάτων με χρήση ποσοτικών εκτιμήσεων, μέσω ενός λογισμικού σχεδιασμένου να μπορεί να μιμηθεί τα χαρακτηριστικά και τις διαδικασίες των συστημάτων.

Από πρακτικής άποψης, η προσομοίωση είναι η διαδικασία του σχεδιασμού και της δημιουργίας ενός μοντέλου, ενός ρεαλιστικού συστήματος, με απώτερο σκοπό τη διεξαγωγή αριθμητικών πειραμάτων που θα δώσουν μια πληρέστερη εικόνα της συμπεριφοράς του για ένα σύνολο συγκεκριμένων συνθηκών.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι κατηγοριοποίησης των μοντέλων προσομοίωσης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, ο κυριότερος τρόπος κατηγοριοποίησης είναι σε:

- Στατικά/Δυναμικά (Static/ Dynamic): 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.
- Συνεχή/Διακριτά (Continuous/Discrete): Σε ένα μοντέλο συνεχούς χρόνου η κατάσταση του συστήματος μπορεί να αλλάζει συνεχώς σε βάθος χρόνου. Αντιθέτως στα μοντέλα διακριτού χρόνου οι αλλαγές καταστάσεων συμβαίνουν μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές. Η συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων απεικονίζονται σε μοντέλου διακριτού χρόνου.
- Προσδιοριστικά/Στοχαστικά (Deterministic/Stochastic): Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα μοντέλα δίχως τυχαιότητα στα δεδομένα τους είναι προσδιοριστικά (ή ντετερμινιστικά), ενώ όταν τα δεδομένα τους ακολουθούν κάποια κατανομή είναι στοχαστικά.

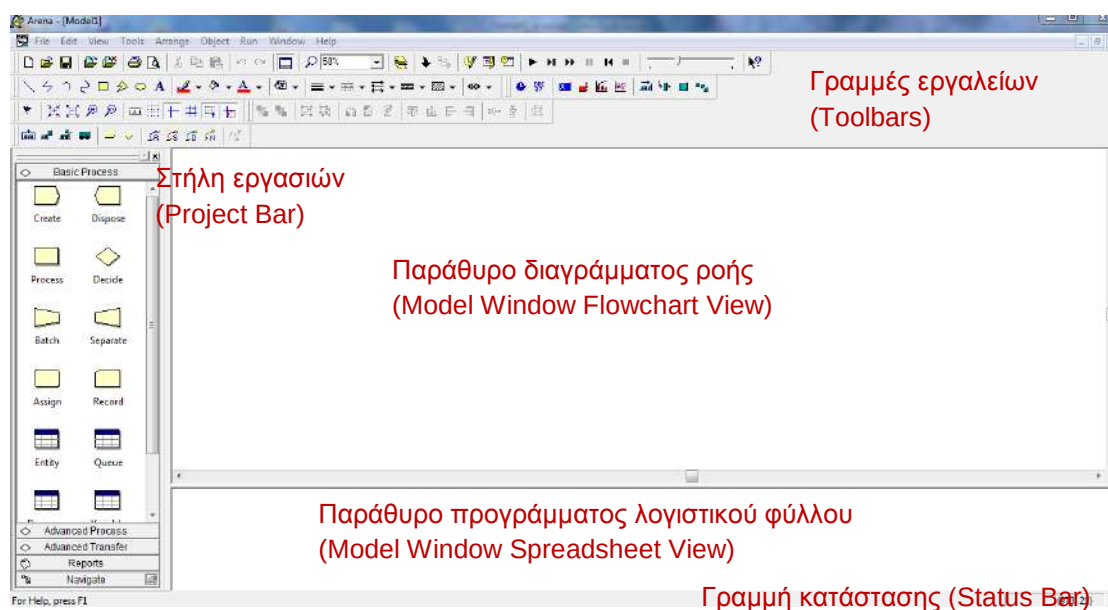
Με τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να μελετηθούν τα διάφορα στοιχεία του συστήματος και οι αλληλεπιδράσεις τους, με λεπτομέρεια και αντικειμενικότητα, ασύγκριτα μεγαλύτερου βαθμού από οποιαδήποτε άλλη τεχνική της επιχειρησιακής έρευνας. Γίνεται έτσι η δυνατή η μελέτη και ο πειραματισμός με πολύπλοκα συστήματα, για τα οποία η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου θα απαιτούσε απλοποιήσεις που θα περιόριζαν σημαντικά τη χρησιμότητα του ή θα ανταποκρίνονταν ελάχιστα στην πραγματικότητα. Για τη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης είναι αναγκαία τα εξής:

- ο καθορισμός των στοιχείων του προβλήματος,
- η περιγραφή της λειτουργίας κάθε στοιχείου και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση,
- ο καθορισμός των παραμέτρων εισόδου του συστήματος και
- ο καθορισμός των παραμέτρων εξόδου του συστήματος.

3.1.1 Λογισμικό προσομοίωσης Arena

Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την ανάλυση του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου στοιβάσεως είναι το Arena 12.0 (Rockwell Software). Το Arena είναι ένα εκτεταμένο λογισμικό προσομοίωσης και οπτικής αναπαράστασης ενός προσομοιωμένου συστήματος. Βασίζεται στη γλώσσα προσομοίωσης SIMAN (Simulation Modeling and Analysis), διατηρεί τη βασική δομή της αλλά προστίθεται σε αυτή ένα πλήρως γραφικό περιβάλλον. Οι διαθέσιμες εκδόσεις του Arena είναι οι εξής: Student Edition (δωρεάν έκδοση για φοιτητές που έρχονται για πρώτη φορά σε επαφή με το λογισμικό, αποτελεί εφαρμογή για μη εμπορική χρήση), Research Edition (αποτελεί έκδοση για ακαδημαϊκή χρήση, αποτελεί εφαρμογή για μη εμπορική χρήση), Basic Edition (αποτελεί εισαγωγική έκδοση και περιλαμβάνει μόνο ένα βασικό σύνολο προτύπων), Professional Edition (αποτελεί έκδοση γενικής χρήσης και περιλαμβάνει τα περισσότερα εργαλεία και πρότυπα), Enterprise Suite (περιλαμβάνει όλα τα διαθέσιμα εργαλεία και πρότυπα για την κάλυψη ενός ευρέως φάσματος αναγκών). Στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η έκδοση για φοιτητές.

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 που είναι: Αρχείο (File), Επεξεργασία (Edit), Προβολή (View), Εργαλεία (Tools), Οργάνωση (Arrange), Αντικείμενο (Object), Εκτέλεση (Run), Παράθυρο (Window), Βοήθεια (Help). Υπάρχουν και πολλές ακόμα γραμμές εργαλείων στο επάνω μέρος της οθόνης που σχετίζονται με την προσομοίωση στις οποίες θα γίνει στη συνέχεια αναφορά. Το περιβάλλον του προγράμματος αποτελείται από τις γραμμές εργαλείων (toolbars), τη στήλη εργασιών (project bar), τη γραμμή κατάστασης (status bar), το παράθυρο του διαγράμματος ροής (flowchart view) και το παράθυρο προγράμματος λογιστικού φύλλου (spreadsheet view) όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3. 1: Κεντρική οθόνη του προγράμματος Arena.

Η δημιουργία ενός τυπικού μοντέλου προσομοίωσης στο Arena περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή λειτουργικών μονάδων (modules) και απόθεση αυτών στο παράθυρο διαγράμματος ροής.
2. Γραφική διασύνδεση των λειτουργικών μονάδων για την επισήμανση της φυσικής ροής των διαδικασιών ή και των λογικών ροών ελέγχου.
3. Παραμετροποίηση των λειτουργικών μονάδων (εισαγωγή τιμών, συναρτήσεων κ.α.).
4. Δημιουργία κώδικα για συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία δε χρειάστηκε να δημιουργηθεί κώδικας για την ανάπτυξη των μοντέλων.

Η στήλη εργασιών (project bar) περιέχει τις ενεργές καρτέλες με τις οποίες δουλεύουμε εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής :

1. Καρτέλα βασικών διαδικασιών (Basic Process) όπου περιέχονται τα θεμελιώδη σχήματα που θα χρησιμοποιηθούν και ονομάζονται λειτουργικές μονάδες (modules).
2. Καρτέλα προηγμένων διαδικασιών (Advanced process) όπου περιέχονται προηγμένες λειτουργικές μονάδες.
3. Καρτέλα προηγμένων μεταφορών (Advanced transfer) όπου περιέχονται λειτουργικές μονάδες που σχετίζονται με μεταφορές οντοτήτων.
4. Καρτέλα αναφορών (Reports) στα οποία συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφού έχει εκτελεστεί.
5. Καρτέλα πλοήγησης (Navigate) το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να αλλάξει οπτικές γωνίες στο μοντέλο και να μεταβεί σε κάποιο υπομοντέλο, στη περίπτωση που το μοντέλο είναι ιεραρχικό και υπάρχουν πολλά επίπεδα.

Η γραμμή κατάστασης (status bar) απεικονίζει ποικίλες πληροφορίες, ανάλογα με το τι συμβαίνει την τρέχουσα στιγμή στο πρόγραμμα. Για παράδειγμα μπορεί να απεικονίζει τις συντεταγμένες θέσεις του κέρσορα του ποντικιού ή τον χρόνο και τον αριθμό των επαναλήψεων στην περίπτωση που το μοντέλο εκτελείται.

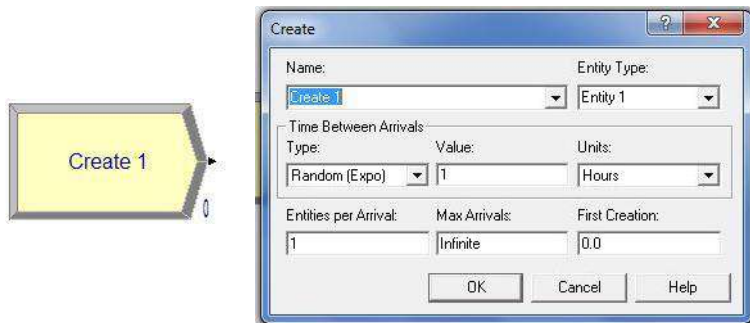
Οι λειτουργικές μονάδες (modules) της Arena αποτελούνται από τις λειτουργικές μονάδες του διαγράμματος ροής (flowchart modules) και τις λειτουργικές μονάδες δεδομένων (data modules) τα οποία προσδιορίζουν την διαδικασία που προσομοιώνεται. Συγκεκριμένα, οι λειτουργικές μονάδες του διαγράμματος ροής (flowchart modules) περιγράφουν τις δυναμικές διαδικασίες στο μοντέλο ενώ οι λειτουργικές μονάδες δεδομένων (data modules) προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά των διαφόρων στοιχείων της διαδικασίας όπως οι οντότητες (entities), οι πόροι (resources), και οι ουρές (queues). Μπορούν επίσης να είναι μεταβλητές (variables) ή άλλοι τύποι αριθμητικών τιμών και εκφράσεων που αφορούν ολόκληρο το μοντέλο.

Επίκεντρο του τρόπου προσομοίωσης είναι οι οντότητες (entities). Οι οντότητες δημιουργούνται, αλληλεπιδρούν με τους πόρους του συστήματος και τέλος εξάγονται από το σύστημα. Οι οντότητες μπορούν να αναπαριστούν πελάτες, τηλεφωνικές κλήσεις, προϊόντα και γενικώς οτιδήποτε απαιτεί η περίπτωση που μελετάται.

1. Καρτέλα βασικών διαδικασιών (Basic Process Panel)

Λειτουργικές μονάδες του διαγράμματος ροής (flowchart modules)

Λειτουργική μονάδα δημιουργίας - Create module



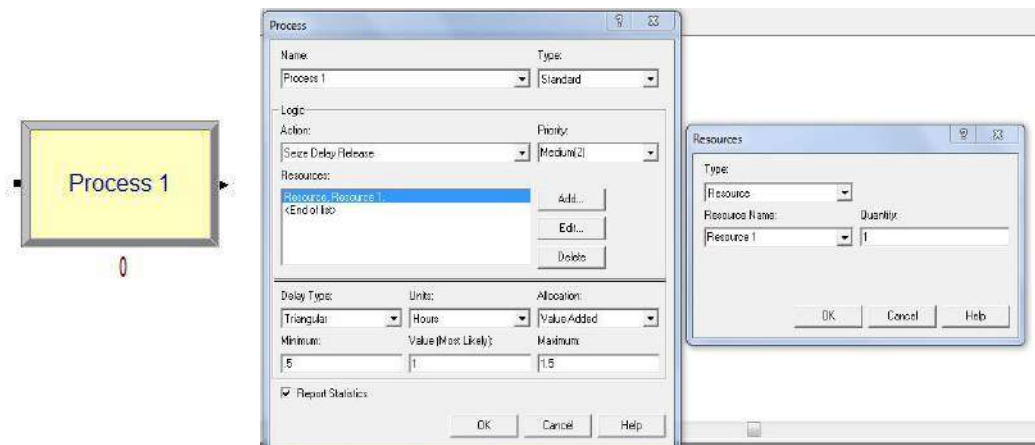
Αρχικό στοιχείο κάθε μοντέλου είναι η λειτουργική μονάδα δημιουργίας (create module) που δημιουργεί οντότητες. Στο πλαίσιο διαλόγου της (dialog box) ορίζεται το όνομα της μονάδας και ο τύπος της οντότητας που γεννιέται. Στη συνέχεια στο χωρίο Χρόνος μεταξύ αφίξεων (Time Between Arrivals) ορίζεται με λεπτομέρεια ο χρόνος μεταξύ αφίξεων των οντοτήτων. Οι αφίξεις των οντοτήτων ακολουθούν κάποια κατανομή η οποία επιλέγεται στον τύπο (Type) του χρόνου μεταξύ των αφίξεων. Η κατανομή αυτή μπορεί να είναι τυχαία (random), να είναι σταθερή (constant), να περιγράφεται από κάποια παράσταση (expression) ή να ακολουθεί ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα (schedule). Επίσης ορίζονται ο αριθμός οντοτήτων ανά άφιξη, ο μέγιστος αριθμός αφίξεων και η χρονική στιγμή πρώτης δημιουργίας. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι οι αφίξεις πελατών σε ένα σύστημα εξυπηρέτησης όπως οι αφίξεις πλοίων σε ένα λιμάνι.

Λειτουργική μονάδα διάθεσης - Dispose module



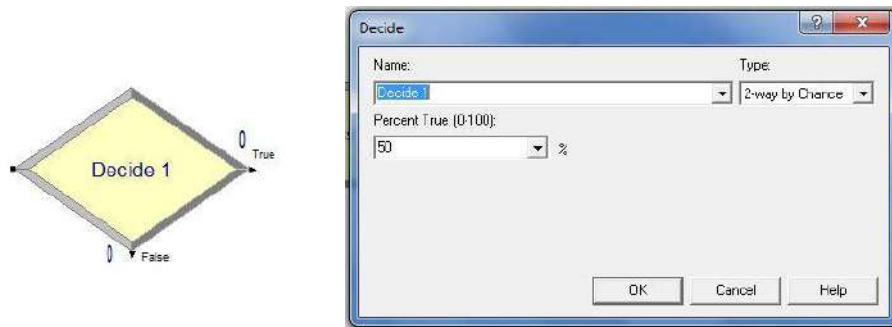
Η λειτουργική μονάδα διάθεσης είναι το τελικό σημείο των οντοτήτων, όπου εξάγονται από το σύστημα και παύουν να υπάρχουν. Στο πλαίσιο διαλόγου της ορίζεται ένα όνομα διάθεσης των οντοτήτων. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι η αποχώρηση πελατών από το σύστημα όπως η αποχώρηση των πλοίων από το λιμάνι αφού εξυπηρετηθούν.

Λειτουργική μονάδα διαδικασίας - Process module



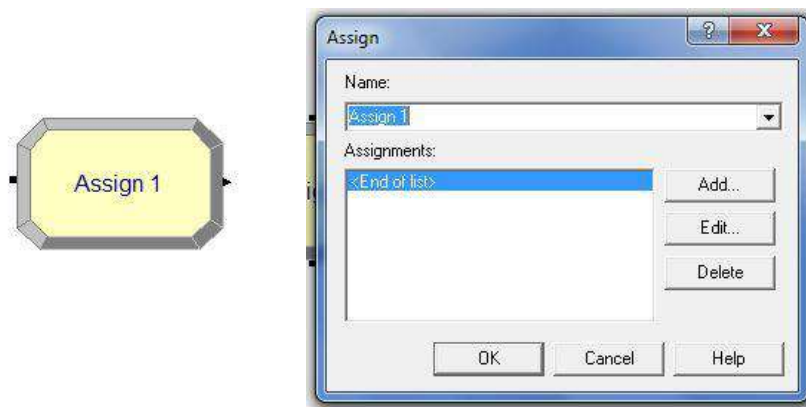
Η λειτουργική μονάδα διαδικασίας απεικονίζει την κάθε διαδικασία που γίνεται στο πραγματικό σύστημα και περιλαμβάνει τους πόρους που χρησιμοποιούνται, την ουρά αναμονής και την καθυστέρηση της οντότητας μέχρι η τελευταία να εξυπηρετηθεί. Στο πλαίσιο διαλόγου ορίζεται αρχικά το όνομα της διαδικασίας και ο τύπος 'standard' που σημαίνει ότι όλες οι λειτουργίες-διαδικασίες του μοντέλου θα προσδιοριστούν σε αυτή τη μονάδα και όχι σε κάποιο ιεραρχικό υπομοντέλο. Στη συνέχεια, καθορίζεται η λογική που διέπει την αλληλεπίδραση της οντότητας με τους διαθέσιμους πόρους (resources). Η ενέργεια που επιλέγουμε (action) είναι η 'seize delay release' που δείχνει ότι μια οντότητα καταλαμβάνει μια μονάδα διαθέσιμου πόρου (seize), μένει εκεί όσο χρειάζεται για να εξυπηρετηθεί (delay) και τελικά ελευθερώνει τον πόρο (release) για να είναι έτοιμος για την επόμενη οντότητα. Επιπλέον μπορούν να προσδιοριστούν διαφορετικές προτεραιότητες (priority) των οντοτήτων προκειμένου να εξυπηρετηθούν από τον διαθέσιμο πόρο. Όσον αφορά στους πόρους ορίζεται το όνομα και η ποσότητα των μονάδων. Η ποσότητα δεν αφορά την ποσότητα των πόρων που υπάρχουν στο σύστημα αλλά τις μονάδες που πρέπει να εργαστούν ώστε να εξυπηρετηθεί η οντότητα. Ακόμα προσδιορίζεται η κατανομή πιθανότητας εξυπηρέτησης που μπορεί να είναι τριγωνική (triangular), κανονική (normal), σταθερή (constant), βάση κάποιας παράστασης (expression) ή ομοιόμορφη (uniform). Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι η κατάληψη μίας θέσης παραβολής από ένα πλοίο, η παραμονή του εκεί μέχρι να εξυπηρετηθεί και η αποχώρηση του μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία με απελευθέρωση της θέσης παραβολής.

Λειτουργική μονάδα απόφασης - Decide module



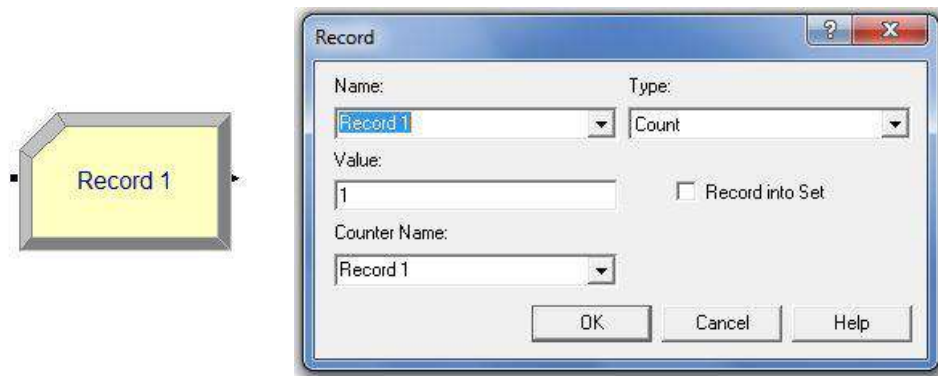
Η λειτουργική μονάδα απόφασης επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων στο σύστημα. Ο κανόνας για την επιλογή απόφασης μπορεί να είναι βάσει τύχης (chance) ή βάση συνθήκης (condition). Για παράδειγμα μπορεί να έχουμε 50% αληθές, 50% ψευδές. Οι συνθήκες μπορεί να είναι βασισμένες στην αξία των χαρακτηριστικών, των μεταβλητών, στον τύπο της οντότητας ή σε κάποια έκφραση. Στις πολύπλοκες μονάδες αποφάσεων υπάρχουν N έξοδοι (N-way by chance or N-way by condition). Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι να στέλνει τα πλοία με προτεραιότητα σε θέσεις παραβολής τέτοιες ώστε να εξυπηρετηθούν γρήγορα.

Λειτουργική μονάδα εκχώρησης - Assign module



Η λειτουργική μονάδα εκχώρησης χρησιμοποιείται για την εκχώρηση νέων τιμών σε μεταβλητές (variables), σε χαρακτηριστικά (attributes), τύπους (entity type) και εικόνες οντοτήτων (entity picture) ή σε άλλες μεταβλητές του συστήματος (other). Μπορούν να γίνουν πολλές εκχωρήσεις σε μία μόνο λειτουργική μονάδα. Οι μεταβλητές που θα εκχωρηθούν αφορούν το σύστημα ενώ τα χαρακτηριστικά αφορούν τις οντότητες. Τυπική χρήση είναι να εκχωρούν προτεραιότητες σε ορισμένους πελάτες.

Λειτουργική μονάδα εγγραφής - Record module



Η λειτουργική μονάδα εγγραφής χρησιμοποιείται στη διαμόρφωση και εξαγωγή στατιστικών στοιχείων από το μοντέλο. Ορίζεται το όνομα της καταγραφής και ο τύπος της ο οποίος μπορεί να είναι μετρητής (count), στατιστικά οντότητας (entity statistics), χρόνος μεταξύ αφίξεων (time interval), χρόνος μεταξύ των οντοτήτων (time between) ή κάποια έκφραση που επιθυμεί ο χρήστης (expression). Τέλος ορίζεται το όνομα των στοιχείων που μετρώνται. Τυπική χρήση είναι η καταγραφή του χρόνου που χρειάζονται οι πελάτες σε προτεραιότητα να περιμένουν.

Λειτουργικές μονάδες δεδομένων (data modules)

Λειτουργική μονάδα πόρου - Resource module

Resource - Basic Process									
	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	☒

Εφόσον έχει προσδιοριστεί ο πόρος (resource) στη λειτουργική μονάδα διαδικασίας (process module), γίνεται αυτόματα μια εγγραφή στη λειτουργική μονάδα δεδομένων των πόρων (resource data module). Επιλέγοντας από τη μονάδα δεδομένων, τη λειτουργική μονάδα των πόρων (resource module), εμφανίζονται στο παράθυρο προγράμματος λογιστικού φύλλου (spreadsheet view) όλες οι επιλογές του πόρου. Επιλέγεται αν η διαθεσιμότητα του πόρου θα είναι σταθερό μέγεθος ή θα μεταβάλλεται βάσει προγράμματος (type), επιλέγεται ο αριθμός των πόρων που θα υπάρχουν στο σύστημα (capacity) και υπάρχει δυνατότητα ορισμού πιθανών βλαβών (failures). Ακόμα μπορούν να ορισθούν στοιχεία κόστους λειτουργίας αν είναι επιθυμητό. Τυπική χρήση είναι ο καθορισμός προγράμματος που θα δουλεύουν οι γερανογέφυρες στα πλοία. Δηλαδή μπορεί να ορισθεί ότι τις πρώτες ώρες λειτουργίες ενός λιμανιού θα υπάρχουν δύο γερανογέφυρες σε μία θέση παραβολής και ύστερα από τέσσερις ώρες να προστεθεί ακόμα μία γερανογέφυρα.

Λειτουργική μονάδα ουράς - Queue module

Queue - Basic Process				
	Name	Type	Shared	Report Statistics
1	Queue 1	First In First Out	☐	☒

Όταν ο πόρος είναι απασχολημένος, η οντότητα που πρόκειται να εξυπηρετηθεί από αυτό το πόρο θα πρέπει να αναμένει στην ουρά. Επιλέγοντας λοιπόν από τη μονάδα δεδομένων, τη λειτουργική μονάδα ουράς (queue module) μπορεί να ορισθεί ο κανόνας αναμονής (First In First Out, Last In First Out, Lowest Attribute Value, Highest Attribute Value) της οντότητας. Επίσης μπορεί η ουρά να ορισθεί ως μοιραζόμενη (shared). Αυτό σημαίνει ότι πελάτες που έρχονται από διαφορετικές αφίξεις μπορούν να περιμένουν σε κοινή ουρά για να εξυπηρετηθούν. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι να συνδυάζεται με τις λειτουργικές μονάδες από τις προηγμένες διαδικασίες (advanced process) και να γίνεται μια ουρά μοιραζόμενη.

Λειτουργική μονάδα οντότητας - Entity module

Entity - Basic Process									
	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	☒

Στη λειτουργική μονάδα δημιουργίας (create module) προσδιορίστηκε ένας τύπος οντότητας. Επιλέγοντας από τη μονάδα δεδομένων, τη λειτουργική μονάδα οντοτήτων (entity module), εμφανίζονται στο παράθυρο προγράμματος λογιστικού φύλλου (spreadsheet view) όλες οι επιλογές της οντότητας. Μπορεί να καθορισθεί ο τύπος της οντότητας, η εικόνα που θα αντιπροσωπεύει την οντότητα όταν το μοντέλο εκτελείται καθώς και στοιχεία κόστους όταν είναι επιθυμητό. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι να καθορίζονται η εικόνα σε ένα τύπο οντότητας.

Λειτουργική μονάδα μεταβλητών - Variable module

Variable - Basic Process							
	Name	Rows	Columns	Data Type	Clear Option	Initial Values	Report Statistics
1	Variable 1			Real	System	0 rows	☐

Η λειτουργική μονάδα μεταβλητών (variable module) επιλέγεται από τη μονάδα δεδομένων και εμφανίζεται στο παράθυρο προγράμματος λογιστικού φύλλου. Χρησιμοποιείται για να οριστούν οι διαστάσεις και οι αρχικές τιμές των μεταβλητών. Οι μεταβλητές μπορεί να αναφέρονται σε άλλες μονάδες, μπορεί να πάρουν νέες τιμές στη μονάδα εκχώρησης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε έκφραση. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι να ορίζεται η αρχική τιμή μιας μεταβλητής η οποία θα έχει ορισθεί σε κάποια λειτουργική μονάδα του διαγράμματος ροής.

Λειτουργική μονάδα προγράμματος - Schedule module

Schedule - Basic Process						
	Name	Format Type	Type	Time Units	Scale Factor	Durations
1	Schedule 1	Duration	Capacity	Hours	1.0	0 rows

Η λειτουργική μονάδα προγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη λειτουργική μονάδα πόρων για τον καθορισμό ενός προγράμματος λειτουργίας για τον κάθε πόρο ή με τη λειτουργική μονάδα δημιουργίας για τον καθορισμό ενός προγράμματος αφίξεων. Τυπική χρήση είναι ο καθορισμός του ρυθμού αφίξεων των πλοίων σε ένα λιμάνι σύμφωνα με το πρόγραμμα των αρχών.

Λειτουργική μονάδα ρύθμισης - Set module

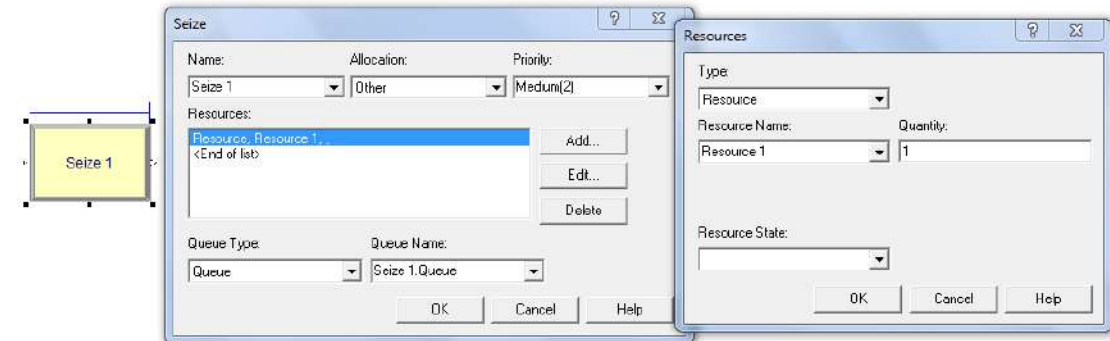
Set - Basic Process			
	Name	Type	Members
1	Set 1	Resource	0 rows
Double-click to add new row.			
		Resource	
		Counter	
		Tally	
		Entity Type	
		Entity Picture	

Στη λειτουργική μονάδα ρυθμίσεων μπορούν να προσδιοριστούν ποικίλοι τύποι από σετ όπως σετ πόρων, μετρήσεων, τύπων και εικόνων οντοτήτων. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι να φτιάχνει ένα σετ πόρων, για παράδειγμα ένα σετ με πέντε οχήματα μεταφοράς, και έπειτα να χρησιμοποιείται αυτό το σετ σε κάποια άλλη λειτουργική μονάδα όπου θα καθορίζει τον κανόνα που θα λειτουργεί αυτό το σετ, για παράδειγμα να καθορίζει ότι τα πέντε οχήματα θα λειτουργούν σε κυκλική σειρά.

2. Καρτέλα προηγμένων διαδικασιών (Advanced process)

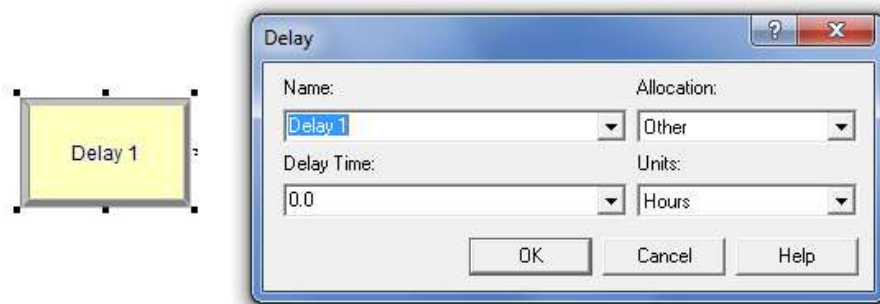
Λειτουργικές μονάδες του διαγράμματος ροής (flowchart modules)

Λειτουργική μονάδα δέσμευσης – Seize module



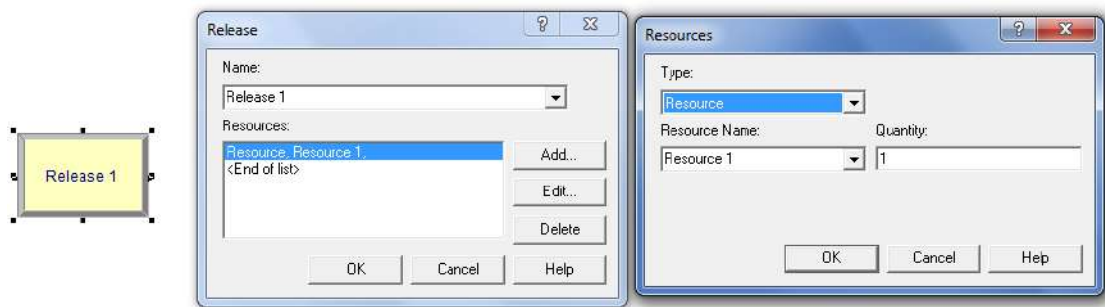
Η λειτουργική μονάδα δέσμευσης χρησιμοποιείται για να εκχωρήσει έναν ή περισσότερους πόρους σε μία οντότητα. Μπορεί να δεσμεύσει ένα συγκεκριμένο πόρο, ένα μέλος ενός σετ από πόρους ή έναν πόρο που έχει προσδιοριστεί μέσω κάποιου χαρακτηριστικού (attribute) ή παράστασης (expression). Όταν μια οντότητα εισέρχεται σε αυτή τη μονάδα, περιμένει σε ουρά για να εξυπηρετηθεί. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι η δέσμευση μίας γερανογέφυρας για να εκφορτώνει εμπορευματοκιβώτια από ένα τμήμα ενός πλοίου.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης – Delay module



Η λειτουργική μονάδα καθυστέρησης, αναλαμβάνει να καθυστερήσει μια οντότητα. Ο χρόνος καθυστέρησης μπορεί να είναι σταθερός ή να υπακούει σε κάποια κατανομή. Τυπική χρήση αυτή της μονάδας είναι η καθυστέρηση ενός πόρου, μιας γερανογέφυρας για παράδειγμα, μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία εκφόρτωσης από το πλοίο ενός εμπορευματοκιβωτίου και φόρτωσης του σε ένα φορτηγό.

Λειτουργική μονάδα απελευθέρωσης – Release module



Η λειτουργική μονάδα απελευθέρωσης αναλαμβάνει να απελευθερώσει έναν πόρο ή ένα σετ πόρων που προηγουμένως είχαν δεσμευτεί. Μόλις μια οντότητα εισέλθει σε αυτή τη μονάδα, ο πόρος που είχε χρησιμοποιήσει απελευθερώνεται και η επόμενη οντότητα που περίμενε σε ουρά για να εξυπηρετηθεί μπορεί να δεσμεύσει εκ νέου τον πόρο. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι η απελευθέρωση μιας γερανογέφυρας μόλις φορτώσει το εμπορευματοκιβώτιο, που είχε αναλάβει να εκφορτώσει από το πλοίο, σε ένα φορτηγό. Μόλις λοιπόν απελευθερωθεί μπορεί να δεσμευτεί από επόμενο εμπορευματοκιβώτιο που αναμένει στην ουρά για να εκφορτωθεί.

3. Καρτέλα προηγμένων μεταφορών (Advanced transfer)

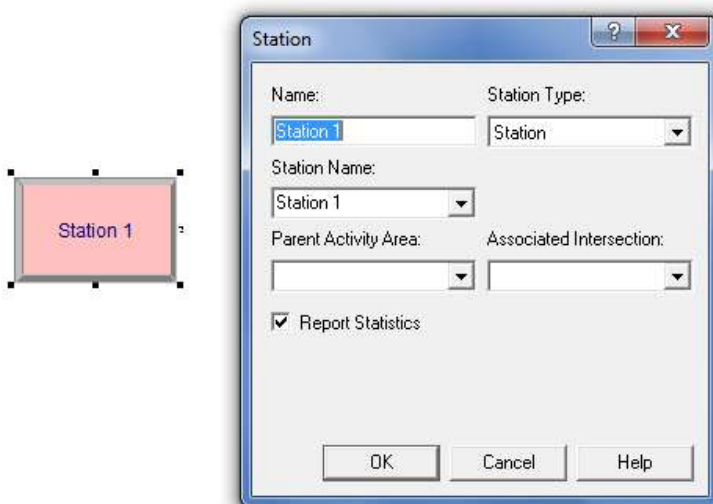
Λειτουργικές μονάδες του διαγράμματος ροής (flowchart modules)

Λειτουργική μονάδα διαδρομής – Route module



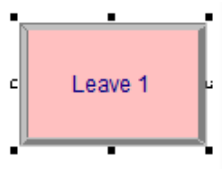
Η λειτουργική μονάδα διαδρομής μεταφέρει μια οντότητα σε ένα συγκεκριμένο σταθμό ή στον επόμενο σταθμό που είναι σε σειρά αν ακολουθείται μια συγκεκριμένη σειρά διαδρομών (destination type: station or sequence). Ακόμα στη μονάδα αυτή προσδιορίζεται ένα χρόνος καθυστέρησης για τη μεταφορά της οντότητας (route time). Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι η μεταφορά ενός εμπορευματοκιβωτίου σε μια συγκεκριμένη θέση χωρίς να προσδιορίζεται όχημα μεταφοράς.

Λειτουργική μονάδα σταθμού – Station module



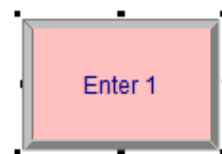
Η λειτουργική μονάδα σταθμού προσδιορίζει ένα σταθμό (ή ένα σει από σταθμούς) και αποτελούν μια φυσική τοποθεσία για τις οντότητες. Τυπική χρήση ενός σταθμού είναι ο χώρος προσωρινής αποθήκευσης των εμπορευματοκιβωτίων όπου μεταφέρονται τα εμπορευματοκιβώτια.

Λειτουργική μονάδα αναχώρησης – Leave module



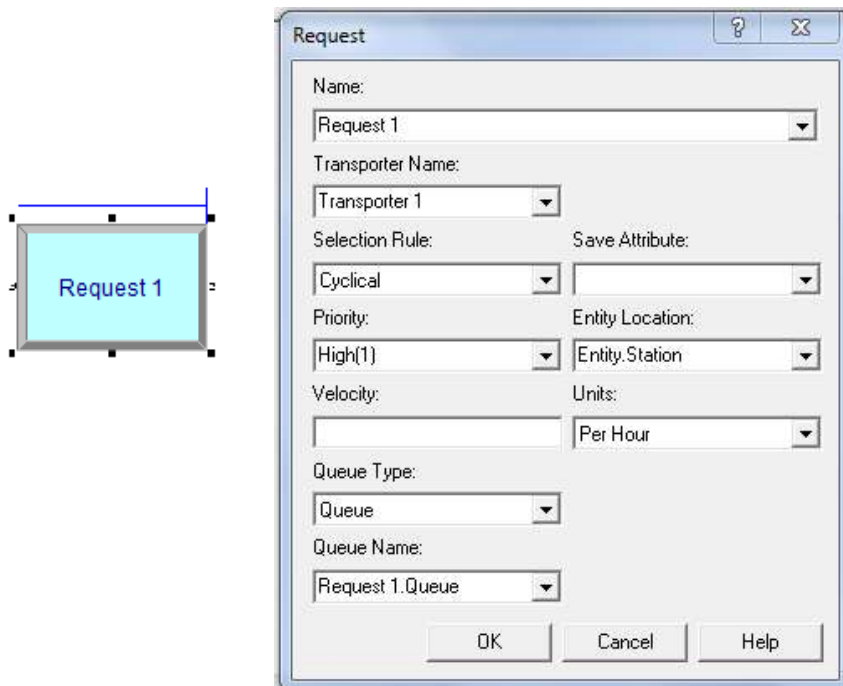
Η λειτουργική μονάδα αναχώρησης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει μια οντότητα σε ένα σταθμό ή σε μία λειτουργική μονάδα. Η οντότητα μπορεί να μεταφερθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να μεταφερθεί σε ένα σταθμό με χρήση κάποιου οχήματος μεταφοράς και ο δεύτερος τρόπος είναι να μεταφερθεί σε κάποια λειτουργική μονάδα γραφικά. Όταν μια οντότητα φτάνει σε αυτή τη μονάδα μπορεί να καλέσει έναν πόρο (resource), ένα όχημα μεταφοράς (transporter) ή έναν μεταφορέα (conveyor). Στη μονάδα αυτή γίνεται δέσμευση ενός πόρου ή μεταφορέα και αμέσως μετά πραγματοποιείται μεταφορά της οντότητας. Μπορεί να επίσης να ορισθεί καθυστέρηση πριν τη μεταφορά. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι το κάλεσμα ενός οχήματος μεταφοράς, η καθυστέρηση μέχρι να φορτωθεί το εμπορευματοκιβώτιο στο όχημα και η μεταφορά του στους χώρους στοιβασίας.

Λειτουργική μονάδα άφιξης – Enter module



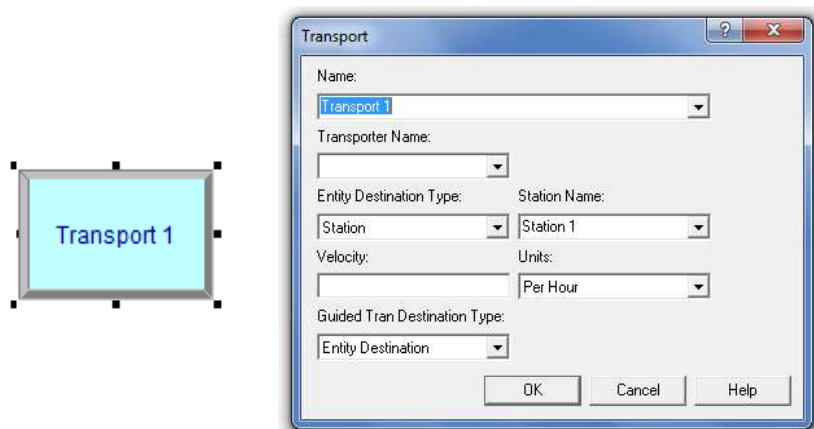
Στη μονάδα άφιξης προσδιορίζεται ένας σταθμός ή ένα σετ σταθμών. Όταν μια οντότητα φτάσει σε αυτή τη μονάδα μπορεί να προσδιοριστεί ένας χρόνος καθυστέρησης για εκφόρτωση και ύστερα απελευθερώνεται το όχημα μεταφοράς αν χρησιμοποιήθηκε. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι η εκφόρτωση ενός εμπορευματοκιβωτίου στους χώρους στοιβασίας και η απελευθέρωση του φορτηγού που το μετέφερε.

Λειτουργική μονάδα αιτήματος – Request module



Η λειτουργική μονάδα αιτήματος εκχωρεί ένα όχημα μεταφοράς σε μια οντότητα και τη μεταφέρει στη θέση του σταθμού που έχει ορισθεί. Το όχημα μεταφοράς που εκχωρείται στην κάθε οντότητα υπακούει σε κάποιον κανόνα και με βάση αυτόν επιλέγεται. Για παράδειγμα τα οχήματα μεταφοράς μπορεί να επιλέγονται κυκλικά (cyclical), τυχαία (random), να επιλέγεται πάντα συγκεκριμένο όχημα (specific member), να επιλέγεται το πρώτο που είναι διαθέσιμο (preferred order), να επιλέγεται αυτό που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση (largest distance) ή αυτό που απέχει τη μικρότερη απόσταση (smallest distance). Όταν η οντότητα φτάσει σε αυτή τη λειτουργική μονάδα της εκχωρείται ένα όχημα μεταφοράς όταν είναι διαθέσιμο. Αν δεν υπάρχει διαθέσιμο όχημα μεταφοράς τότε η οντότητα θα περιμένει στην ουρά. Τυπική χρήση αυτής της λειτουργικής μονάδας είναι το αίτημα για όχημα μεταφοράς όταν μια γερανογέφυρα έχει εκφορτώσει ένα εμπορευματοκιβώτιο και περιμένει να το φορτώσει στο όχημα για να μεταφερθεί το εμπορευματοκιβώτιο στους χώρους στοιβάσεως.

Λειτουργική μονάδα μεταφοράς – Transport module



Η λειτουργική μονάδα μεταφοράς μεταφέρει την οντότητα που του έχει εκχωρηθεί στον σταθμό προορισμού. Το όχημα μεταφοράς κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα και πρόκειται να διανύσει κάποια απόσταση. Επομένως χρειάζεται κάποιος χρόνος μεταφοράς. Μόλις ολοκληρωθεί η μεταφορά, η οντότητα εμφανίζεται στη λειτουργική μονάδα σταθμού. Μπορούν να επιλεγούν δύο τύποι οχημάτων μεταφοράς, τα οχήματα μεταφοράς που πραγματοποιούν ελεύθερη μεταφορά (free transporters) και τα οχήματα μεταφοράς που καθοδηγούνται (guided transporters). Όταν χρησιμοποιείται όχημα που πραγματοποιεί ελεύθερη μεταφορά τότε ο χρόνος μεταφοράς της οντότητας εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του οχήματος και από την απόσταση που πρέπει να διανύσει. Ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο χρόνος μεταφοράς εξαρτάται από τη ταχύτητα, την απόσταση, την επιτάχυνση και επιβράδυνση του οχήματος και την συμφόρηση που μπορεί να συναντήσει στο δρόμο κατά τη μεταφορά του και πιθανόν το καθυστερήσει. Τυπική χρήση είναι η μεταφορά εμπορευματοκιβωτίου από το κρηπίδωμα στο χώρο προσωρινής εναπόθεσης. Αν το όχημα που χρησιμοποιείται είναι ένα φορτηγό (yard truck) τότε έχουμε ελεύθερη μεταφορά, ενώ αν το όχημα είναι ένα αυτόματο όχημα μεταφοράς (AGV) τότε θα πρέπει να καθοδηγηθεί σε συγκεκριμένο δίκτυο.

Λειτουργική μονάδα ελευθέρωσης – Free module



Στη λειτουργική μονάδα ελευθέρωσης το όχημα μεταφοράς που εκτελούσε κάποια μεταφορά έφτασε στον προορισμό του και ελευθερώνεται έτσι ώστε να μπορεί να εκχωρηθεί σε επόμενη οντότητα. Τυπική χρήση είναι η ελευθέρωση ενός φορτηγού που μετέφερε εμπορευματοκιβώτιο όταν το εκφορτώσει.

Λειτουργικές μονάδες δεδομένων (data modules)

Λειτουργική μονάδα ακολουθίας – Sequence module

The screenshot shows the 'Sequence - Advanced Transfer' window. It contains a table with the following data:

	Name	Steps
1	Sequence 1	1 rows

Below the table is the text: "Double-click here to add a new row." A pop-up window titled 'Steps' is open, showing a table with the following data:

	Station Name	Step Name	Next Step	Assignments
1	Station 1			0 rows

Below the 'Steps' table is the text: "Double-click here to add a new row."

Η λειτουργική μονάδα ακολουθίας χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει κάποια ακολουθία στη ροή κίνησης των οντοτήτων. Αποτελείται από λίστα από σταθμούς που θα πάει η οντότητα. Για κάθε σταθμό μπορούν να εκχωρηθούν χαρακτηριστικά και μεταβλητές. Για να ακολουθήσει η οντότητα μια συγκεκριμένη ακολουθία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αρχικά μια λειτουργική μονάδα εκχώρησης ώστε να της εκχωρηθεί αυτό το χαρακτηριστικό. Τυπική χρήση αυτής της μονάδας είναι ο προσδιορισμός μιας σειράς δρομολογίων για την εξυπηρέτηση μιας οντότητας.

Λειτουργική μονάδα οχήματος μεταφοράς – Transporter module

The screenshot shows the 'Transporter - Advanced Transfer' window. It contains a table with the following data:

	Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	Report Statistics
1	Transporter 2	1	Free Path	Transporter 2.Distance	1.0	Per Hour	1 rows	☒

Below the table is the text: "Double-click here to add a new row." A pop-up window titled 'Initial Position Status' is open, showing a table with the following data:

	Initial Position	Initial Status
1	Default	Active

Below the 'Initial Position Status' table is the text: "Double-click here to add a new row."

Στη λειτουργική μονάδα του οχήματος μεταφοράς μπορεί να προσδιοριστεί ο αριθμός των οχημάτων που διατίθενται, ο τύπος τους δηλαδή αν είναι ελεύθερης διαδρομή ή καθοδηγούμενα, και η αρχική ταχύτητά τους αν βρίσκονται σε κάποιο αρχικό σταθμό πριν ξεκινήσουν την λειτουργία τους. Τυπική χρήση είναι ο προσδιορισμός του αριθμού των οχημάτων μεταφοράς που διαθέτει ένα τερματικός σταθμός.

Λειτουργική μονάδα απόστασης – Distance module

Distance - Advanced Transfer

	Name	Stations
1	Transporter 2.Distance	1 rows
Double-click here to add a new row.		

Stations

	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station 1	Station 2	1
Double-click here to add a new row.			

Στη λειτουργική μονάδα απόστασης προσδιορίζονται οι μετακινήσεις που πραγματοποιούν τα οχήματα μεταφοράς και οι αποστάσεις κάθε μετακίνησης. Τυπική χρήση είναι ο προσδιορισμός της απόστασης που πρέπει να πραγματοποιήσει ένα όχημα μεταφοράς από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβάσεως και από το χώρο στοιβάσεως στο κρηπίδωμα πάλι.

Γραμμή εργαλείων – Toolbars

Το Arena παρέχει πληθώρα γραφικών τα οποία δίνουν καλύτερη οπτική στο μοντέλο που εκτελείται κάνοντας το πιο κατανοητό και εύχρηστο. Πρόσβαση στα γραφικά και γραφήματα παρέχει η γραμμή εργαλείων εμψύχωσης (animation).



Αρχικά είναι δυνατή η δημιουργία καινούργιου φύλλου εργασίας, το άνοιγμα νέου φακέλου, η αποθήκευση υπάρχοντος μοντέλου, η επισύναψη καινούργιων καρτελών ή η απόσπασή τους, η εκτύπωση, η μεγέθυνση του παραθύρου διαγράμματος ροής, η μετάβαση σε υπομοντέλα και άλλες επεξεργασίες.



Στη συνέχεια, είναι δυνατή η σχεδίαση με ανοιχτές γραμμές ή κλειστά σχήματα, η εισαγωγή σχολίων, η επεξεργασία τους με χρώματα, η εισαγωγή διαφόρων τύπων μονοπατιών, η εισαγωγή ρολογιού που θα συμβαδίζει με την εκτέλεση του μοντέλου, η εισαγωγή μεταβλητών και γραφημάτων και η εισαγωγή εικόνων στους πόρους και στις οντότητες του μοντέλου.



Επίσης είναι δυνατή η εισαγωγή εικόνων στα οχήματα μεταφοράς και η σχεδίαση των χώρων στάθμευσης τους όταν είναι διαθέσιμα και δεν εκτελούν κάποια μεταφορά. Στο animation που πιθανόν έχει σχεδιαστεί σε κάποιο μοντέλο, είναι δυνατή η εισαγωγή των σταθμών καθώς και η σχεδίαση των διαδρομών που πρέπει να εκτελεστούν. Οι διαδρομές αυτές μπορούν να εισαχθούν ως διαδρομές (route), ως τμήματα κάποιας διαδρομής (segment), ως αποστάσεις (distance) ή ως δίκτυα (network) ανάλογα με το σύστημα που μελετάται.

3.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Αναπτύχθηκαν τα μοντέλα λιμενικών εγκαταστάσεων M/M/1, M/M/2, E₂/M/1, M/E₂/2, E₂/E₂/1, E₂/E₂/2 με προσομοίωση και θεωρία αναμονής και πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι εγκυρότητας τους. Η τεχνική της θεωρίας αναμονής βρίσκεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

Στο μοντέλο M/M/1, πλοία φθάνουν σε λιμάνι και οι αφίξεις τους ακολουθούν την εκθετική κατανομή (M). Η εξυπηρέτηση τους ακολουθεί επίσης την εκθετική κατανομή (M) και στο λιμάνι υπάρχει μία θέση παραβολής. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει, για διάφορους ρυθμούς άφιξης (λ) και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης (μ), το βαθμό χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής (U), το μέσο αριθμό πλοίων που περιμένουν στην ουρά (Lq) και το μέσο χρόνο αναμονής τους (Wq). Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) και με μοντέλο προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.

Το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) είναι σε περιβάλλον excel και χρησιμοποιεί τους παρακάτω τύπους, από τη θεωρία αναμονής, για το μοντέλο M/M/1.

Βαθμός χρησιμοποίησης της θέσης παραβολής:

$$U = \frac{\lambda}{\mu}$$

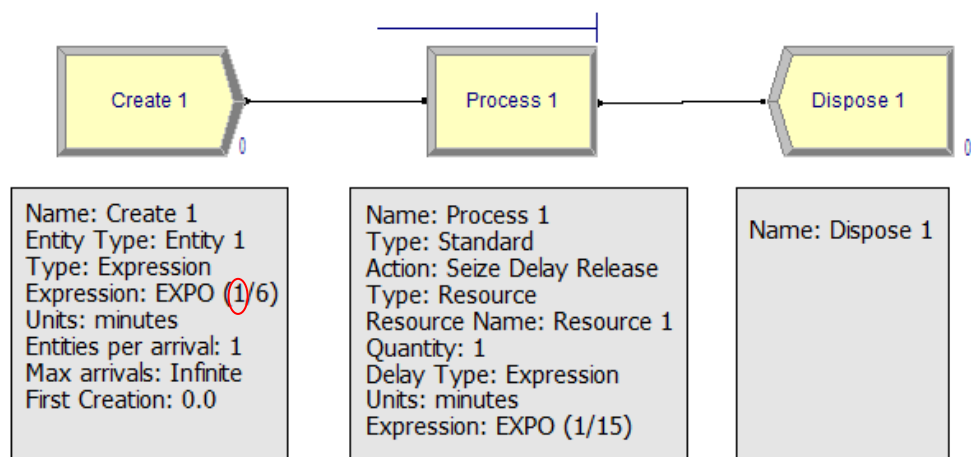
Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά:

$$Lq = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά:

$$Wq = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{Lq}{\lambda}$$

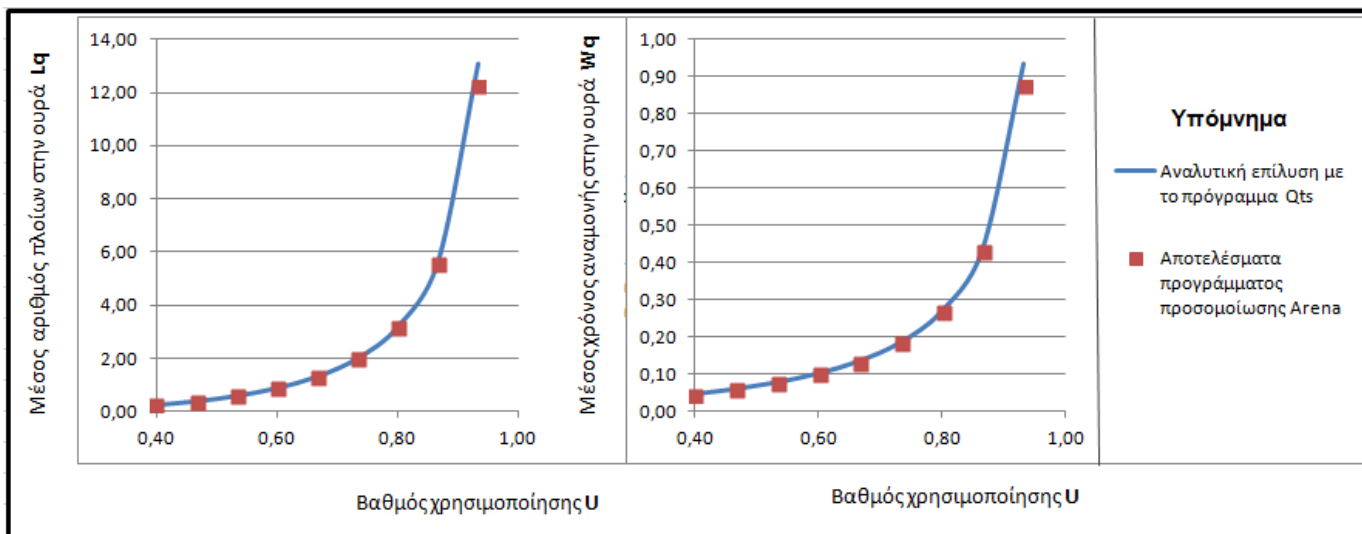
Η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Arena φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Προέκυψε απόκλιση μεθόδων μικρότερη του 1%, εκτός από την περίπτωση με το μεγαλύτερο βαθμό χρησιμοποίησης (U=0,93) όπου η απόκλιση είναι λίγο μεγαλύτερη από 6% και οφείλεται σε τυχαιότητα εφόσον περισσότερες επαναλήψεις δίνουν μικρότερη απόκλιση.



Εικόνα 3. 2: Κατασκευή μοντέλου M/M/1

Πίνακας 3. 1: Μοντέλο M/M/1, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.

Ρυθμός άφιξης	Ρυθμός εξυπηρέτησης	Βαθμός χρησιμοποίησης	Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά			Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά		
			Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)
λ	μ	U	Lq	Lq		Wq	Wq	
6	15	0,40	0,2667	0,2676	0,34	0,0444	0,0446	0,45
7	15	0,47	0,4083	0,4080	0,07	0,0583	0,0583	0,00
8	15	0,53	0,6095	0,6049	0,76	0,0762	0,0756	0,79
9	15	0,60	0,9000	0,9024	0,27	0,1000	0,1002	0,20
10	15	0,67	1,3333	1,3296	0,28	0,1333	0,1328	0,38
11	15	0,73	2,0167	2,0215	0,24	0,1833	0,1836	0,16
12	15	0,80	3,2000	3,2062	0,19	0,2667	0,2669	0,07
13	15	0,87	5,6333	5,6024 (2)	0,55 (2)	0,4333	0,4303 (2)	0,70 (2)
14	15	0,93	13,0667	12,5067 (2)	4,29 (2)	0,9333	0,8913 (2)	4,50 (2)



Σχόλια:

- (1) Τα αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από 100 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά η καθεμία.
- (2) Για να επιτευχθεί καλύτερη απόκλιση των μεθόδων στους μεγάλους βαθμούς χρησιμοποίησης πραγματοποιήθηκαν 500 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά.

Στο μοντέλο M/M/2, πλοία φθάνουν σε λιμάνι και οι αφίξεις τους ακολουθούν την εκθετική κατανομή (M). Η εξυπηρέτηση τους ακολουθεί επίσης την εκθετική κατανομή (M) και στο λιμάνι υπάρχουν δύο θέσεις παραβολής. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει, για διάφορους ρυθμούς άφιξης (λ) και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης (μ), το βαθμό χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής (U), το μέσο αριθμό πλοίων που περιμένουν στην ουρά (Lq) και το μέσο χρόνο αναμονής τους (Wq). Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) και με μοντέλο προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.

Το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) είναι σε περιβάλλον excel και χρησιμοποιεί τους παρακάτω τύπους, από τη θεωρία αναμονής, για το μοντέλο M/M/2. Ισχύει ότι $s=2$.

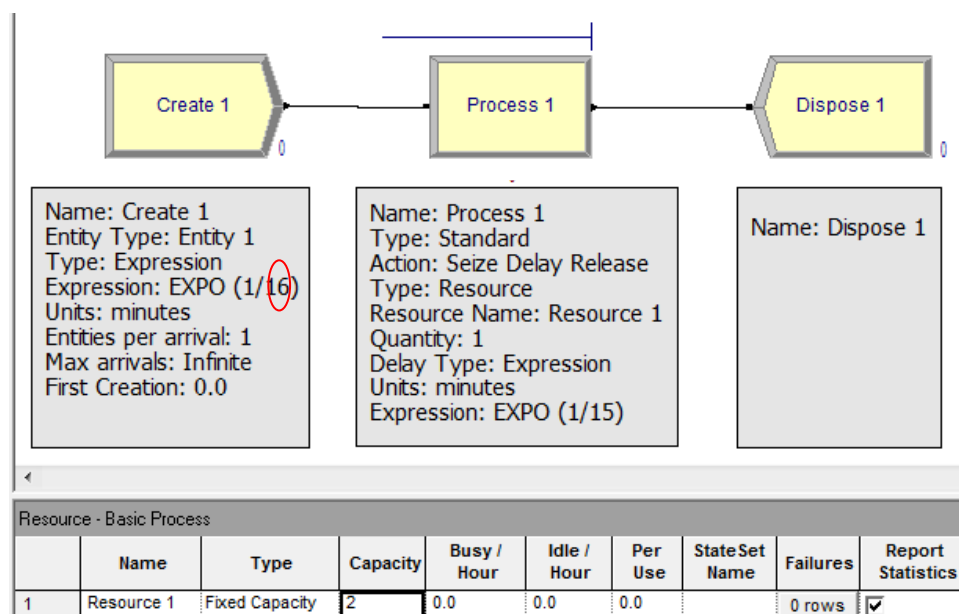
Βαθμός χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής:
$$U = \frac{\lambda}{s * \mu}$$

Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά:
$$Lq = L - \frac{\lambda}{\mu}$$

όπου,
$$L = \frac{\lambda \mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s}{(s-1)!(s\mu - \lambda)^2} P_0 + \frac{\lambda}{\mu} \quad \text{και} \quad P_0 = \frac{1}{\left[\sum \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n\right] + \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \left(\frac{s\mu}{s\mu - \lambda}\right)}$$

Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά:
$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

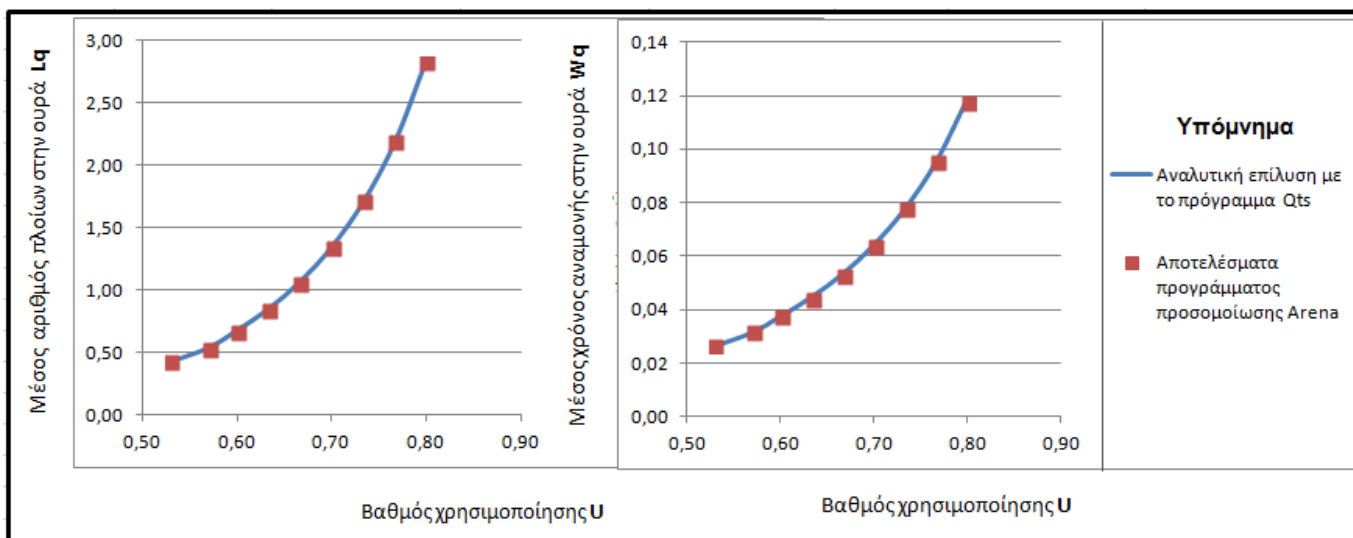
Η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Arena φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Η διαφορά από το μοντέλο M/M/1 είναι στην επιλογή "Capacity" όπου τίθεται 2 εξυπηρετητές. Προέκυψε απόκλιση μεθόδων μικρότερη του 1%, εκτός από την περίπτωση με βαθμό χρησιμοποίησης $U=0,63$ όπου η απόκλιση είναι λίγο μεγαλύτερη του 1% και οφείλεται σε τυχαιότητα εφόσον περισσότερες επαναλήψεις δίνουν μικρότερη απόκλιση.



Εικόνα 3. 3: Κατασκευή μοντέλου M/M/2

Πίνακας 3. 2: Μοντέλο M/M/2, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.

Ρυθμός άφιξης	Ρυθμός εξυπηρέτησης	Βαθμός χρησιμοποίησης	Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά			Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά		
			Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)
			Lq	Lq		Wq	Wq	
λ	μ	U						
16	15	0,53	0,4240	0,4265	0,59	0,0265	0,0266	0,38
17	15	0,57	0,5361	0,5360	0,02	0,0315	0,0315	0,00
18	15	0,60	0,6750	0,6724	0,39	0,0375	0,0374	0,27
19	15	0,63	0,8484	0,8464 (2)	0,24 (2)	0,0447	0,0445 (2)	0,45 (2)
20	15	0,67	1,0667	1,0602	0,61	0,0533	0,0530	0,57
21	15	0,70	1,3451	1,3414	0,28	0,0641	0,0639	0,31
22	15	0,73	1,7064	1,7183	0,69	0,0776	0,0781	0,64
23	15	0,77	2,1863	2,1978	0,52	0,0951	0,0956	0,52
24	15	0,80	2,8444	2,8256	0,67	0,1185	0,1179	0,51



Σχόλια:

- (1) Τα αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από 100 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά η καθεμία.
- (2) Για να επιτευχθεί καλύτερη απόκλιση των μεθόδων πραγματοποιήθηκαν 500 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά.

Στο μοντέλο $E_2/M/1$, πλοία φθάνουν σε λιμάνι και οι αφίξεις τους ακολουθούν την κατανομή Erlang-2. Η εξυπηρέτηση τους ακολουθεί την εκθετική κατανομή (M) και στο λιμάνι υπάρχει μία θέση παραβολής για να τα εξυπηρετήσει. Ο Πίνακας 3.3 παρουσιάζει, για διάφορους ρυθμούς άφιξης (λ) και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης (μ), το βαθμό χρησιμοποίησης της θέσης παραβολής (U), το μέσο αριθμό πλοίων που περιμένουν στην ουρά (Lq) και το μέσο χρόνο αναμονής τους (Wq). Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) και με μοντέλο προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.

Το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) είναι σε περιβάλλον excel και χρησιμοποιεί τους παρακάτω τύπους, από τη θεωρία αναμονής, για το μοντέλο $E_2/M/1$.

Βαθμός χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής:

$$U = \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά:

$$Lq = \sum_{n=1}^{\infty} n P_n - \rho$$

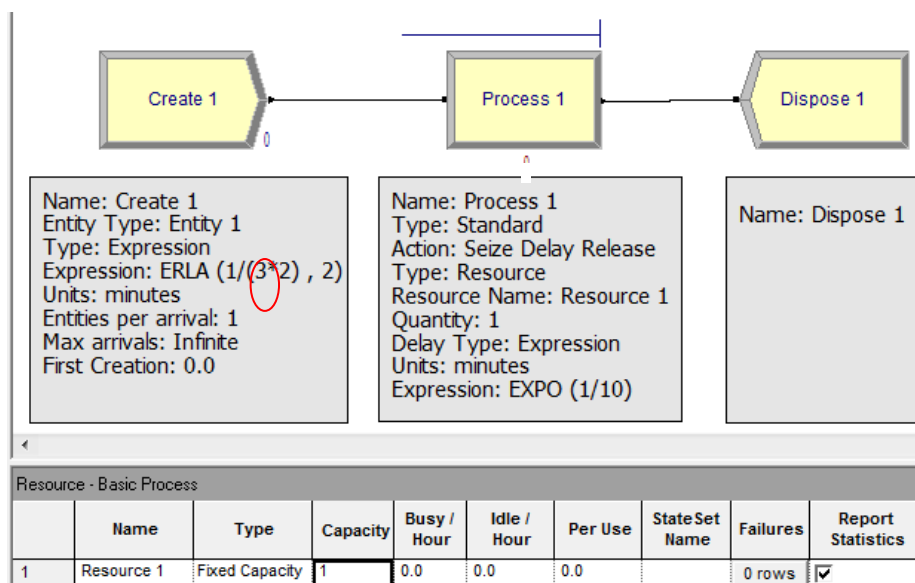
όπου,

$$P_n = \begin{cases} 1 - \rho & n = 0 \\ \frac{z_o^k - 1}{z_o^{kn} - 1} \rho & n \geq 1 \end{cases}$$

Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά:

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

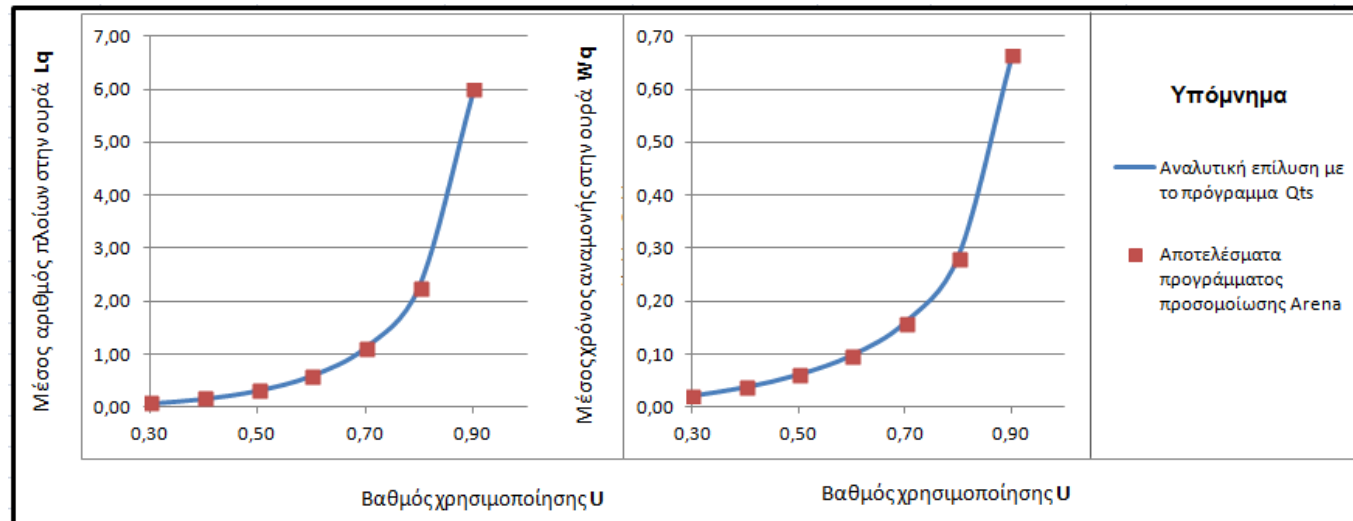
Η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Arena φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Η διαφορά από το μοντέλο M/M/1 είναι στο στοιχείο “Create 1” στην επιλογή “Expression” όπου τίθεται κατανομή Erlang. Προέκυψε απόκλιση μεθόδων μικρότερη του 1%, εκτός από τις περιπτώσεις με βαθμό χρησιμοποίησης $U=0,40$ και $U=0,80$ όπου η απόκλιση κυμαίνεται από 1,19% έως 1,68% και οφείλεται σε τυχαιότητα εφόσον περισσότερες επαναλήψεις δίνουν μικρότερη απόκλιση.



Εικόνα 3. 4: Κατασκευή μοντέλου $E_2/M/1$

Πίνακας 3. 3: Μοντέλο E₂/M/1, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.

Ρυθμός άφιξης	Ρυθμός εξυπηρέτησης	Βαθμός χρησιμοποίησης	Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά			Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά		
			Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)
			Lq	Lq		Wq	Wq	
λ	μ	U						
3	10	0,30	0,0650	0,0656	0,94	0,0217	0,0218	0,67
4	10	0,40	0,1520	0,1541	1,39	0,0380	0,0384	1,19
5	10	0,50	0,3090	0,3115	0,80	0,0618	0,0623	0,78
6	10	0,60	0,5901	0,5865	0,61	0,0984	0,0977	0,67
7	10	0,70	1,1204	1,1087	1,06	0,1601	0,1584	1,05
8	10	0,80	2,2752	2,2629 (2)	0,54 (2)	0,2844	0,2826 (2)	0,63 (2)
9	10	0,90	5,9295	5,9878	0,97	0,6588	0,6643	0,82



Σχόλια:

- (1) Τα αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από 100 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά η καθεμία.
- (2) Για να επιτευχθεί καλύτερη απόκλιση των μεθόδων πραγματοποιήθηκαν 500 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά.

Στο μοντέλο M/E₂/2, πλοία φθάνουν σε λιμάνι και οι αφίξεις τους ακολουθούν την εκθετική κατανομή (M). Η εξυπηρέτηση τους ακολουθεί την κατανομή Erlang-2 και στο λιμάνι υπάρχουν δύο θέσεις παραβολής. Ο Πίνακας 3.4 παρουσιάζει, για διάφορους ρυθμούς άφιξης (λ) και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης (μ), το βαθμό χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής (U), το μέσο αριθμό πλοίων που περιμένουν στην ουρά (Lq) και το μέσο χρόνο αναμονής τους (Wq). Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) και με μοντέλο προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.

Το πρόγραμμα Qts (αναλυτική επίλυση) είναι σε περιβάλλον excel και χρησιμοποιεί τους παρακάτω τύπους, από τη θεωρία αναμονής, για το μοντέλο M/E₂/2.

Βαθμός χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής:

$$U = \frac{\lambda}{s * \mu}$$

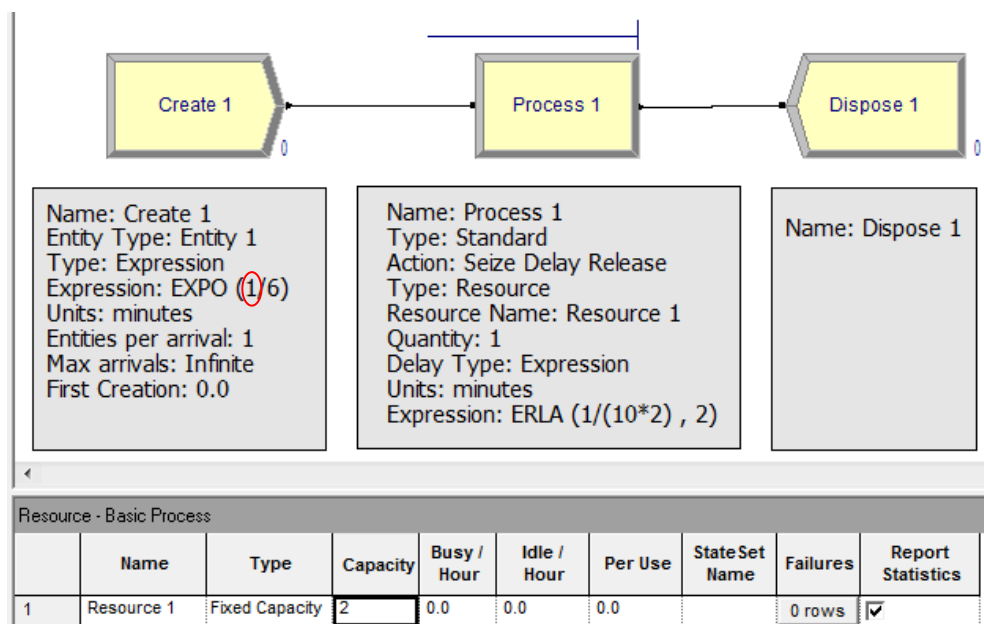
Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά:

$$Lq = \frac{1+k}{2k} \times \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά:

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

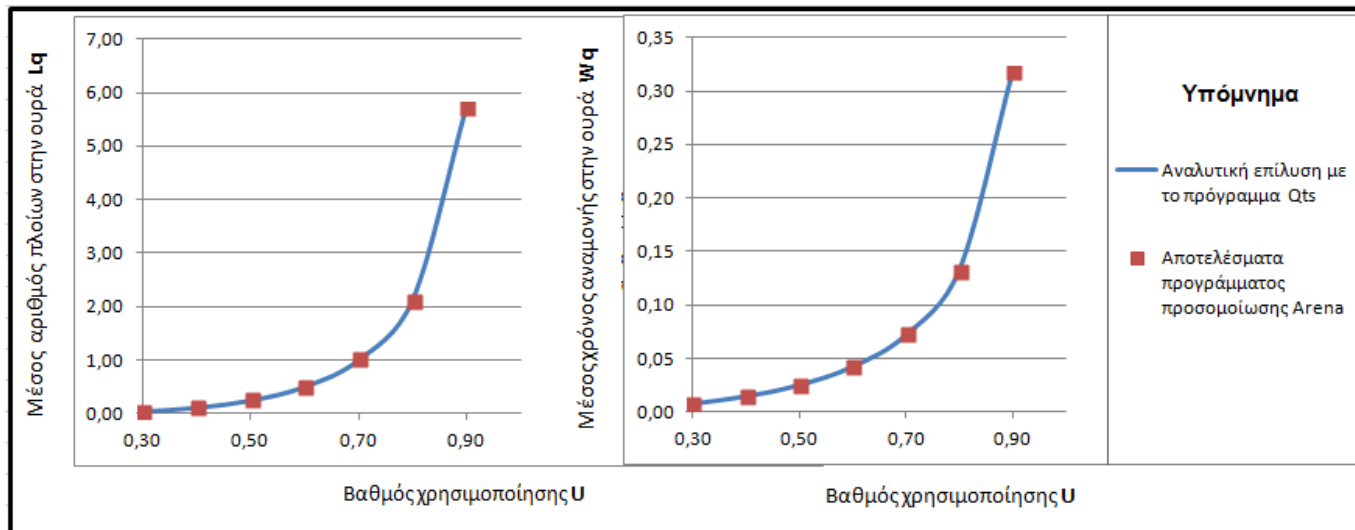
Η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Arena φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Η διαφορά από το μοντέλο M/M/1 είναι στο στοιχείο “Process 1” στην επιλογή “Expression” όπου τίθεται κατανομή Erlang και στην επιλογή “Capacity” όπου τίθεται δύο εξυπηρετητές. Προέκυψε απόκλιση μεθόδων κοντά στο 1%, εκτός από την περίπτωση με βαθμό χρησιμοποίησης U=0,30 όπου η απόκλιση είναι κοντά στο 3,7% και οφείλεται σε τυχαιότητα εφόσον περισσότερες επαναλήψεις δίνουν μικρότερη απόκλιση.



Εικόνα 3. 5: Κατασκευή μοντέλου M/E₂/2

Πίνακας 3. 4: Μοντέλο M/E₂/2, σύγκριση αποτελεσμάτων (αναλυτικής επίλυσης βάσει τύπων θεωρίας αναμονής) του προγράμματος Qts με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.

Ρυθμός άφιξης λ	Ρυθμός εξυπηρέτησης μ	Βαθμός χρησιμοποίησης U	Μέσος αριθμός πλοίων στην ουρά			Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά		
			Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος Qts	Υπολογισμός με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης(1)	Απόκλιση μεθόδων(1) (%)
			L_q	L_q		W_q	W_q	
6	10	0,30	0,0445	0,0461 (2)	3,59 (2)	0,0074	0,0076 (2)	2,70 (2)
8	10	0,40	0,1143	0,1156	1,14	0,0143	0,0145	1,19
10	10	0,50	0,2500	0,2533	1,30	0,0250	0,0253	1,31
12	10	0,60	0,5063	0,5120	1,12	0,0422	0,0427	1,15
14	10	0,70	1,0088	1,0118	0,29	0,0721	0,0724	0,44
16	10	0,80	2,1333	2,0997	1,60	0,1333	0,1315	1,39
18	10	0,90	5,7553	5,7099	0,79	0,3197	0,3173	0,77



Σχόλια:

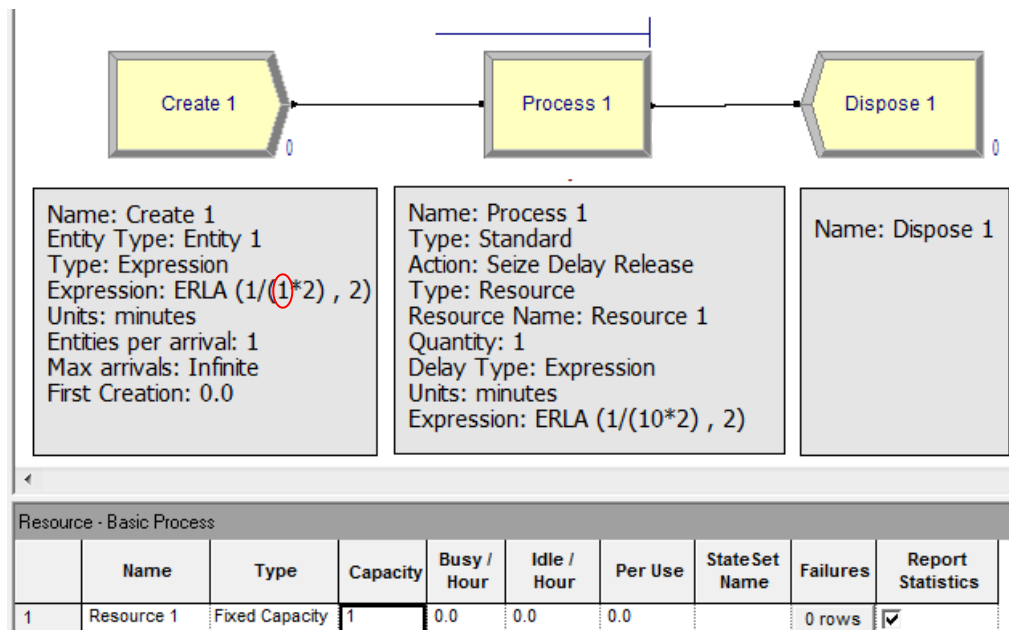
(1) Τα αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από 100 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά η καθεμία.

(2) Για να επιτευχθεί καλύτερη απόκλιση των μεθόδων πραγματοποιήθηκαν 500 επαναλήψεις με διάρκεια 500 λεπτά.

Στο μοντέλο $E_2/E_2/1$, πλοία φθάνουν σε λιμάνι και οι αφίξεις τους ακολουθούν την κατανομή Erlang-2 (E_2). Η εξυπηρέτηση τους ακολουθεί επίσης την κατανομή Erlang-2 (E_2) και στο λιμάνι υπάρχει μία θέση παραβολής. Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει, για διάφορους ρυθμούς άφιξης (λ) και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης (μ), το βαθμό χρησιμοποίησης της θέσης παραβολής (U) και το μέσο χρόνο αναμονής των πλοίων (Wq). Η σύγκριση έγινε με χρήση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής επίλυσης της θεωρίας αναμονής για αυτό το μοντέλο, όπως δίνονται σε πίνακα στο βιβλίο^[20] και με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.

Η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Arena φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Η διαφορά από το μοντέλο $M/M/1$ είναι στα στοιχεία "Create 1" και "Process 1" όπου τίθεται στην επιλογή "Expression" η κατανομή Erlang.

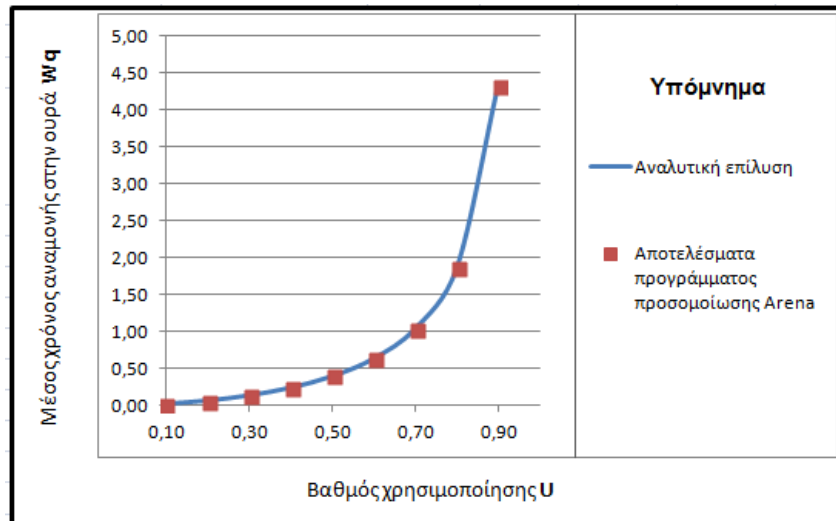
Προέκυψε απόκλιση μεθόδων μικρότερη του 1%, εκτός από τις περιπτώσεις με βαθμό χρησιμοποίησης $U=0,1$, $U=0,2$ και $U=0,5$ όπου η απόκλιση είναι 26,91%, 4,24% και 1,48% αντίστοιχα. Στο βιβλίο οι αποκλίσεις που έχουν προκύψει κατά την προσέγγιση του μοντέλου με άλλα μοντέλα θεωρίας αναμονής είναι αρκετά μεγαλύτερες της τάξης του 150% και αφορούν μεγάλες τιμές του βαθμού χρησιμοποίησης. Στην πράξη συναντώνται μεγάλες τιμές του βαθμού χρησιμοποίησης όπου οι αποκλίσεις είναι αρκετά μικρές.



Εικόνα 3. 6: Κατασκευή μοντέλου $E_2/E_2/1$

Πίνακας 3. 5: Μοντέλο E₂/E₂/1, σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής επίλυσης με τύπους θεωρίας αναμονής με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.

Ρυθμός άφιξης	Ρυθμός εξυπηρέτησης	Βαθμός χρησιμοποίησης	Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά		Απόκλιση μεθόδων (%)
			Αποτελέσματα αναλυτικής επίλυσης (σε μονάδες 1/μ)	Υπολογισμός με χρήση προγράμματος προσομοίωσης (σε μονάδες 1/μ)	
λ	μ	U	Wq		
1	10	0,10	0,0166	0,0131	26,91 (*)
2	10	0,20	0,0604	0,0579	4,24 (*)
3	10	0,30	0,1310	0,1304	0,44
4	10	0,40	0,2355	0,2360	0,22
5	10	0,50	0,3904	0,3963	1,48
6	10	0,60	0,6306	0,6324	0,28
7	10	0,70	1,0391	1,0360	0,30
8	10	0,80	1,8653	1,8670	0,09
9	10	0,90	4,3590	4,3350	0,55



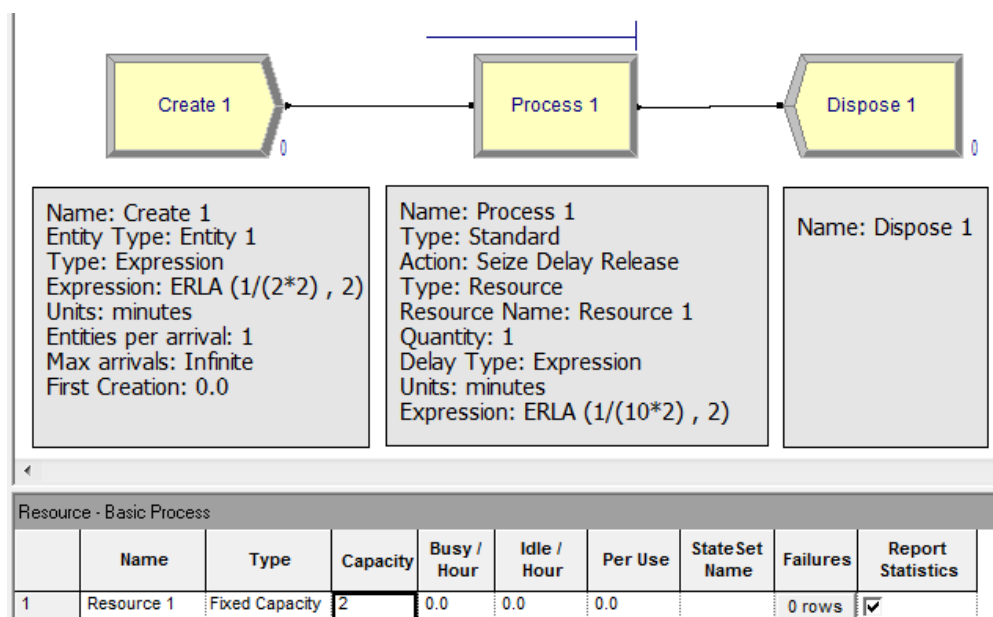
Σχόλια:

(*) Όπως και στο βιβλίο^[20] έχουν προκύψει μεγάλες αποκλίσεις στους μικρούς βαθμούς χρησιμοποίησης και αρκετά μικρές στους μεγάλους βαθμούς χρησιμοποίησης. Αυτό είναι ενδιαφέρον διότι στην πράξη συναντώνται μεγάλες τιμές του βαθμού χρησιμοποίησης U.

Στο μοντέλο $E_2/E_2/2$, πλοία φθάνουν σε λιμάνι και οι αφίξεις τους ακολουθούν την κατανομή Erlang-2 (E_2). Η εξυπηρέτηση τους ακολουθεί επίσης την κατανομή Erlang-2 (E_2) και στο λιμάνι υπάρχουν δύο θέσεις παραβολής. Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει, για διάφορους ρυθμούς άφιξης (λ) και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης (μ), το βαθμό χρησιμοποίησης των θέσεων παραβολής (U) και το μέσο χρόνο αναμονής των πλοίων (Wq). Η σύγκριση έγινε με χρήση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής επίλυσης της θεωρίας αναμονής για αυτό το μοντέλο, όπως δίνονται σε πίνακα στο βιβλίο^[20] και με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.

Η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό Arena φαίνεται στην Εικόνα 3.7. Η διαφορά από το μοντέλο $M/M/1$ είναι στα στοιχεία “Create 1” και “Process 1” όπου στην επιλογή “Expression” τίθεται η κατανομή Erlang και επίσης στην επιλογή “Capacity” τίθεται δύο εξυπηρετητές.

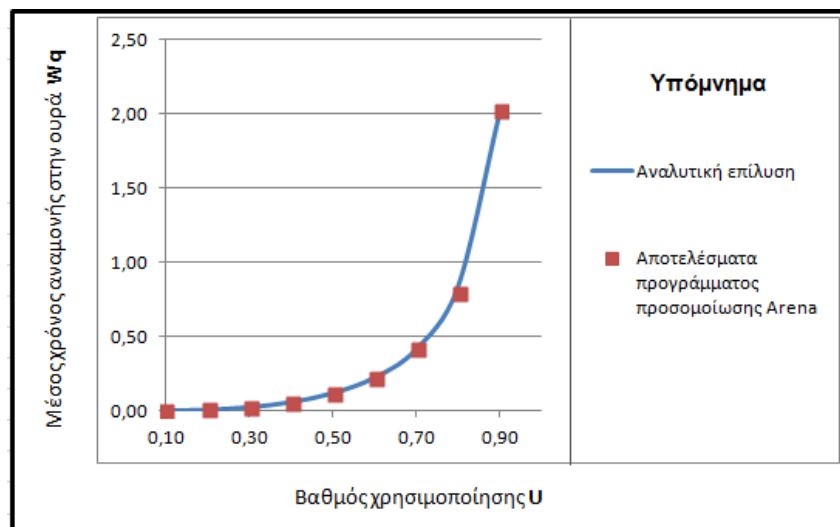
Προέκυψε απόκλιση μεθόδων μικρότερη του 1%, εκτός από τις περιπτώσεις με βαθμό χρησιμοποίησης $U=0,1$, $U=0,2$, $U=0,3$, $U=0,8$ και $U=0,9$ όπου η απόκλιση είναι 33,90%, 3,96%, 1,9%, 4,04% και 1,38% αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα οι αποκλίσεις αυτές δεν είναι τόσο μεγάλες όσο φαίνονται εφόσον αφορούν στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο του μέσου χρόνου αναμονής στην ουρά Wq .



Εικόνα 3. 7: Κατασκευή μοντέλου $E_2/E_2/2$

Πίνακας 3. 6: Μοντέλο $E_2/E_2/2$, σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής επίλυσης με τύπους θεωρίας αναμονής με τα αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης Arena.

Ρυθμός άφιξης	Ρυθμός εξυπηρέτησης	Βαθμός χρησιμοποίησης	Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά		
			Αποτελέσματα αναλυτικής επίλυσης (σε μονάδες 1/μ)	Υπολογισμός με χρήση προγράμματος προσομοίωσης (σε μονάδες 1/μ)	Απόκλιση μεθόδων (%)
λ	μ	U	Wq		
2	10	0,10	0,0006	0,0004	33,90 (*)
4	10	0,20	0,0065	0,0063	3,96 (*)
6	10	0,30	0,0235	0,0231	1,90 (*)
8	10	0,40	0,0576	0,0572	0,64
10	10	0,50	0,1181	0,1173	0,71
12	10	0,60	0,2222	0,2208	0,62
14	10	0,70	0,4125	0,4155	0,72
16	10	0,80	0,8300	0,7977	4,04 (*)
18	10	0,90	2,0000	2,0280	1,38 (*)



Σχόλια:

(*) Στην πραγματικότητα οι αποκλίσεις αυτές δεν είναι τόσο μεγάλες όσο φαίνονται εφόσον αφορούν στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο του μέσου χρόνου αναμονής στην ουρά Wq .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ/ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν και θα προσομοιωθούν δύο στρατηγικές ανάθεσης εργασιών στα οχήματα μεταφοράς, στο υποσύστημα διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου.

Η πρώτη στρατηγική αφορά στη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης των οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες που είναι σε λειτουργία μονού κύκλου. Τα οχήματα μεταφοράς θα εκτελούν εργασίες τύπου “Εμφορτο/Κενό (L/E)” ή “Κενό/Εμφορτο (E/L)” ανάλογα με το αν εκτελούν φόρτωση ή εκφόρτωση πλοίου. Συγκεκριμένα, στις διαδικασίες εκφόρτωσης, η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα θα φορτώνει ένα εισαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο στο όχημα μεταφοράς το οποίο θα κινείται από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας σε έμφορτη κατάσταση και θα εκφορτώνεται στο χώρο στοιβασίας. Ύστερα το όχημα μεταφοράς θα επιστρέφει σε κενή κατάσταση για να επαναλάβει τη διαδικασία. Η αντίστροφη διαδικασία θα πραγματοποιείται κατά τη φόρτωση πλοίου.

Η δεύτερη στρατηγική αφορά στη στρατηγική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες που είναι σε λειτουργία μονού κύκλου. Στις διαδικασίες εκφόρτωσης πλοίων θα ανατίθεται μια ομάδα από οχήματα μεταφοράς να εξυπηρετούν τις γερανογέφυρες ίδιων ή διαφορετικών πλοίων, με διάφορους κανόνες επιλογής των οχημάτων. Στις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης πλοίων ταυτόχρονα, τα οχήματα μεταφοράς θα εκτελούν εργασίες τύπου “Εμφορτο/Κενό/Εμφορτο (L/E/L)”. Συγκεκριμένα, η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα θα φορτώνει ένα εισαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο στο όχημα μεταφοράς το οποίο θα κινείται από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας σε έμφορτη κατάσταση και θα εκφορτώνεται στο χώρο στοιβασίας. Ύστερα το όχημα μεταφοράς θα μεταφέρεται σε ένα άλλο χώρο στοιβασίας χωρίς φορτίο για να παραλάβει ένα εξαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο και να επιστρέψει σε έμφορτη κατάσταση στο κρηπίδωμα για να εκφορτωθεί από τη γερανογέφυρα εκεί.

Οι στρατηγικές αυτές προσομοιώθηκαν στο λογισμικό Arena και συγκρίθηκαν με κριτήριο το χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων. Αρχικά, έγινε η παραδοχή ότι οι χρόνοι κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς είναι σταθεροί και ακολούθησε η επίλυση των μοντέλων.

Στην πραγματικότητα όμως, οι χρόνοι κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς δεν μπορεί να είναι σταθεροί.

Οι γερανογέφυρες στο κρηπίδωμα μπορεί να εκτελούν αναδιατάξεις των εμπορευματοκιβωτίων στα πλοία είτε σε διαδικασίες φόρτωσης είτε εκφόρτωσης. Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα που αντιπροσωπεύουν τις δύο στρατηγικές ανάθεσης επιλύθηκαν ξανά για διάφορες τιμές αποκλίσεων του χρόνου κύκλου των γερανογεφυρών. Οι αναδιατάξεις που απαιτούνται κάθε φορά από τη γερανογέφυρα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κάθε πλοίου καθώς και το βαθμό οργάνωσης του. Επομένως είναι δύσκολο να προταθεί μέθοδος που να εκτιμά καθολικά τις αποκλίσεις που έχουν οι γερανογέφυρες στο κρηπίδωμα.

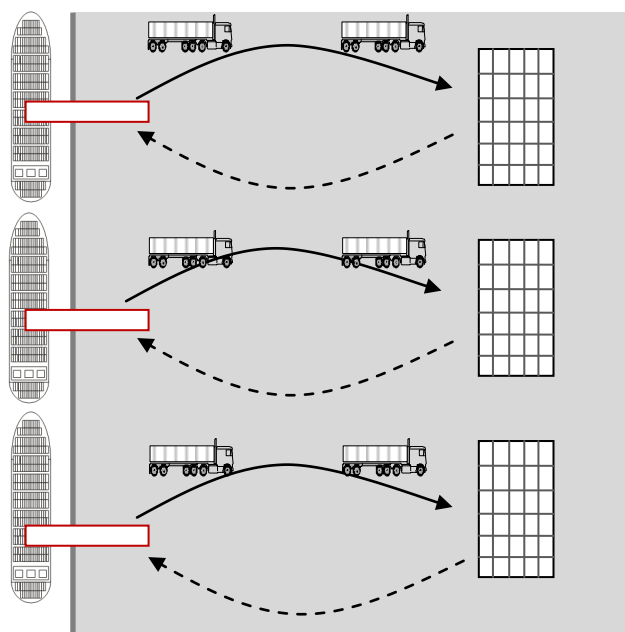
Οι αποκλίσεις στο χρόνο κύκλο των οχημάτων μεταφοράς οφείλονται κατά κύριο λόγο σε αναδιατάξεις που πρέπει να γίνουν στους χώρους στοιβασίας ώστε να αποκτηθεί πρόσβαση σε ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο. Προτείνεται μέθοδος που να υπολογίζει προσεγγιστικά την απόκλιση που αντιστοιχεί στην κάθε περίπτωση. Γνωρίζοντας λοιπόν την τιμή της απόκλισης, από το χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς, που πρέπει να ληφθεί υπόψη γίνεται μικρή τροποποίηση στην αντίστοιχη μεταβλητή του μοντέλου που σχηματίστηκε και εξάγονται τα επιθυμητά συμπεράσματα.

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ

4.2.1 Σενάριο 1^ο – Σταθερή ανάθεση οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες

Το 1^ο σενάριο αφορά στη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης των οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες που είναι σε λειτουργία μονού κύκλου και περιγράφει τις διαδικασίες εκφόρτωσης τριών πλοίων που έχουν παραβάσει σε ένα λιμάνι (Εικόνα 4.1).

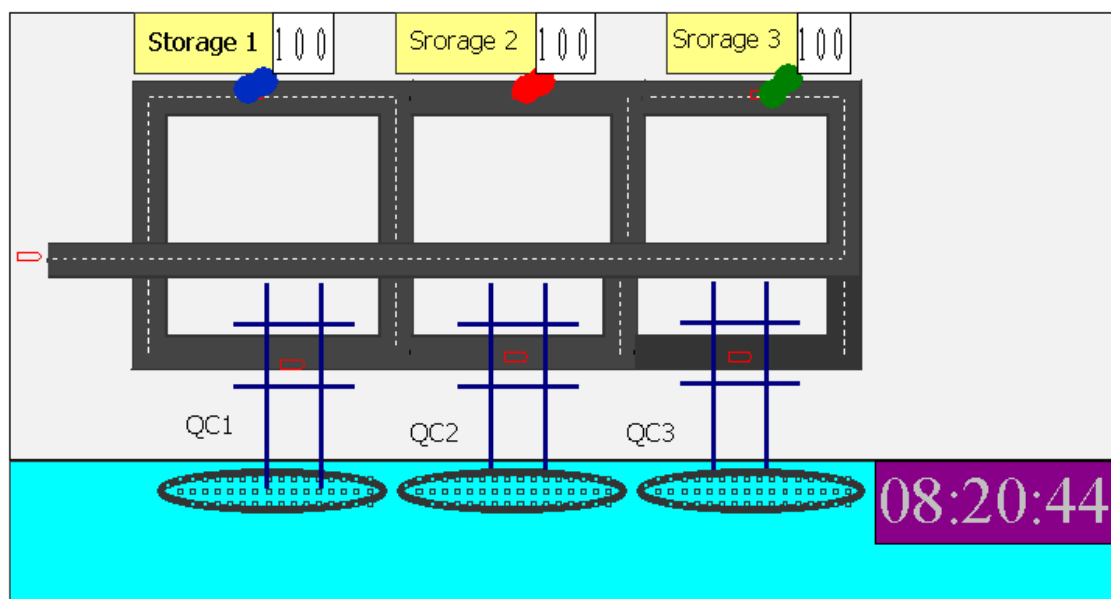
Από κάθε πλοίο πρόκειται να εκφορτωθούν εκατό εμπορευματοκιβώτια. Διατίθεται μία γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα για να εξυπηρετήσει το κάθε πλοίο. Έχουν εκχωρηθεί δύο οχήματα μεταφοράς σε κάθε γερανογέφυρα. Υπάρχουν τρεις χώροι εναπόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων που αντιστοιχούν σε κάθε πλοίο. Κάθε γερανογέφυρα χρειάζεται 50sec για να παραλάβει ένα εμπορευματοκιβώτιο και 10sec για να το φορτώσει στο όχημα μεταφοράς. Τα οχήματα (YT1-2units) που έχουν εκχωρηθεί στη πρώτη γερανογέφυρα (QC1) διανύουν απόσταση 50m μέχρι το χώρο στοιβασίας και 50m για να επιστρέψουν πάλι στο κρηπίδωμα. Τα οχήματα (YT2-2units) που έχουν εκχωρηθεί στη δεύτερη γερανογέφυρα (QC2) διανύουν απόσταση 40m μέχρι το χώρο στοιβασίας και 40m για να επιστρέψουν πάλι στο κρηπίδωμα. Τα οχήματα (YT3-2units) που έχουν εκχωρηθεί στη τρίτη γερανογέφυρα (QC3) διανύουν απόσταση 60m μέχρι το χώρο στοιβασίας και 60m για να επιστρέψουν πάλι στο κρηπίδωμα. Όλα τα οχήματα χρειάζονται 17sec για να εκφορτώσουν τα εμπορευματοκιβώτια στο χώρο στοιβασίας τους και κινούνται με ταχύτητα 15m/min ανεξάρτητα από το αν είναι έμφορτα ή κενά. Επίσης όλα τα οχήματα βρίσκονται σε μια αρχική θέση πριν ξεκινήσει οι διαδικασίες. Η θέση αυτή είναι σε απόσταση 10m από τη πρώτη γερανογέφυρα, 20m από τη δεύτερη γερανογέφυρα και 30m από την τρίτη γερανογέφυρα.



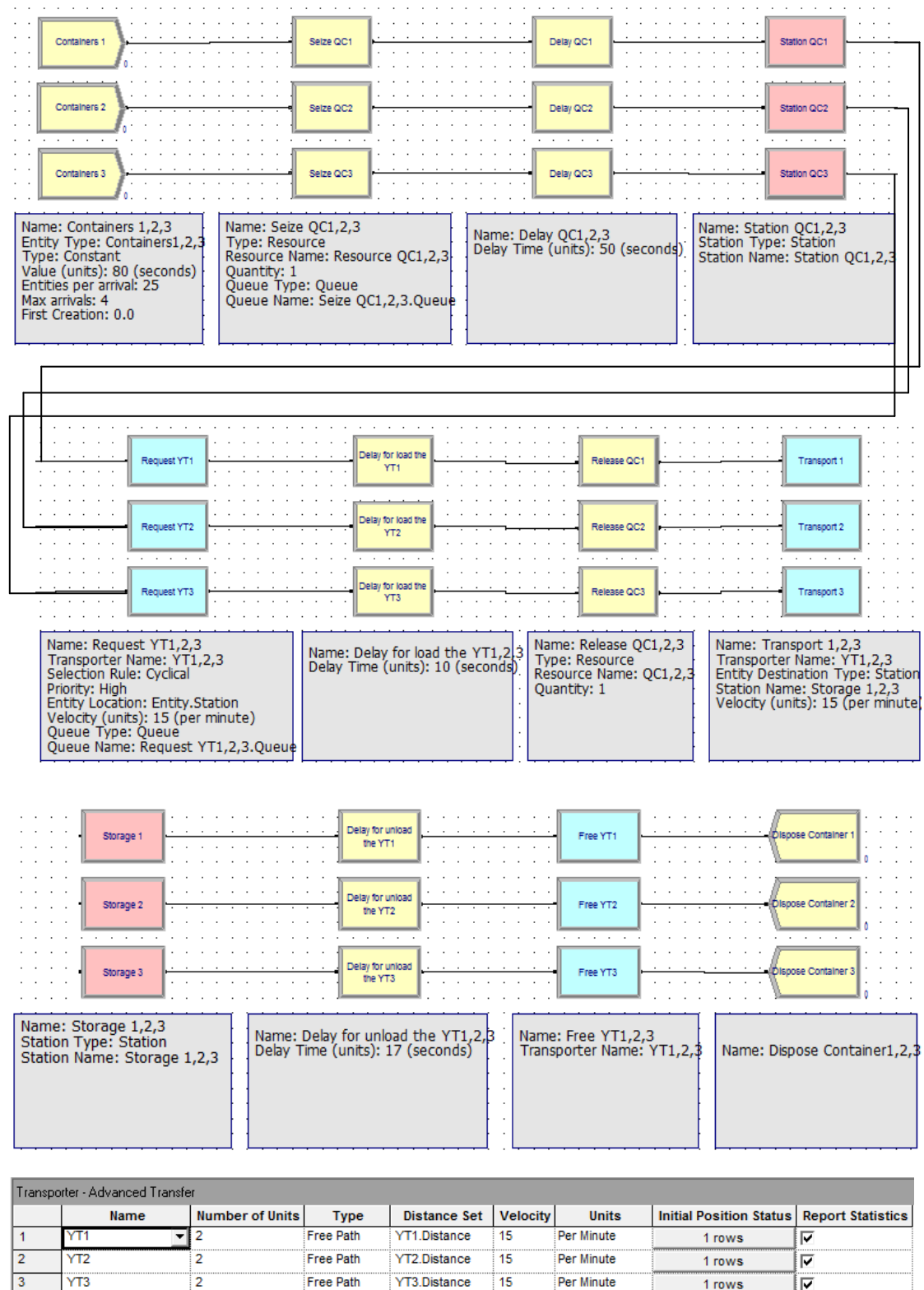
Εικόνα 4. 1: Σενάριο 1^ο – Σταθερή ανάθεση οχημάτων σε διαδικασίες εκφόρτωσης.

Για την προσομοίωση των διαδικασιών που περιγράφηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Arena. Κατασκευάστηκε μοντέλο που περιγράφει τις διαδικασίες εκφόρτωσης των πλοίων, με σταθερή ανάθεση των οχημάτων μεταφοράς. Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται το τελικό διάγραμμα ροής που κατασκευάστηκε, για το σχηματισμό του μοντέλου.

Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών που περιγράφηκαν, σχεδιάστηκε “animation” το οποίο φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 4.2 και αποτελεί το στιγμιότυπο της λήξης των διαδικασιών που προσομοιώθηκαν, δηλαδή της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το πρώτο πλοίο, της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το δεύτερο πλοίο και της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το τρίτο πλοίο.



Εικόνα 4. 2: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 1^ο Σενάριο.



Ο έλεγχος εγκυρότητας του 1^{ου} σεναρίου όπως περιγράφεται, παρατίθεται στο Παράρτημα Δ.

Εικόνα 4. 3: Διάγραμμα ροής 1^{ου} Σεναρίου.

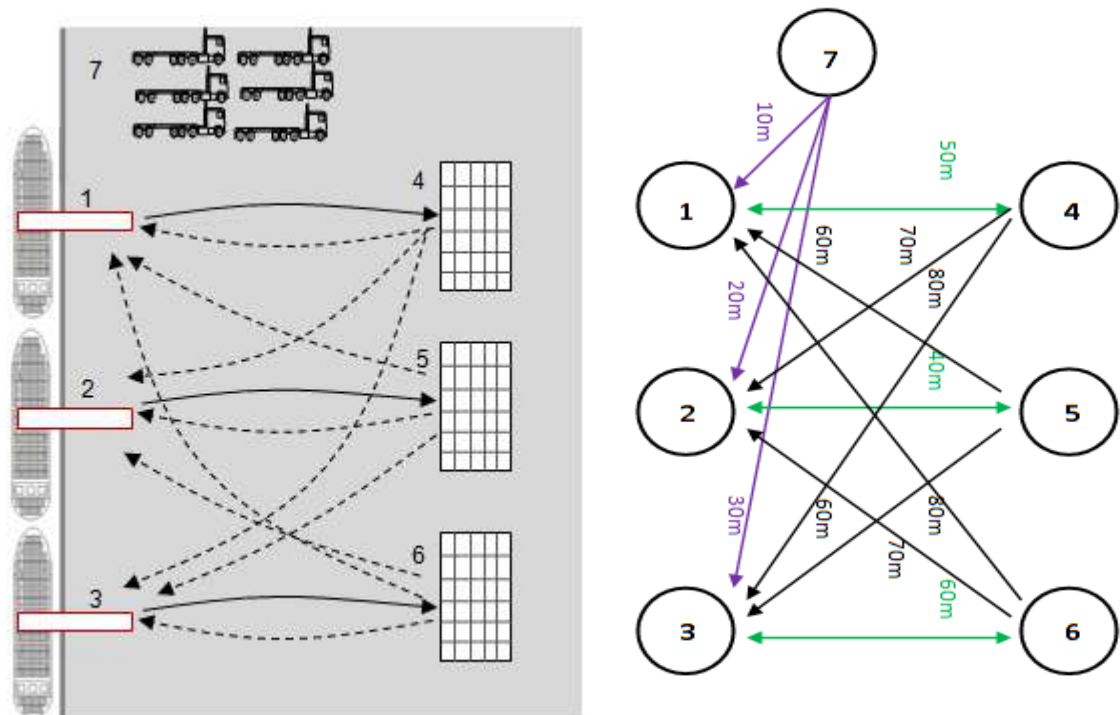
4.2.2 Σενάριο 2^ο – Ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες

Το 2^ο σενάριο αφορά στη στρατηγική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες που είναι σε λειτουργία μονού κύκλου και περιγράφει τις διαδικασίες εκφόρτωσης τριών πλοίων που έχουν παραβάλει σε ένα λιμάνι (Εικόνα 4.4).

Από κάθε πλοίο πρόκειται να εκφορτωθούν εκατό εμπορευματοκιβώτια όπως και στο προηγούμενο σενάριο. Η διαφορά με το πρώτο σενάριο είναι ότι σε αυτό υπάρχει μια ομάδα από έξι οχήματα μεταφοράς (YTs) τα οποία θα εκχωρούνται στις γερανογέφυρες ανάλογα με κάποιους κανόνες. Οι κανόνες αυτοί είναι οι εξής:

- Cyclical: Τα φορτηγά θα επιλέγονται με κυκλική σειρά. Δηλαδή θα επιλέγεται το 1^ο, μετά το 2^ο, το 3^ο, το 4^ο, το 5^ο, το 6^ο και ύστερα πάλι το 1^ο κτλ. Όμως αν είναι σειρά να επιλεγεί το 3^ο και αυτό δεν είναι διαθέσιμο τότε επιλέγεται το 4^ο κλπ. Αν έχει επιλεγεί το 4^ο και ο εξυπηρετητής ολοκληρώσει την ενέργεια τότε η επόμενη ζήτηση του εκκινεί από το 5^ο φορτηγό.
- Random: Τα φορτηγά επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από έναν αριθμό διαθέσιμων φορητών.
- Preferred Order: Θα επιλέγεται πάντα το πρώτο διαθέσιμο φορτηγό. Δηλαδή θα ελέγχεται πρώτα αν είναι διαθέσιμο το 1^ο φορτηγό. Αν ναι θα επιλέγεται αυτό, αλλιώς θα ελέγχεται το 2^ο φορτηγό και αν είναι διαθέσιμο θα επιλέγεται αλλιώς θα γίνεται έλεγχος στο 3^ο κτλ. Όταν η ενέργεια ολοκληρωθεί, η επιλογή ξεκινά πάλι από το 1^ο φορτηγό και αν αυτό δεν είναι διαθέσιμο συνεχίζει στο επόμενο.
- Specific Member: Με τον κανόνα αυτό η κάθε γερανογέφυρα μπορεί να επιλέγει ένα ή περισσότερα συγκεκριμένα φορτηγά για να την εξυπηρετήσει. Για παράδειγμα μια γερανογέφυρα μπορεί να επιθυμεί να εξυπηρετείται μόνο από το 3^ο φορτηγό.
- Largest Distance: Με τον κανόνα αυτό, όταν υπάρχει ένας αριθμός φορητών που είναι διαθέσιμα τότε θα επιλέγεται το φορτηγό που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση. Σε συγκεκριμένη λειτουργική μονάδα συμπληρώνονται οι αποστάσεις των σταθμών, με βάση τη διαδρομή που ακολουθείται για να φτάσουν τα οχήματα μεταφορά στους σταθμούς.
- Smallest Distance: Με τον κανόνα αυτό, όταν υπάρχει ένας αριθμός φορητών που είναι διαθέσιμα τότε θα επιλέγεται το φορτηγό που βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση.

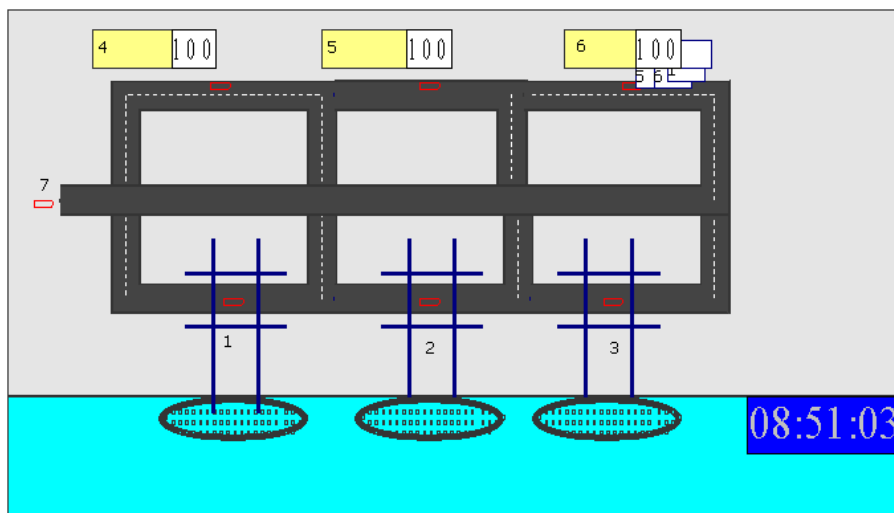
Όλες οι αποστάσεις που πιθανόν χρειαστεί να διανυθούν δίνονται στην Εικόνα 4.4. Θεωρείται ότι ο χώρος που γίνεται η φόρτωση του οχήματος μεταφοράς κάτω από την πρώτη γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα είναι ο σταθμός 1, κάτω από τη δεύτερη γερανογέφυρα είναι ο σταθμός 2 και κάτω από την τρίτη γερανογέφυρα είναι ο σταθμός 3. Οι χώροι που εκφορτώνονται τα εμπορευματοκιβώτια είναι οι σταθμοί 4,5,6 και ο χώρος όπου όλα τα οχήματα μεταφοράς εκκινούν κατά την έναρξη της προσομοιωτικής διαδικασίας είναι ο σταθμός 7.



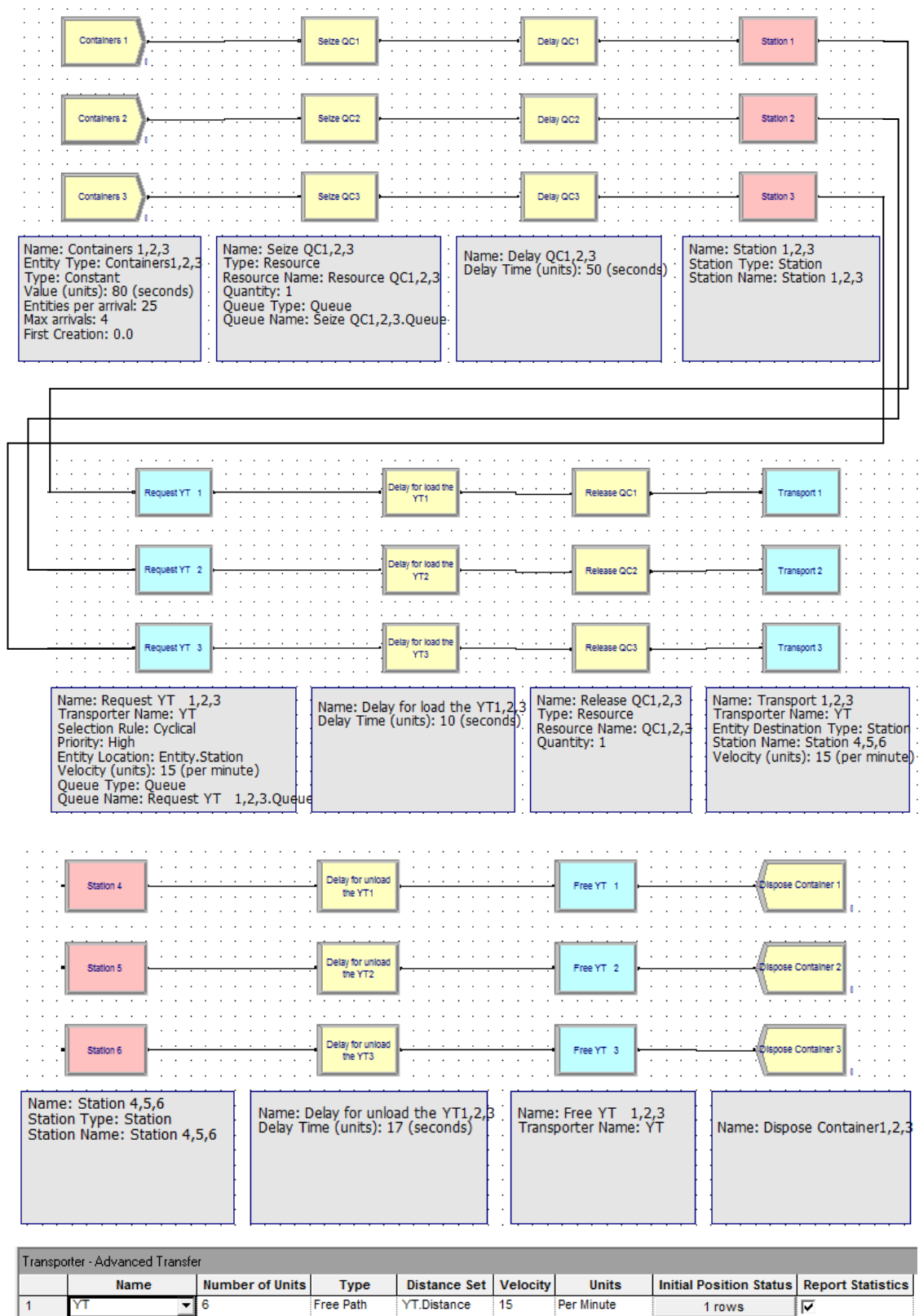
Εικόνα 4. 4: Σενάριο 2^ο – Ανάθεση ομάδας οχημάτων σε διαδικασίες εκφόρτωσης.

Για την προσομοίωση των διαδικασιών που περιγράφηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Arena. Κατασκευάστηκε μοντέλο που περιγράφει τις διαδικασίες εκφόρτωσης των πλοίων, με ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς. Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται το τελικό διάγραμμα ροής που κατασκευάστηκε, για το σχηματισμό του μοντέλου με κανόνα επιλογής “κυκλικό”.

Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών που περιγράφηκαν, σχεδιάστηκε “animation” το οποίο φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 4.5 και αποτελεί το στιγμιότυπο της λήξης των διαδικασιών που προσομοιώθηκαν, δηλαδή της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το πρώτο πλοίο, της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το δεύτερο πλοίο και της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το τρίτο πλοίο.



Εικόνα 4. 5: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 2^ο σενάριο.



Ο έλεγχος εγκυρότητας του 2^{ου} σεναρίου για όλους τους κανόνες επιλογής παρατίθεται στο Παράρτημα Δ.

Εικόνα 4. 6: Διάγραμμα ροής για το 2^ο σενάριο.

4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Το μοντέλο για το 1^ο σενάριο ολοκληρώθηκε, με την εκφόρτωση όλων των εμπορευματοκιβωτίων, σε 8hr, 22min και 44sec.

Το μοντέλο για το 2^ο σενάριο ολοκληρώθηκε, επίσης με την εκφόρτωση όλων των εμπορευματοκιβωτίων, σε διαφορετικούς χρόνους για κάθε κανόνα επιλογής.

Με τον “κυκλικό” κανόνα όπου επιλέγονται σε κυκλική σειρά τα οχήματα μεταφοράς, ο χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών είναι 8hr, 51min και 03sec.

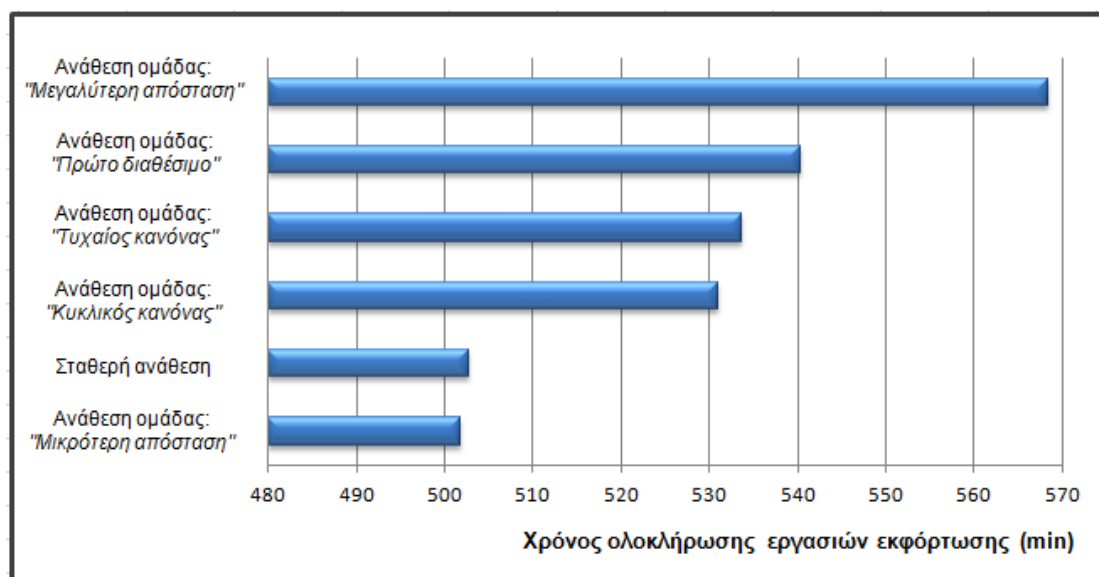
Με τον “τυχαίο” κανόνα, όπου επιλέγεται τυχαία το όχημα μεταφοράς, ο χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών είναι 8hr, 53min και 43sec.

Με τον κανόνα όπου επιλέγεται “το πρώτο διαθέσιμο” όχημα μεταφοράς, ο χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών είναι 9hr, 00min και 23sec.

Με τον κανόνα όπου επιλέγεται το όχημα που βρίσκεται σε “μεγαλύτερη απόσταση”, ο χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών είναι 9hr, 28min και 23sec.

Με τον κανόνα όπου επιλέγεται το όχημα που βρίσκεται σε “μικρότερη απόσταση”, ο χρόνος ολοκλήρωσης εργασιών είναι 8hr, 21min και 43sec.

Συγκρίνοντας τους χρόνους ολοκλήρωσης εργασιών εκφόρτωσης όλων των εμπορευματοκιβωτίων και από τα τρία πλοία, για τα δύο σενάρια, προκύπτει ότι η στρατηγική με την ανάθεση ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες είναι αποτελεσματικότερη αν εφαρμοστεί ο κανόνας με την μικρότερη απόσταση. Στο παρακάτω Σχήμα 4.1 φαίνονται συγκεντρωτικά οι χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών εκφόρτωσης για κάθε στρατηγική και κάθε κανόνα επιλογής.



Σχήμα 4. 1: Χρόνοι ολοκλήρωσης εργασιών εκφόρτωσης για τις στρατηγικές της σταθερής ανάθεσης και της ανάθεσης ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες.

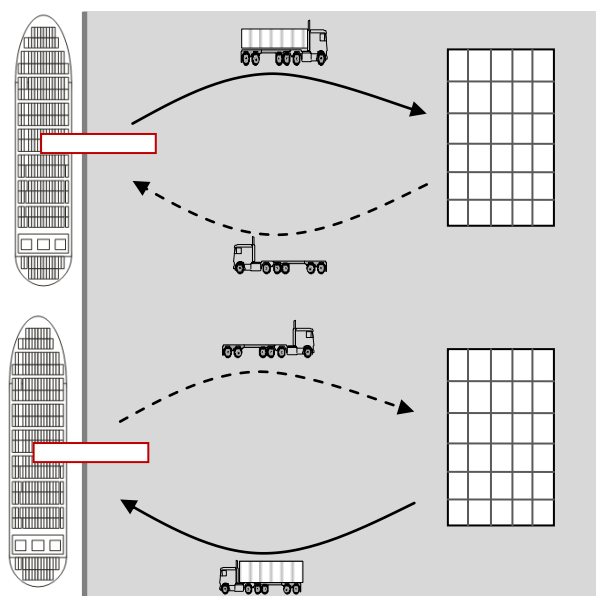
4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ

4.3.1 Σενάριο 3^ο – Σταθερή ανάθεση οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες

Το 3^ο σενάριο αφορά στη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης των οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες που είναι σε λειτουργία μονού κύκλου και περιγράφει τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης δύο πλοίων που έχουν παραβάλει σε ένα λιμάνι (Εικόνα 4.7).

Από το πρώτο πλοίο πρόκειται να εκφορτωθούν εκατό (100) εμπορευματοκιβώτια. Διατίθεται μια γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα για να το εξυπηρετήσει και ένα όχημα μεταφοράς που θα εκτελεί τη διαδρομή από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας και αντίστροφα. Το όχημα μεταφοράς κινείται με ταχύτητα 20km/h και η απόσταση που πρέπει να διανύσει από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας είναι 250m. Ομοίως η απόσταση από το χώρο στοιβασίας στο κρηπίδωμα είναι 250m. Η γερανογέφυρα έχει ικανότητα 20 εμπορευματοκιβωτίων/ώρα, δηλαδή χρειάζεται περίπου 3min για να παραλάβει κάθε εμπορευματοκιβώτιο και άλλο 1min για να το φορτώσει στο όχημα μεταφοράς. Όταν το όχημα μεταφοράς φτάνει στο χώρο στοιβασίας, απαιτείται 1min για να εκφορτωθεί.

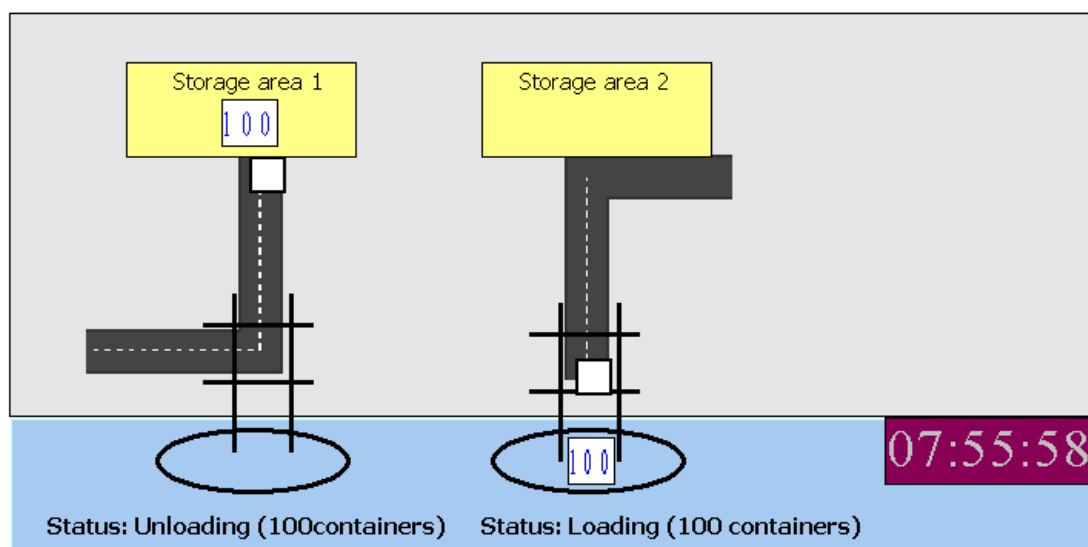
Στο δεύτερο πλοίο πρόκειται να φορτωθούν εκατό (100) εμπορευματοκιβώτια. Διατίθεται μια γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα για να το εξυπηρετήσει και ένα όχημα μεταφοράς που θα εκτελεί τη διαδρομή από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας και αντίστροφα. Το όχημα μεταφοράς κινείται με ταχύτητα 20km/h και η απόσταση που πρέπει να διανύσει από το κρηπίδωμα στο χώρο στοιβασίας είναι 250m. Ομοίως η απόσταση από το χώρο στοιβασίας στο κρηπίδωμα είναι 250m. Το όχημα μεταφοράς χρειάζεται 1min ώστε να φορτωθεί με ένα εμπορευματοκιβώτιο στο χώρο στοιβασίας και άλλο 1min ώστε να εκφορτωθεί στο κρηπίδωμα από τη γερανογέφυρα. Η γερανογέφυρα έχει ικανότητα 20 εμπορευματοκιβωτίων/ώρα, δηλαδή χρειάζεται περίπου 3min για να παραλάβει ένα εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς και να το εναποθέσει στο πλοίο.



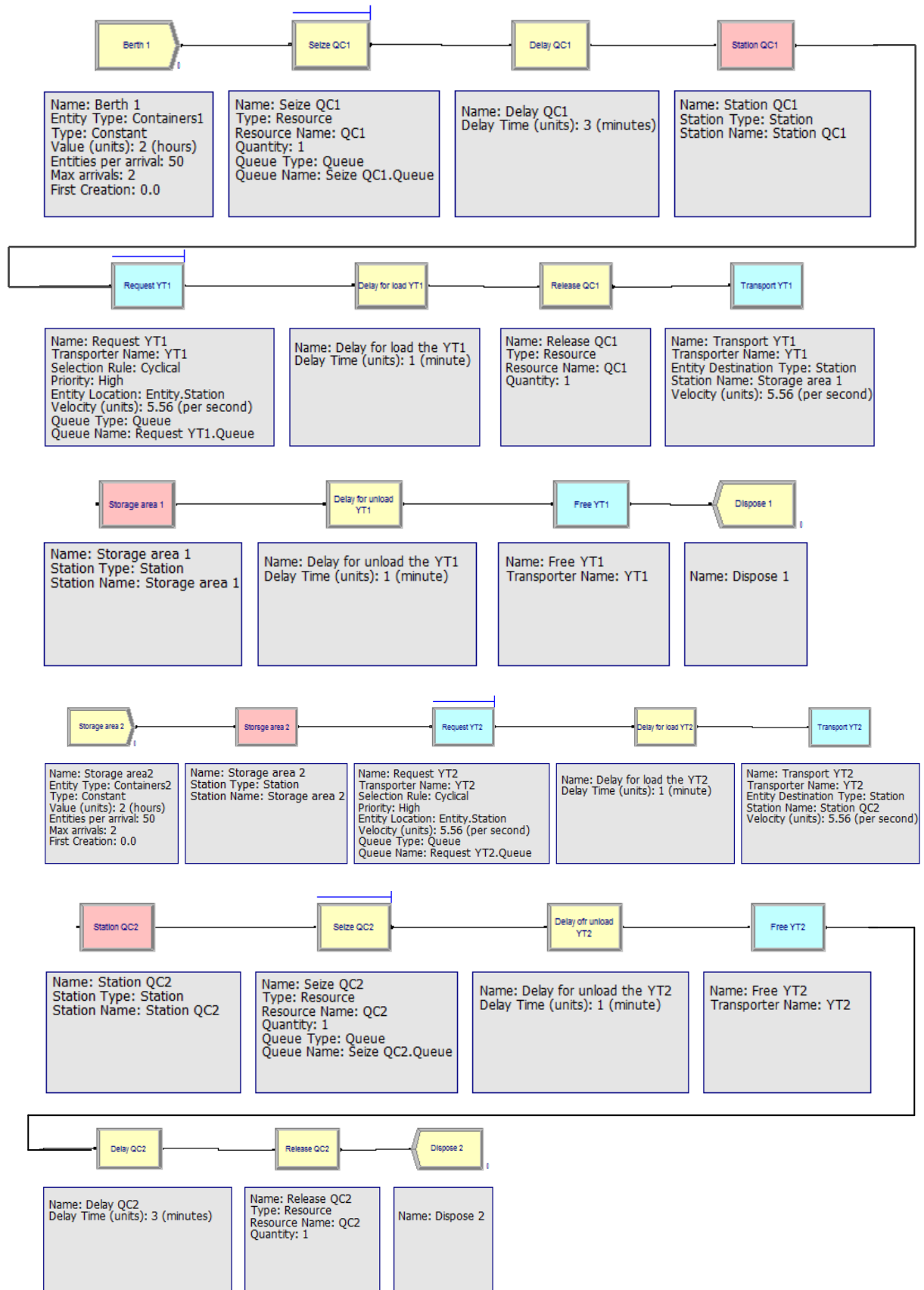
Εικόνα 4. 7: Σενάριο 1^ο – Σταθερή ανάθεση

Για την προσομοίωση των διαδικασιών που περιγράφηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Arena. Κατασκευάστηκε μοντέλο που περιγράφει τις διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης των πλοίων, με σταθερή ανάθεση των οχημάτων μεταφοράς. Αρχικά για λόγους ευκρίνειας και ευκολίας θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί κάθε λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά. Στην Εικόνα 4.9 φαίνεται το τελικό διάγραμμα ροής που κατασκευάστηκε, για το σχηματισμό του μοντέλου.

Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών που περιγράφηκαν, σχεδιάστηκε “animation” το οποίο φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 4.8 και αποτελεί το στιγμιότυπο της λήξης των διαδικασιών, δηλαδή της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το πρώτο πλοίο και φόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων στο δεύτερο πλοίο.



Εικόνα 4. 8: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 3^ο σενάριο.



Η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας κάθε λειτουργικής μονάδας παρατίθεται στο Παράρτημα Ζ.

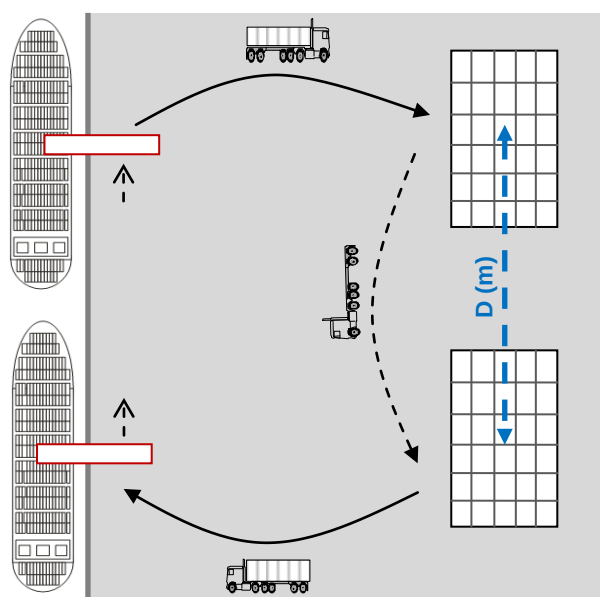
Εικόνα 4. 9: Διάγραμμα ροής για το Σενάριο 3

4.3.2 Σενάριο 4^ο – Ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες

Το 4^ο σενάριο αφορά στη στρατηγική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες διαφορετικών πλοίων, που είναι σε λειτουργία μονού κύκλου. Περιγράφει τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης δύο πλοίων που έχουν παραβάλει σε ένα λιμάνι (Εικόνα 4.10).

Από το πρώτο πλοίο πρόκειται να εκφορτωθούν 100 εμπορευματοκιβώτια και να εναποτεθούν σε ένα χώρο στοιβασίας. Διατίθεται μια γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα για να εκτελεί διαδικασίες εκφόρτωσης. Στο δεύτερο πλοίο πρόκειται να φορτωθούν 100 εμπορευματοκιβώτια από ένα άλλο χώρο στοιβασίας και διατίθεται μία γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα να εκτελεί διαδικασίες φόρτωσης.

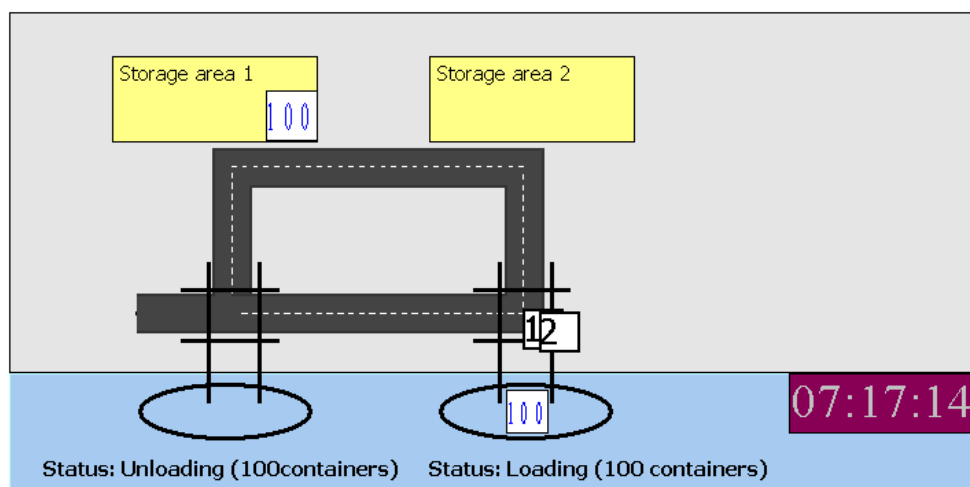
Για την πραγματοποίηση αυτών των διαδικασιών ανατίθεται μια ομάδα από δύο οχήματα μεταφοράς να εξυπηρετήσουν τις δύο γερανογέφυρες. Τα οχήματα μεταφοράς κινούνται με ταχύτητα 20km/h. Ο χρόνος φόρτωσης ή εκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων από τα οχήματα είναι 1 λεπτό και ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών είναι 3 λεπτά. Τα οχήματα ξεκινούν από το πρώτο πλοίο, όπου η γερανογέφυρα τους φορτώνει ένα εμπορευματοκιβώτιο. Ύστερα το μεταφέρουν στον πρώτο χώρο στοιβασίας και το εναποθέτουν εκεί. Σε κενή κατάσταση μεταφέρονται στο δεύτερο χώρο στοιβασίας όπου παραλαμβάνουν ένα εξαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο και το μεταφέρουν στη δεύτερη γερανογέφυρα για να το παραλάβει και να το φορτώσει στο δεύτερο πλοίο. Τελικά επιστρέφουν σε κενή κατάσταση στο πρώτο πλοίο για να παραλάβουν επόμενο εισαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Οι αποστάσεις μεταξύ “γερανογέφυρα – χώρος στοιβασίας” και αντίστροφα είναι 250m όπως και στο σενάριο 3. Στη στρατηγική αυτή όμως απαιτείται και ένα επιπλέον δεδομένο που είναι η απόσταση μεταξύ των χώρων στοιβασίας. Το σενάριο αυτό λοιπόν, θα εξετάσει διάφορες περιπτώσεις για διάφορες τιμές αποστάσεων μεταξύ των χώρων στοιβασίας. Το μοντέλο που ακολουθεί λαμβάνει μια αρχική απόσταση των χώρων 100m.



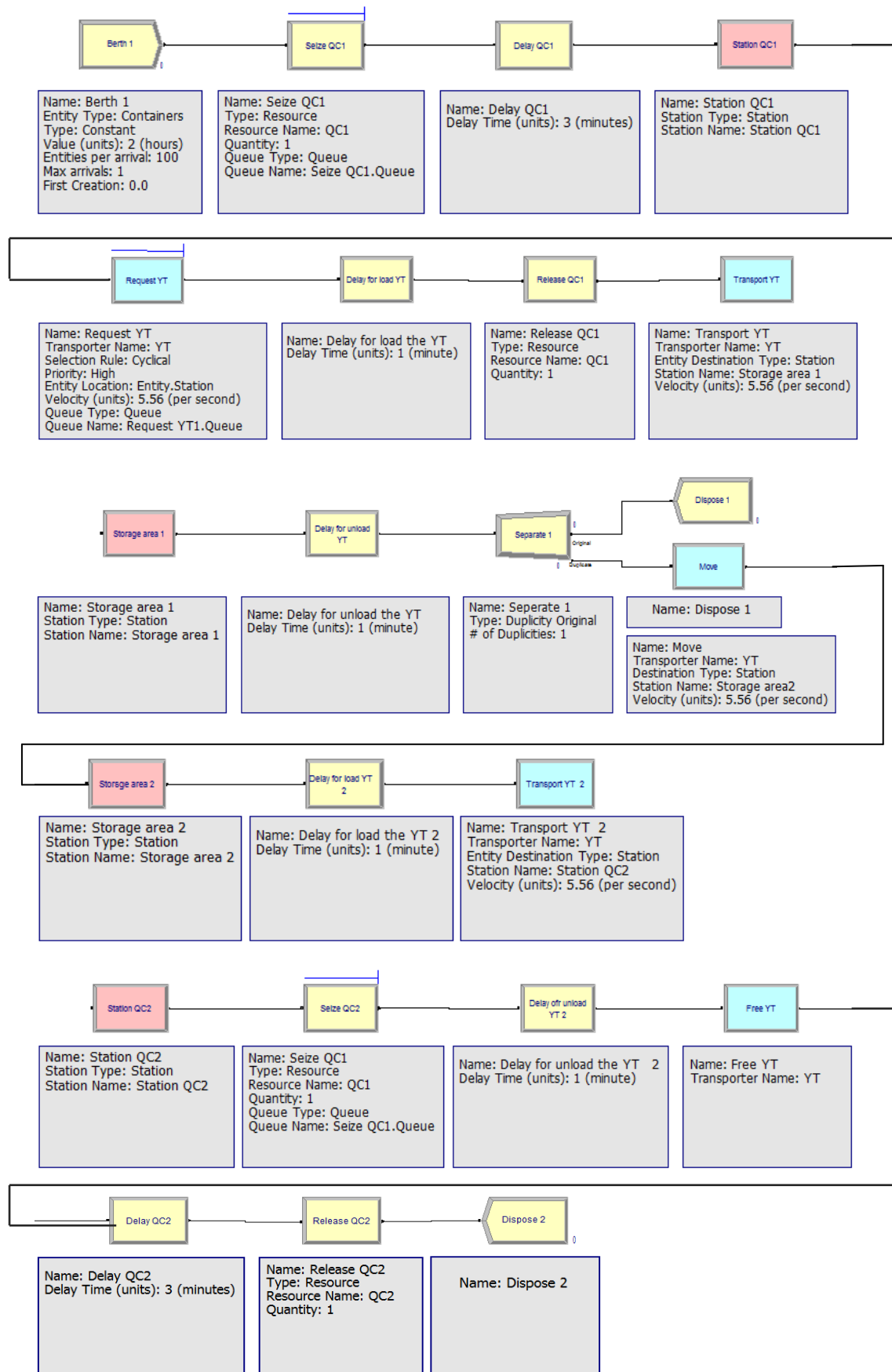
Εικόνα 4. 10: Σενάριο 2^ο – Ανάθεση ομάδας

Για την προσομοίωση των διαδικασιών που περιγράφηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Arena. Κατασκευάστηκε μοντέλο που περιγράφει τις διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης των πλοίων, με ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες. Όπως και προηγουμένως, για λόγους ευκρίνειας και ευκολίας θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί κάθε λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά. Στην Εικόνα 4.12 φαίνεται το τελικό διάγραμμα ροής που κατασκευάστηκε, για το σχηματισμό του μοντέλου.

Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών που περιγράφηκαν, σχεδιάστηκε “animation” το οποίο φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 4.11 και αποτελεί το στιγμιότυπο της λήξης των διαδικασιών, δηλαδή της εκφόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων από το πρώτο πλοίο και φόρτωσης 100 εμπορευματοκιβωτίων στο δεύτερο πλοίο.



Εικόνα 4. 11: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας για το 4^ο σενάριο.



Η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας κάθε λειτουργικής μονάδας παρατίθεται στο Παράρτημα Ζ.

Εικόνα 4. 12: Διάγραμμα ροής για το Σενάριο 4

4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Το μοντέλο για το 3^ο σενάριο, που αφορά στη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης, εκτελέστηκε και τερμάτισε όταν ολοκληρώθηκαν οι εργασίες εκφόρτωσης των 100 εμπορευματοκιβωτίων από το ένα πλοίο καθώς και οι διαδικασίες φόρτωσης των 100 εμπορευματοκιβωτίων στο άλλο πλοίο. Ο χρόνος που χρειάστηκε για να ολοκληρωθούν οι διαδικασίες αυτές ήταν 7ώρες, 55λεπτά και 58δευτερόλεπτα ή αλλιώς 475,97 λεπτά. Ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών είναι ανεξάρτητος της απόστασης των δύο χώρων στοιβασίας, εφόσον μετακίνηση στο τμήμα αυτό δεν πραγματοποιείται. Επομένως όσο μακριά ή όσο κοντά και να είναι η απόσταση των δύο χώρων στοιβασίας, ο χρόνος ολοκλήρωσης των διαδικασιών θα είναι πάντα 475,97 λεπτά (Πίνακας 4.1).

Το μοντέλο για το 4^ο σενάριο, που αφορά στη στρατηγική ανάθεσης ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες διαφορετικών πλοίων, εκτελέστηκε και τερμάτισε όταν ολοκληρώθηκαν οι εργασίες εκφόρτωσης των 100 εμπορευματοκιβωτίων από το ένα πλοίο καθώς και οι διαδικασίες φόρτωσης των 100 εμπορευματοκιβωτίων στο άλλο πλοίο. Ο χρόνος που χρειάστηκε για να ολοκληρωθούν οι διαδικασίες αυτές ήταν 7ώρες, 17λεπτά και 14δευτερόλεπτα ή αλλιώς 437,23 λεπτά. Ο χρόνος αυτός όμως αφορά στην περίπτωση που οι χώροι στοιβασίας είναι σε απόσταση 100m. Πραγματοποιήθηκε επίλυση του μοντέλου αυτού και για άλλες τιμές αποστάσεων των χώρων στοιβασίας. Είναι λογικό πως όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των χώρων στοιβασίας τόσο ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών αυξάνεται (Πίνακα 4.1).

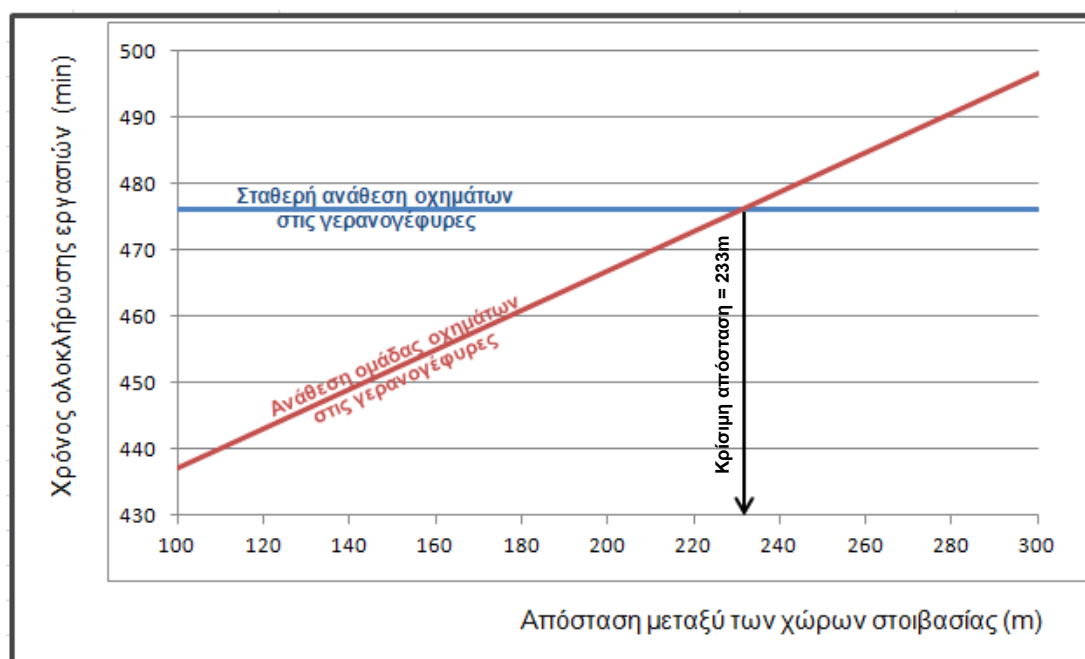
Όπως αναφέρθηκε, όταν η απόσταση μεταξύ των χώρων στοιβασίας είναι 100m, ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών για τη πρώτη στρατηγική είναι 475,97 λεπτά ενώ για τη δεύτερη στρατηγική είναι 437,23 λεπτά. Δηλαδή, στη δεύτερη στρατηγική οι εργασίες ολοκληρώνονται κατά 39 λεπτά, περίπου, πιο γρήγορα.

Όταν οι χώροι στοιβασίας είναι αρκετά μακριά, έχουν απόσταση της τάξης των 300m, τότε ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών για τη πρώτη στρατηγική είναι πάλι 475,97 λεπτά ενώ για τη δεύτερη στρατηγική είναι 496,58 λεπτά. Δηλαδή, στη πρώτη στρατηγική οι εργασίες ολοκληρώνονται κατά 21 λεπτά, περίπου, πιο γρήγορα.

Υπάρχει λοιπόν, μια κρίσιμη απόσταση των χώρων στοιβασίας που αν ξεπεραστεί τότε είναι αποτελεσματικότερη η εφαρμογή της πρώτης στρατηγικής. Ενώ, αν η απόσταση των χώρων στοιβασίας είναι μικρότερη από την κρίσιμη απόσταση τότε είναι αποτελεσματικότερη η εφαρμογή της δεύτερης στρατηγικής. Όπως δείχνει το Σχήμα 4.2, η κρίσιμη απόσταση είναι τα 233m.

Πίνακας 4. 1: Χρόνοι ολοκλήρωσης των διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης, για τις δύο στρατηγικές ανάθεσης εργασιών και για διάφορες τιμές αποστάσεων των χώρων στοιβασίας

Απόσταση μεταξύ των χώρων στοιβασίας	Χρόνος ολοκλήρωσης διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης	
	Σταθερή ανάθεση οχημάτων στις γερανογέφυρες	Ανάθεση ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες
(m)	(min)	
100	475,97 (σε όλες τις περιπτώσεις)	437,23
110		440,20
120		443,17
130		446,13
140		449,10
150		452,07
160		455,03
170		458,00
180		460,97
190		463,93
200		466,90
210		469,87
220		472,83
230		475,80
240		478,77
250		481,73
260		484,72
270		487,68
280		490,65
290		493,62
300		496,58



Σχήμα 4. 2: Κρίσιμη απόσταση χώρων στοιβασίας πέραν της οποίας η σταθερή ανάθεση οχημάτων είναι πιο αποτελεσματική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων.

4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ

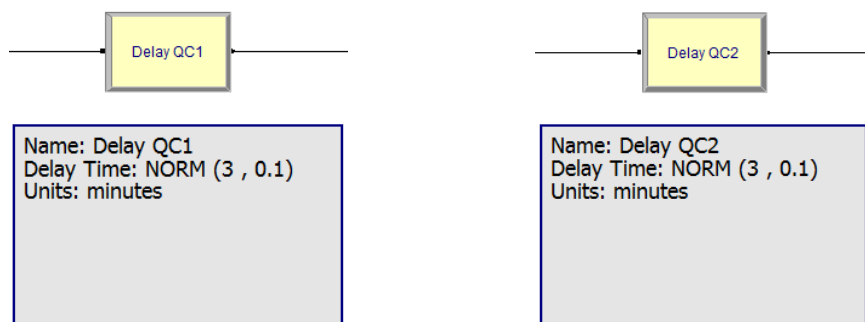
Όπως αποδείχθηκε και από τον Frankel^[42] το 1980, οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν διάφοροι τύποι εξοπλισμού δεν επηρεάζουν μόνο την επίδοση και το χρόνο κύκλου του συγκεκριμένου εξοπλισμού επηρεάζουν και το χρόνο κύκλου άλλων τύπων εξοπλισμού με τους οποίους αλληλεπιδρά. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να εξετάζονται οι αποκλίσεις που έχουν οι χρόνοι κύκλου του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, για να εκτιμάται η πραγματική ικανότητα του συστήματος η οποία είναι τελικά μικρότερη από την αναμενόμενη. Η απόδειξη αυτού του φαινομένου βρίσκεται στο Παράρτημα Ε.

Τα μοντέλα που επιλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και αφορούσαν τις στρατηγικές σταθερής ανάθεσης και ανάθεσης ομάδας, επιλύθηκαν με την παραδοχή ότι οι χρόνοι κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς είναι σταθεροί. Στην πραγματικότητα όμως και οι δύο χρόνοι κύκλου έχουν αποκλίσεις. Ο χρόνος κύκλος της γερανογέφυρας παρουσιάζει αποκλίσεις λόγω πιθανόν αναδιατάξεων που θα χρειαστεί να εκτελέσει η γερανογέφυρα σε ένα πλοίο, είτε σε διαδικασίες φόρτωσης είτε εκφόρτωσης. Οι λόγοι αποκλίσεων στο χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς και η μέθοδος εκτίμησης τους παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα και αφορούν κυρίως πιθανές αναδιατάξεις στους χώρους στοιβάσεως. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν επίλυση των παραπάνω μοντέλων λαμβάνοντας υπόψη αποκλίσεις στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς.

4.4.1 Σενάριο 5^ο – Σταθερή ανάθεση με αποκλίσεις στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς

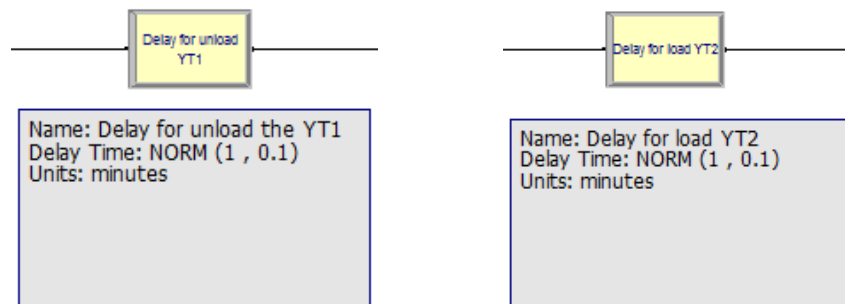
Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο 3^ο σενάριο με ορισμένες τροποποιήσεις. Οι τροποποιήσεις αυτές αφορούν στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών στο κρηπίδωμα και των οχημάτων μεταφοράς.

Στις λειτουργικές μονάδες καθυστέρησης “Delay QC1” και “Delay QC2” είχε ορισθεί ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών 3 λεπτά. Γίνεται αλλαγή αυτής της μεταβλητής εισόδου και ορίζεται ότι ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέσο όρο 3 λεπτά και τυπική απόκλιση 0,1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13.



Εικόνα 4. 13: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών (Σενάριο 5^ο)

Στις λειτουργικές μονάδες καθυστέρησης “Delay for unload YT1” και “Delay for load YT2” είχε ορισθεί ο χρόνος των οχημάτων στους χώρους στοιβασίας 1 λεπτό. Γίνεται αλλαγή αυτής της μεταβλητής εισόδου και ορίζεται ότι ο χρόνος των οχημάτων για παραλαβή/εναπόθεση ε/κ ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέσο όρο 1 λεπτό και τυπική απόκλιση 0,1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14.



Εικόνα 4. 14: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς (Σενάριο 5^ο)

Η ίδια διαδικασία τροποποιήσεων πραγματοποιήθηκε και για άλλες τιμές τυπικών αποκλίσεων (από το 0,1 έως το 1 με βήμα 0,1) και με αυτό το τρόπο προέκυψε ο Πίνακας 4.2. Εφόσον στο μοντέλο ακολουθείται η στρατηγική της σταθερής ανάθεσης, η απόσταση των χώρων στοιβασίας δεν επηρεάζει το χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών.

Το μοντέλο εκτελείται με τις παραπάνω τροποποιήσεις και οι διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων ολοκληρώνονται σε μεγαλύτερους χρόνους από την περίπτωση με σταθερούς χρόνους.

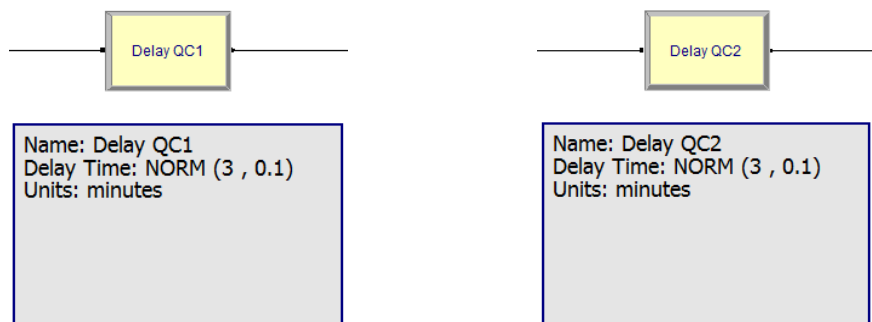
Πίνακας 4. 2: Χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων στην στρατηγική της σταθερής ανάθεσης

Σταθερή ανάθεση										
Τυπική απόκλιση (σ) Απόσταση	Ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών ακολουθεί την κανονική κατανομή N (μ , σ) όπου μ=3min									
	Ο χρόνος των οχημάτων στους χώρους στοιβασίας ακολουθεί την κανονική κατανομή N (μ , σ) όπου μ=1min									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
100										
110										
120										
130										
140										
150										
160										
170										
180										
190										
200	476,02	476,35	476,58	476,80	477,62	479,19	480,98	482,70	487,84	488,84
210										
220										
230										
240										
250										
260										
270										
280										
290										
300										

4.4.2 Σενάριο 6^ο – Ανάθεση ομάδας με αποκλίσεις στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς

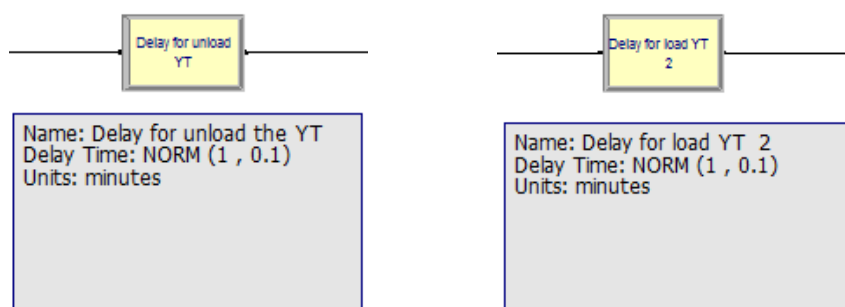
Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο 4^ο σενάριο με ορισμένες τροποποιήσεις. Οι τροποποιήσεις αυτές αφορούν στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών στο κρηπίδωμα και των οχημάτων μεταφοράς

Όπως και πριν, στις λειτουργικές μονάδες καθυστέρησης “Delay QC1” και “Delay QC2” του 4^{ου} σεναρίου όμως, είχε ορισθεί ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών 3 λεπτά. Γίνεται αλλαγή αυτής της μεταβλητής εισόδου και ορίζεται ότι ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέσο όρο 3 λεπτά και τυπική απόκλιση 0,1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15.



Εικόνα 4. 15: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών (Σενάριο 6^ο)

Στις λειτουργικές μονάδες καθυστέρησης “Delay for unload YT” και “Delay for load YT 2” είχε ορισθεί ο χρόνος των οχημάτων στους χώρους στοιβασίας 1 λεπτό. Γίνεται αλλαγή αυτής της μεταβλητής εισόδου και ορίζεται ότι ο χρόνος των οχημάτων για παραλαβή/εναπόθεση ε/κ ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέσο όρο 1 λεπτό και τυπική απόκλιση 0,1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.16.



Εικόνα 4. 16: Αλλαγές στο χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς (Σενάριο 6^ο)

Το μοντέλο εκτελείται με τις παραπάνω τροποποιήσεις και λαμβάνεται ο χρόνος ολοκλήρωσης των διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων. Στο σενάριο αυτό, όπως και στο τέταρτο σενάριο, ακολουθείται η στρατηγική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες των πλοίων. Επομένως, η απόσταση μεταξύ των χώρων στοιβασίας επηρεάζει το χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών, όπως εξηγήθηκε στο 4^ο σενάριο.

Για να μελετηθεί λοιπόν η επίδραση της τυπικής απόκλισης στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς γίνονταν τροποποιήσεις όχι μόνο στην τιμή της απόκλισης αλλά και στη τιμή της απόστασης των χώρων στοιβάσεως.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3, το μοντέλο εκτελέστηκε για τυπικές αποκλίσεις από το 0,1 έως το 1 με βήμα 0,1 και για αποστάσεις με τιμές από 100m έως 300m με βήμα 10.

Πίνακας 4. 3: Χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων και αποστάσεων στην στρατηγική ανάθεσης ομάδας

Ανάθεση ομάδας										
Απόσταση Τυπική απόκλιση (σ)	Ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών ακολουθεί την κανονική κατανομή N (μ , σ) όπου μ=3min									
	Ο χρόνος των οχημάτων στους χώρους στοιβάσεως ακολουθεί την κανονική κατανομή N (μ , σ) όπου μ=1min									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
100	437,05	437,09	437,29	437,61	438,85	441,30	444,83	449,41	454,16	458,63
110	440,04	440,08	441,15	441,37	441,45	443,66	447,10	451,58	456,57	461,40
120	443,00	443,20	443,41	443,60	444,69	446,25	449,64	453,93	459,03	463,42
130	445,95	446,00	446,21	446,63	447,18	448,96	452,05	456,10	460,42	465,61
140	448,92	448,97	449,21	449,23	449,99	451,50	454,39	458,36	463,63	467,88
150	451,88	451,93	452,14	452,19	452,56	454,27	457,28	461,94	465,17	470,59
160	454,84	454,86	454,89	454,94	455,18	457,62	459,62	463,42	468,38	472,85
170	457,23	457,27	457,31	457,78	458,23	460,52	462,56	465,13	469,58	475,37
180	460,93	460,96	460,98	461,12	461,32	462,71	465,19	468,80	472,85	478,22
190	463,25	463,28	463,36	463,78	464,59	465,58	467,25	469,25	475,26	479,86
200	466,79	466,92	466,95	467,13	467,24	467,78	470,89	473,88	478,39	482,97
210	469,68	469,75	469,78	469,92	470,17	471,00	472,60	475,53	480,26	485,56
220	472,53	472,64	472,71	472,92	473,05	473,93	476,17	479,17	482,99	488,00
230	475,52	475,59	475,63	475,98	476,25	477,25	478,46	481,25	483,59	490,46
240	478,62	478,67	478,73	478,75	478,80	480,10	481,57	484,97	488,00	492,47
250	481,56	481,58	481,61	481,68	482,42	483,12	485,25	487,36	491,56	496,49
260	484,52	484,53	484,47	484,57	484,59	485,44	487,45	493,69	494,69	498,70
270	487,06	487,09	487,23	487,24	487,75	488,23	489,58	494,12	497,25	501,72
280	490,46	490,52	490,56	490,71	490,94	491,23	493,10	495,80	500,10	505,12
290	492,45	492,48	492,53	492,67	492,98	493,28	494,45	497,59	501,59	507,57
300	495,67	495,69	495,72	495,81	496,17	496,93	499,03	502,73	504,47	510,41

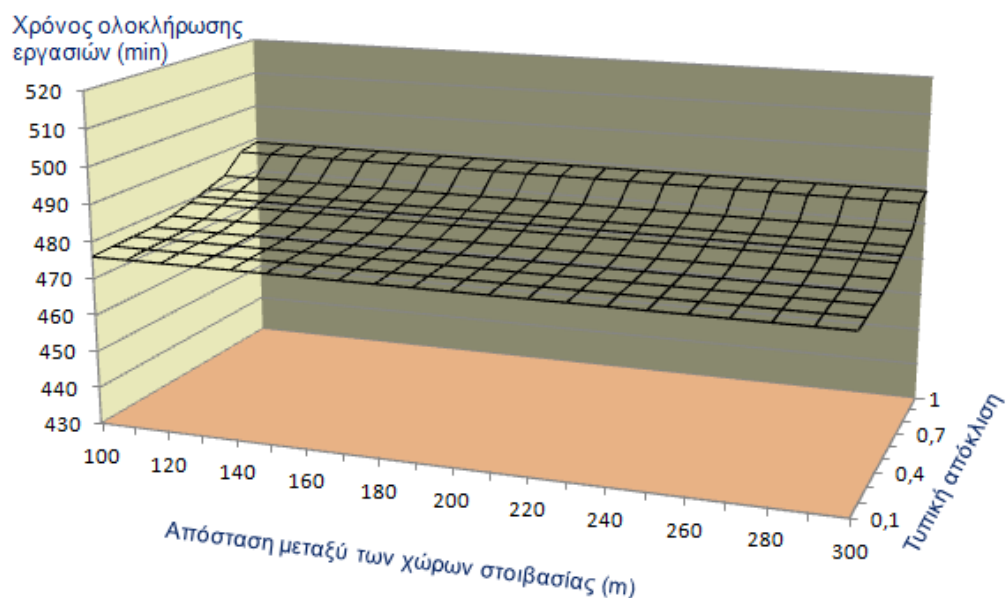
4.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Όλες οι διαδικασίες εκτελέστηκαν και τερμάτισαν όταν ολοκληρώθηκε η φόρτωση των 100 εξαγόμενων εμπορευματοκιβωτίων και η εκφόρτωση των 100 εισαγόμενων εμπορευματοκιβωτίων και προέκυψαν οι χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών που παρατέθηκαν στους Πίνακες 4.2 και 4.3.

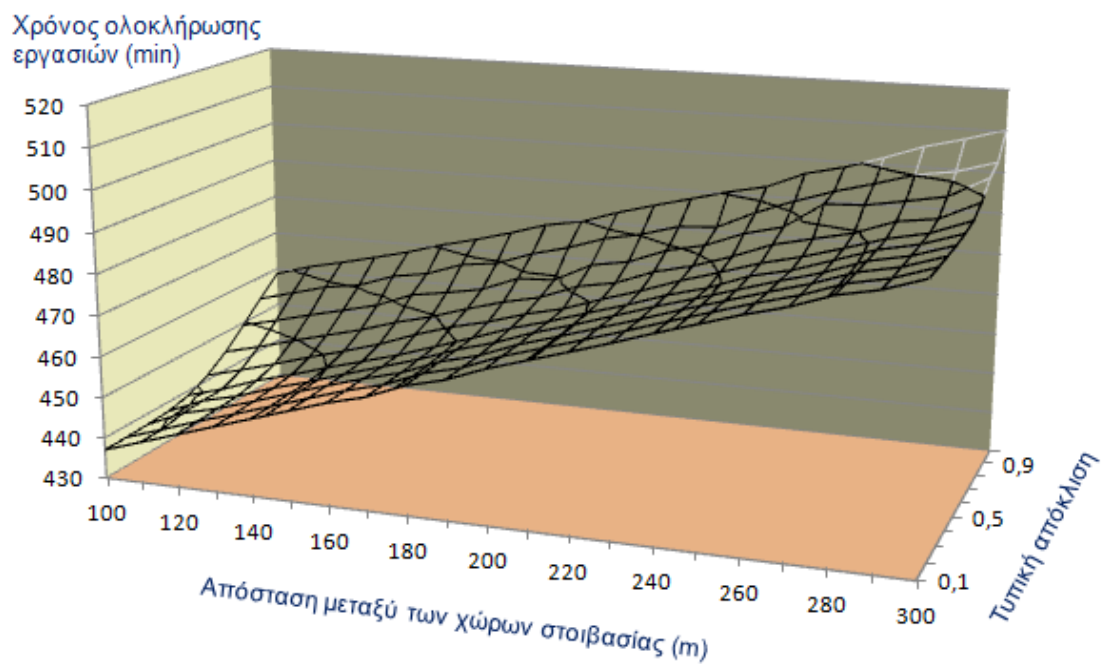
Το Σχήμα 4.3 δείχνει τη μεταβολή του χρόνου ολοκλήρωσης των εργασιών, για διαφορετικές τιμές τυπικών αποκλίσεων, στη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης. Το Σχήμα 4.4 δείχνει τη μεταβολή του χρόνου ολοκλήρωσης των εργασιών, για διαφορετικές τιμές τυπικών αποκλίσεων και διαφορετικές τιμές των αποστάσεων των χώρων στοιβάσεως, στη στρατηγική της ανάθεσης ομάδας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης των διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης και στις δύο στρατηγικές.

Για την εύρεση της κρίσιμης απόστασης που προκύπτει από κάθε συνδυασμό μιας τιμής τυπικής απόκλισης και μιας τιμής απόστασης των χώρων στοιβάσεως, ενοποιήθηκαν τα δύο παραπάνω σχήματα και προέκυψε το Σχήμα 4.5.

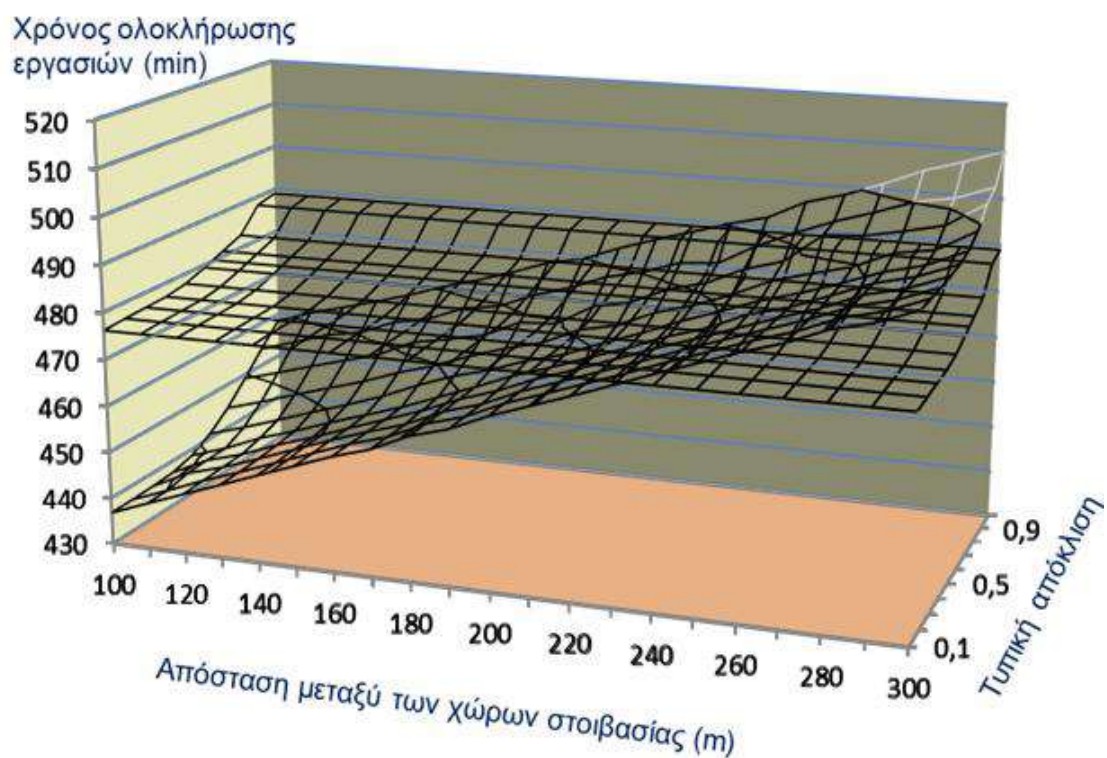
Γνωρίζοντας τελικά την απόσταση δύο χώρων στοιβάσεως και την απόκλιση που παρουσιάζει ο χρόνος κύκλου των γερανογεφυρών, προκύπτει με τη βοήθεια του Σχήματος 4.5 η κρίσιμη απόσταση των χώρων στοιβάσεως. Αν λοιπόν η πραγματική απόσταση των χώρων στοιβάσεως είναι μικρότερη από την κρίσιμη απόσταση που προέκυψε, τότε η στρατηγική ανάθεσης ομάδας είναι αποτελεσματικότερη. Αν όχι, τότε οι εργασίες θα ολοκληρωθούν πιο γρήγορα με τη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης. Γενικά η τιμή της κρίσιμης απόστασης κυμαίνεται από 200 έως 300m.



Σχήμα 4. 3: Μεταβολή χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων και αποστάσεων των χώρων στοιβάσεως για τη στρατηγική της σταθερής ανάθεσης



Σχήμα 4. 4: Μεταβολή χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών για διάφορες τιμές τυπικών αποκλίσεων και αποστάσεων των χώρων στοιβάσεως για τη στρατηγική της ανάθεσης ομάδας



Σχήμα 4. 5: Μεταβολή χρόνου ολοκλήρωσης εργασιών για τις δύο στρατηγικές και κρίσιμες αποστάσεις για κάθε περίπτωση

4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η μέθοδος που ακολουθεί υπολογίζει αρχικά το χρόνο κύκλου οχημάτων μεταφοράς για διαδικασίες φόρτωσης ή εκφόρτωσης πλοίων. Κατά τις διαδικασίες φόρτωσης πλοίου, τα οχήματα μεταφοράς πρέπει να παραλάβουν ένα διαφορετικό εξαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο σε κάθε φόρτωση, από μια διαφορετική θέση στο χώρο στοιβάσεως. Επομένως ο χρόνος κύκλου τους είναι διαφορετικός κάθε φορά. Ομοίως και στις διαδικασίες εκφόρτωσης πλοίου. Στη μέθοδο που ακολουθεί αφού υπολογιστούν οι χρόνοι κύκλου για διάφορες περιπτώσεις διαμόρφωσης των χώρων στοιβάσεως, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση των χρόνων σε κάθε περίπτωση.

Γενικά, ο χρόνος κύκλου των οχημάτων μεταφοράς προκύπτει ως άθροισμα των εξής επιμέρους τμημάτων^[19]:

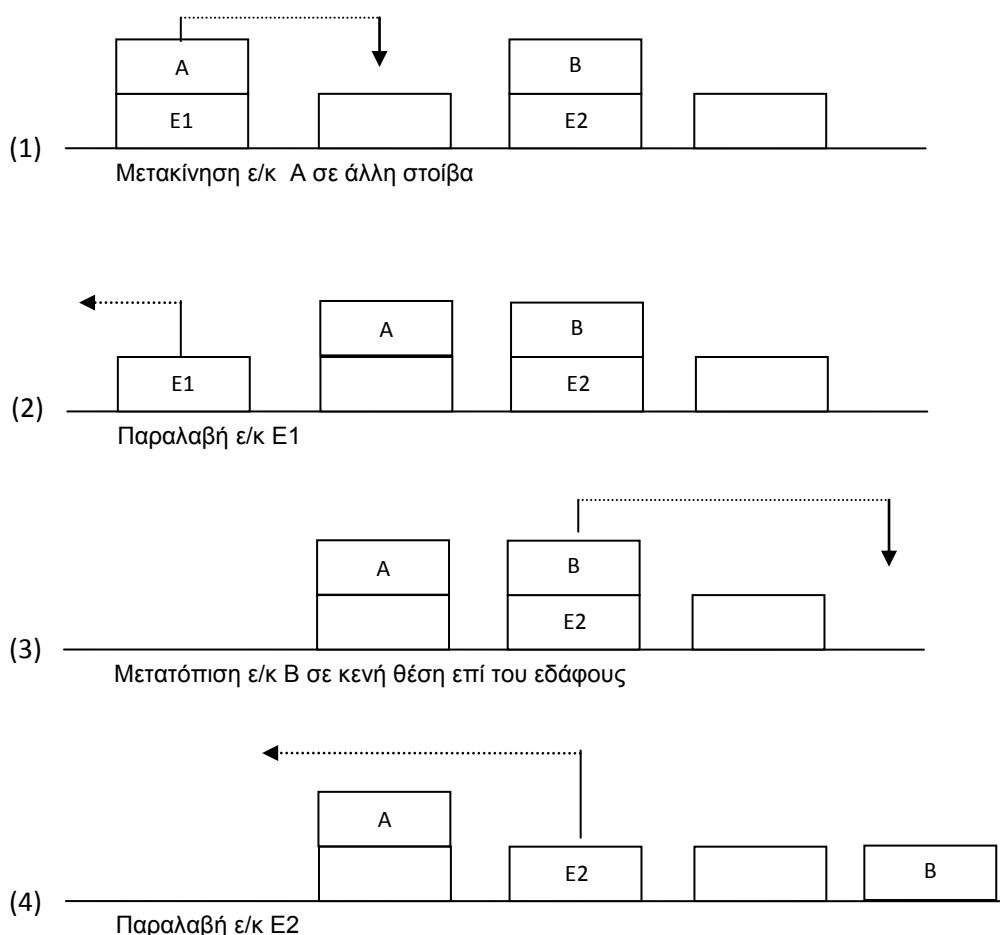
- Απαιτούμενος χρόνος για τις μετακινήσεις του οχήματος στους χώρους της τερματικής εγκατάστασης καθώς και απαιτούμενος χρόνος για την παραλαβή/εναπόθεση και τη μεταφόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου.
- Απώλειες χρόνου λόγω έλλειψης συγχρονισμού μεταξύ των οχημάτων του συστήματος.
- Απώλειες χρόνου λόγω κυκλοφοριακών εμπλοκών μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στο εσωτερικό οδικό δίκτυο της λιμενικής εγκατάστασης.
- Απώλειες χρόνου λόγω των (κατά περίπτωση) απαιτούμενων ενεργειών για την αναδιάταξη άλλων υπερκείμενων εμπορευματοκιβωτίων ώστε να αποκτηθεί πρόσβαση στο ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Η μέθοδος που θα ακολουθήσει δεν λαμβάνει υπόψη απώλειες χρόνου λόγω έλλειψης συγχρονισμού μεταξύ των οχημάτων του συστήματος και απώλειες χρόνου λόγω κυκλοφοριακών εμπλοκών μεταξύ των οχημάτων που κινούνται στο εσωτερικό οδικό δίκτυο της λιμενικής εγκατάστασης. Οι απώλειες χρόνου λόγω έλλειψης συγχρονισμού λαμβάνονται υπόψη στα μοντέλα που προτάθηκαν στις δύο προηγούμενες ενότητες επομένως δεν υπολογίζονται ξανά. Οι απώλειες λόγω κυκλοφοριακών εμπλοκών αντιμετωπίζονται ανάλογα με τη δομή του συστήματος και τον τύπο των οχημάτων/εξοπλισμού που χρησιμοποιεί η λιμενική εγκατάσταση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υποθέτουμε τη χρήση οχημάτων πλαισίων (straddle carriers) τα οποία είναι ιδιαίτερα ευέλικτα και δεν επηρεάζονται τόσο από κυκλοφορικές εμπλοκές στο εσωτερικό οδικό δίκτυο της λιμενικής εγκατάστασης. Ωστόσο αν ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούταν ήταν τα αυτόματα οχήματα μεταφοράς (AGVs) τότε θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη απώλειες λόγω κυκλοφοριακών εμπλοκών.

Επομένως, ο χρόνος κύκλου των οχημάτων μεταφοράς θα προκύψει ως άθροισμα του απαιτούμενου χρόνου για τις μετακινήσεις του οχήματος και των απωλειών χρόνου λόγω των (κατά περίπτωση) απαιτούμενων ενεργειών για την αναδιάταξη άλλων υπερκείμενων εμπορευματοκιβωτίων ώστε να αποκτηθεί πρόσβαση σε ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Ο χρόνος για τις μετακινήσεις του οχήματος μέχρι το χώρο στοιβασίας υπολογίζεται ως το πηλίκο της απόστασης που διανύει προς την ταχύτητα που κινείται.

Οι απώλειες χρόνου λόγω αναδιάταξης εμπορευματοκιβωτίων οφείλονται στις αλλαγές των θέσεων των εμπορευματοκιβωτίων ώστε να υπάρξει πρόσβαση σε εμπορευματοκιβώτιο που δεν είναι στη κορυφή της στοίβας και είναι ζητούμενο. Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται οι απαιτούμενες αναδιατάξεις ώστε να παραληφθούν συγκεκριμένα εμπορευματοκιβώτια. Οι κινήσεις αναδιάταξης είναι λογικό επακόλουθο της στοιβασίας των εμπορευματοκιβωτίων σε δύο ή περισσότερες στρώσεις καθ' ύψος, που με τη σειρά της είναι επακόλουθο της έλλειψης επαρκούς χώρου για την εναπόθεση όλων των εμπορευματοκιβωτίων σε μια στρώση. Σε κάθε λιμενική τερματική εγκατάσταση το “πλάνο φορτοεκφόρτωσης”, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο οργανώνονται οι χώροι στοιβασίας και τα κριτήρια διαχωρισμού των εμπορευματοκιβωτίων είναι διαφορετικό και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με βασικότερο όλων την έκταση και τη διαμόρφωση που έχουν οι χώροι στοιβασίας.



Σχήμα 4. 6: Απαιτούμενες αναδιατάξεις ώστε να πραγματοποιηθεί η παραλαβή των ε/κ E1 και E2.
Πηγή: [19]

Ο υπολογισμός των απωλειών χρόνου λόγω αναδιάταξης εμπορευματοκιβωτίων ανάγεται στον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης του ενδεχόμενου αυτού. Οι Pendel, Palmer, Tritton^[73] χρησιμοποιούν μια επαναληπτική διαδικασία βασισμένη στη διωνυμική κατανομή, (δειγματοληψία χωρίς επανατοποθέτηση) όπου ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στον σχηματισμό υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε νέα δειγματοληψία. Η πιθανότητα λοιπόν να υπάρχουν k εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα είναι:

$$P(k) = \binom{h}{k} * \left(\frac{c}{h * L}\right)^k * \left(1 - \frac{c}{h * L}\right)^{h-k} \quad (1)$$

όπου:

L = το μήκος της σειράς σε εμπορευματοκιβώτια

h = μέγιστο ύψος στοιβάσας

c = αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων

Η πιθανότητα λοιπόν αναδιάταξης δίδεται από τη σχέση:

$$Ps(j) = \sum_{k=j+1}^h \frac{P(k)}{k} \quad (2)$$

όπου, j = αριθμός των αναδιατάξεων

και $P(k)$ είναι η πιθανότητα να υπάρχουν k εμπορευματοκιβώτια, σε κάθε στοίβα, δεδομένου ότι υπάρχει ένα τουλάχιστον εμπορευματοκιβώτιο.

Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω θεωρητικό υπόβαθρο σχηματίστηκαν τέσσερα όμοια μοντέλα στο πρόγραμμα excel που υπολογίζει τους χρόνους κύκλου των οχημάτων μεταφοράς (κατά τις διαδικασίες παραλαβής εμπορευματοκιβωτίων από ένα χώρο στοιβασίας) για τις εξής τέσσερις περιπτώσεις διαμόρφωσης των χώρων στοιβασίας:

1^η Περίπτωση (μέσο ύψος στοιβασίας = 1)

Ο χώρος στοιβασίας αποτελείται από 20 σειρές και κάθε σειρά έχει μήκος 10 εμπορευματοκιβωτίων 40' (ποδών) ($L=10$). Το μέγιστο ύψος στοιβασίας είναι 3 ($h=3$) και κάθε σειρά περιέχει από 0 έως 20 εμπορευματοκιβώτια. Δηλαδή, ο μέσος αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων είναι 10 ($c=10$), το μέσο ύψος στοιβασίας είναι 1 και ο συνολικός αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στο χώρο είναι 200.

Για τον υπολογισμό των χρόνων κύκλου ενός οχήματος μεταφοράς ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Υπολογίστηκε ο σταθερός χρόνος (T_k) για την μετακίνηση του οχήματος στο χώρο στοιβασίας. Το όχημα κινείται με ταχύτητα 20km/h και διανύει απόσταση 250m. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στο χώρο στοιβασίας είναι 45 δευτερόλεπτα ή αλλιώς 0,75 λεπτά.
2. Ορίστηκε μια γεννήτρια (RND1) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 20 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της σειράς i που θα πάει το όχημα μεταφοράς. Ο χρόνος (T_1) που θα χρειαστεί για να φτάσει σε αυτή τη σειρά δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη σειρά προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την i σειρά είναι $(2,5^m + 1,5^m) * i$, όπου 2,5 είναι το πλάτος ενός εμπορευματοκιβωτίου σε μέτρα και 1,5 είναι το πλάτος ενός διαδρόμου μεταξύ των σειρών των εμπορευματοκιβωτίων σε μέτρα, που εξυπηρετεί στην κίνηση διαμέσου, των οχημάτων πλαισίων. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10km/h. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη σειρά i είναι: $T_1 = (2,5^m + 1,5^m) * i / 10^{km/h}$.
3. Ορίστηκε μια δεύτερη γεννήτρια (RND2) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 10 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της στοίβας j που θα πάει το όχημα στην σειρά i που επιλέχτηκε στο προηγούμενο βήμα. Ο χρόνος (T_2) που θα χρειαστεί για να φτάσει στη στοίβα δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη θέση προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την j στοίβα είναι $(12,2^m) * j$, όπου 12,2 είναι το μήκος ενός εμπορευματοκιβωτίου 40'. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10km/h. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη στοίβα j είναι: $T_2 = (12,2^m) * j / 10^{km/h}$.
4. Τέλος ορίστηκε μια τρίτη γεννήτρια (RND3) που παράγει τυχαία τους αριθμούς 0,1,2 με βάση κάποιες πιθανότητες. Οι αριθμοί 0,1,2 ορίζουν τον αριθμό των αναδιατάξεων που θα χρειαστεί να εκτελέσει το όχημα πλαίσιο στη σειρά i και στη στοίβα j για να παραλάβει το ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο. Ορίστηκε εξ' αρχής ότι το μέγιστο ύψος στοιβασίας είναι ίσο με 3. Επομένως είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν μέχρι και 2 αναδιατάξεις για την παραλαβή του ζητούμενου εμπορευματοκιβωτίου.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή, ορίστηκε ότι υπάρχουν από 0 έως 20 εμπορευματοκιβώτια σε κάθε σειρά, περίπου δηλαδή 10 ($c=10$). Επομένως σύμφωνα με τον τύπο (1) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(0)=29,6\%$
- η πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(1)=44,5\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(2)=22,2\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(3)=3,7\%$

Στη συνέχεια σύμφωνα με τον τύπο (2) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να απαιτούνται 0 αναδιατάξεις είναι ίση με την πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο συν τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(0 \text{ shuffles}) = P(0) + P(1) + 1/2P(2) + 1/3P(3) = 86,4\%$
- η πιθανότητα να απαιτείται 1 αναδιάταξη είναι ίση με τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(1 \text{ shuffle}) = 1/2P(2) + 1/3P(3) = 12,4\%$
- η πιθανότητα να απαιτούνται 2 αναδιατάξεις είναι ίση με το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(2 \text{ shuffles}) = 1/3P(3) = 1,2\%$

Με βάση λοιπόν αυτές τις πιθανότητες, διαμορφώθηκε ο επόμενος Πίνακας 4.4 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο του excel για να παραχθούν οι τυχαίου αριθμοί 0,1,2 με βάση τις πιθανότητες εμφάνισης τους.

Πίνακας 4. 4: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1^η περίπτωση

Αριθμός αναδιατάξεων	Πιθανότητα	Αθροιστική πιθανότητα
0	86,4%	0%
1	12,4%	86,4%
2	1,2%	98,8%

Ο χρόνος λοιπόν (T_3) που θα χρειαστεί για να πραγματοποιηθούν 0, 1 ή 2 αναδιατάξεις θα είναι ίσος το γινόμενο του αριθμού των αναδιατάξεων επί το χρόνο του ενός λεπτού (1min) που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μία αναδιάταξη.

Τελικά, ο χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς δίνεται κάθε φορά από τη σχέση:
 $T = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 + T_3$ (min)

Βέβαια σε ένα λιμάνι με επαρκή χώρο και κατάλληλη διαμόρφωση, ο χώρος στοιβάσας οργανώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχουν αναδιατάξεις και άρα άσκοπες καθυστερήσεις. Τότε ο χρόνος κύκλου δεν περιλαμβάνει τις αναδιατάξεις και δίνεται από τη σχέση: **$T_o = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2$ (min)**

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου αυτού προέκυψε ότι ο μέσος χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς, για την παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων από το χώρο στοιβασίας είναι: $T = 2,21 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,62$. Στην περίπτωση βέβαια που ο χώρος στοιβασίας είναι οργανωμένος έτσι ώστε να μην προκύπτουν αναδιατάξεις, ο μέσος χρόνος κύκλου είναι: $T = 2,06 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,50$.

2^η Περίπτωση (μέσο ύψος στοιβασίας = 1,5)

Ο χώρος στοιβασίας αποτελείται από 20 σειρές και κάθε σειρά έχει μήκος 10 εμπορευματοκιβωτίων 40' (ποδών) ($L=10$). Το μέγιστο ύψος στοιβασίας είναι 3 ($h=3$) και κάθε σειρά περιέχει από 0 έως 30 εμπορευματοκιβώτια. Δηλαδή, ο μέσος αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων είναι 15 ($c=15$), το μέσο ύψος στοιβασίας είναι 1,5 και ο συνολικός αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στο χώρο είναι 300.

Για τον υπολογισμό των χρόνων κύκλου ενός οχήματος μεταφοράς ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία:

1. Υπολογίστηκε ο σταθερός χρόνος (T_k) για την μετακίνηση του οχήματος στο χώρο στοιβασίας. Το όχημα κινείται με ταχύτητα 20 km/h και διανύει απόσταση 250 m . Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στο χώρο στοιβασίας είναι 45 δευτερόλεπτα ή αλλιώς $0,75$ λεπτά.
2. Ορίστηκε μια γεννήτρια (RND1) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 20 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της σειράς i που θα πάει το όχημα μεταφοράς. Ο χρόνος (T_1) που θα χρειαστεί για να φτάσει σε αυτή τη σειρά δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη σειρά προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την i σειρά είναι $(2,5^m + 1,5^m) * i$, όπου $2,5$ είναι το πλάτος ενός εμπορευματοκιβωτίου σε μέτρα και $1,5$ είναι το πλάτος ενός διαδρόμου μεταξύ των σειρών των εμπορευματοκιβωτίων σε μέτρα, που εξυπηρετεί στην κίνηση διαμέσου, των οχημάτων πλαισίων. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10 km/h . Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη σειρά i είναι: $T_1 = (2,5^m + 1,5^m) * i / 10^{km/h}$.
3. Ορίστηκε μια δεύτερη γεννήτρια (RND2) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 10 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της στοίβας j που θα πάει το όχημα στην σειρά i που επιλέχθηκε στο προηγούμενο βήμα. Ο χρόνος (T_2) που θα χρειαστεί για να φτάσει στη στοίβα δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη θέση προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την j στοίβα είναι $(12,2^m) * j$, όπου $12,2$ είναι το μήκος ενός εμπορευματοκιβωτίου 40'. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10 km/h . Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη στοίβα j είναι: $T_2 = (12,2^m) * j / 10^{km/h}$.
4. Τέλος ορίστηκε μια τρίτη γεννήτρια (RND3) που παράγει τυχαία τους αριθμούς $0,1,2$ με βάση κάποιες πιθανότητες. Οι αριθμοί $0,1,2$ ορίζουν τον αριθμό των αναδιατάξεων που θα χρειαστεί να εκτελέσει το όχημα πλαίσιο στη σειρά i και στη στοίβα j για να παραλάβει το ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο. Ορίστηκε εξ' αρχής

ότι το μέγιστο ύψος στοιβάσας είναι ίσο με 3. Επομένως είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν μέχρι και 2 αναδιατάξεις για την παραλαβή του ζητούμενου εμπορευματοκιβωτίου.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή, ορίστηκε ότι υπάρχουν από 0 έως 30 εμπορευματοκιβώτια σε κάθε σειρά, περίπου δηλαδή 15 ($c=15$). Επομένως σύμφωνα με τον τύπο (1) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(0)=12,5\%$
- η πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(1)=37,5\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(2)=37,5\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(3)=12,5\%$

Στη συνέχεια σύμφωνα με τον τύπο (2) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να απαιτούνται 0 αναδιατάξεις είναι ίση με την πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο συν τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(0 \text{ shuffles}) = P(0) + P(1) + 1/2P(2) + 1/3P(3) = 72,9\%$
- η πιθανότητα να απαιτείται 1 αναδιάταξη είναι ίση με τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(1 \text{ shuffle}) = 1/2P(2) + 1/3P(3) = 22,9\%$
- η πιθανότητα να απαιτούνται 2 αναδιατάξεις είναι ίση με το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(2 \text{ shuffles}) = 1/3P(3) = 4,2\%$

Με βάση λοιπόν αυτές τις πιθανότητες, διαμορφώθηκε ο επόμενος Πίνακας 4.5 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο του excel για να παραχθούν οι τυχαίου αριθμοί 0,1,2 με βάση τις πιθανότητες εμφάνισής τους.

Πίνακας 4. 5: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1^η περίπτωση

Αριθμός αναδιατάξεων	Πιθανότητα	Αθροιστική πιθανότητα
0	72,9%	0%
1	22,9%	72,9%
2	4,2%	95,8%

Ο χρόνος λοιπόν (T_3) που θα χρειαστεί για να πραγματοποιηθούν 0, 1 ή 2 αναδιατάξεις θα είναι ίσος το γινόμενο του αριθμού των αναδιατάξεων επί το χρόνο του ενός λεπτού (1min) που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μία αναδιάταξη.

Τελικά, ο χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς δίνεται κάθε φορά από τη σχέση:
 $T = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 + T_3$ (min)

Βέβαια σε ένα λιμάνι με επαρκή χώρο και κατάλληλη διαμόρφωση, ο χώρος στοιβάσας οργανώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχουν αναδιατάξεις και άρα άσκοπες

καθυστερήσεις. Τότε ο χρόνος κύκλου δεν περιλαμβάνει τις αναδιατάξεις και δίνεται από τη σχέση: $T_o = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 \text{ (min)}$

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου αυτού προέκυψε ότι ο μέσος χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς, για την παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων από το χώρο στοιβασίας είναι: $T = 2,42 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,81$. Στην περίπτωση βέβαια που ο χώρος στοιβασίας είναι οργανωμένος έτσι ώστε να μην προκύπτουν αναδιατάξεις, ο μέσος χρόνος κύκλου είναι: $T = 2,07 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,51$.

3^η Περίπτωση (μέσο ύψος στοιβασίας = 2)

Ο χώρος στοιβασίας αποτελείται από 20 σειρές και κάθε σειρά έχει μήκος 10 εμπορευματοκιβωτίων 40' (ποδών) ($L=10$). Το μέγιστο ύψος στοιβασίας είναι 3 ($h=3$) και κάθε σειρά περιέχει από 15 έως 25 εμπορευματοκιβώτια. Δηλαδή, ο μέσος αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων είναι 20 ($c=20$), το μέσο ύψος στοιβασίας είναι 2 και ο συνολικός αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στο χώρο είναι 400.

Για τον υπολογισμό των χρόνων κύκλου ενός οχήματος μεταφοράς ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία:

1. Υπολογίστηκε ο σταθερός χρόνος (T_k) για την μετακίνηση του οχήματος στο χώρο στοιβασίας. Το όχημα κινείται με ταχύτητα 20km/h και διανύει απόσταση 250m. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στο χώρο στοιβασίας είναι 45 δευτερόλεπτα ή αλλιώς 0,75 λεπτά.
2. Ορίστηκε μια γεννήτρια (RND1) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 20 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της σειράς i που θα πάει το όχημα μεταφοράς. Ο χρόνος (T_1) που θα χρειαστεί για να φτάσει σε αυτή τη σειρά δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη σειρά προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την i σειρά είναι $(2,5^m + 1,5^m) \cdot i$, όπου 2,5 είναι το πλάτος ενός εμπορευματοκιβωτίου σε μέτρα και 1,5 είναι το πλάτος ενός διαδρόμου μεταξύ των σειρών των εμπορευματοκιβωτίων σε μέτρα, που εξυπηρετεί στην κίνηση διαμέσου, των οχημάτων πλαισίων. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10km/h. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη σειρά i είναι: $T_1 = (2,5^m + 1,5^m) \cdot i / 10^{km/h}$.
3. Ορίστηκε μια δεύτερη γεννήτρια (RND2) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 10 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της στοίβας j που θα πάει το όχημα στην σειρά i που επιλέχτηκε στο προηγούμενο βήμα. Ο χρόνος (T_2) που θα χρειαστεί για να φτάσει στη στοίβα δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη θέση προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την j στοίβα είναι $(12,2^m) \cdot j$, όπου 12,2 είναι το μήκος ενός εμπορευματοκιβωτίου 40'. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10km/h. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη στοίβα j είναι: $T_2 = (12,2^m) \cdot j / 10^{km/h}$.
4. Τέλος ορίστηκε μια τρίτη γεννήτρια (RND3) που παράγει τυχαία τους αριθμούς 0,1,2 με βάση κάποιες πιθανότητες. Οι αριθμοί 0,1,2 ορίζουν τον αριθμό των

αναδιατάξεων που θα χρειαστεί να εκτελέσει το όχημα πλαίσιο στη σειρά i και στη στοίβα j για να παραλάβει το ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο. Ορίστηκε εξ' αρχής ότι το μέγιστο ύψος στοίβας είναι ίσο με 3. Επομένως είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν μέχρι και 2 αναδιατάξεις για την παραλαβή του ζητούμενου εμπορευματοκιβωτίου.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή, ορίστηκε ότι υπάρχουν από 15 έως 25 εμπορευματοκιβώτια σε κάθε σειρά, περίπου δηλαδή 20 ($c=20$). Επομένως σύμφωνα με τον τύπο (1) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(0)=3,7\%$
- η πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(1)=22,22\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(2)=44,44\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(3)=29,6\%$

Στη συνέχεια σύμφωνα με τον τύπο (2) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να απαιτούνται 0 αναδιατάξεις είναι ίση με την πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο συν τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(0 \text{ shuffles}) = P(0) + P(1) + 1/2P(2) + 1/3P(3) = 58\%$
- η πιθανότητα να απαιτείται 1 αναδιάταξη είναι ίση με τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(1 \text{ shuffle}) = 1/2P(2) + 1/3P(3) = 32\%$
- η πιθανότητα να απαιτούνται 2 αναδιατάξεις είναι ίση με το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(2 \text{ shuffles}) = 1/3P(3) = 10\%$

Με βάση λοιπόν αυτές τις πιθανότητες, διαμορφώθηκε ο επόμενος Πίνακας 4.6 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο του excel για να παραχθούν οι τυχαίοι αριθμοί 0,1,2 με βάση τις πιθανότητες εμφάνισης τους.

Πίνακας 4. 6: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1^η περίπτωση

Αριθμός αναδιατάξεων	Πιθανότητα	Αθροιστική πιθανότητα
0	58%	0%
1	32%	58%
2	10%	90%

Ο χρόνος λοιπόν (T_3) που θα χρειαστεί για να πραγματοποιηθούν 0, 1 ή 2 αναδιατάξεις θα είναι ίσος το γινόμενο του αριθμού των αναδιατάξεων επί το χρόνο του ενός λεπτού (1min) που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μία αναδιάταξη.

Τελικά, ο χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς δίνεται κάθε φορά από τη σχέση:
 $T = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 + T_3 \text{ (min)}$

Βέβαια σε ένα λιμάνι με επαρκή χώρο και κατάλληλη διαμόρφωση, ο χώρος στοιβασίας οργανώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχουν αναδιατάξεις και άρα άσκοπες καθυστερήσεις. Τότε ο χρόνος κύκλου δεν περιλαμβάνει τις αναδιατάξεις και δίνεται από τη σχέση: $T_o = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 \text{ (min)}$

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου αυτού προέκυψε ότι ο μέσος χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς, για την παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων από το χώρο στοιβασίας είναι: $T = 2,56 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,84$. Στην περίπτωση βέβαια που ο χώρος στοιβασίας είναι οργανωμένος έτσι ώστε να μην προκύπτουν αναδιατάξεις, ο μέσος χρόνος κύκλου είναι: $T = 2,03 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,49$.

4^η Περίπτωση (μέσο ύψος στοιβασίας = 2,5)

Ο χώρος στοιβασίας αποτελείται από 20 σειρές και κάθε σειρά έχει μήκος 10 εμπορευματοκιβωτίων 40' (ποδών) ($L=10$). Το μέγιστο ύψος στοιβασίας είναι 3 ($h=3$) και κάθε σειρά περιέχει από 20 έως 30 εμπορευματοκιβώτια. Δηλαδή, ο μέσος αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων είναι 25 ($c=25$), το μέσο ύψος στοιβασίας είναι 2,5 και ο συνολικός αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων στο χώρο είναι 500.

Για τον υπολογισμό των χρόνων κύκλου ενός οχήματος μεταφοράς ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία:

1. Υπολογίστηκε ο σταθερός χρόνος (T_k) για την μετακίνηση του οχήματος στο χώρο στοιβασίας. Το όχημα κινείται με ταχύτητα 20km/h και διανύει απόσταση 250m. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στο χώρο στοιβασίας είναι 45 δευτερόλεπτα ή αλλιώς 0,75 λεπτά.
2. Ορίστηκε μια γεννήτρια (RND1) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 20 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της σειράς i που θα πάει το όχημα μεταφοράς. Ο χρόνος (T_1) που θα χρειαστεί για να φτάσει σε αυτή τη σειρά δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη σειρά προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την i σειρά είναι $(2,5^m + 1,5^m) \cdot i$, όπου 2,5 είναι το πλάτος ενός εμπορευματοκιβωτίου σε μέτρα και 1,5 είναι το πλάτος ενός διαδρόμου μεταξύ των σειρών των εμπορευματοκιβωτίων σε μέτρα, που εξυπηρετεί στην κίνηση διαμέσου, των οχημάτων πλαισίων. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10km/h. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη σειρά i είναι: $T_1 = (2,5^m + 1,5^m) \cdot i / 10^{km/h}$.
3. Ορίστηκε μια δεύτερη γεννήτρια (RND2) που παράγει τυχαίους αριθμούς από το 1 έως το 10 και ορίζει κάθε φορά τον αριθμό της στοίβας j που θα πάει το όχημα στην σειρά i που επιλέχτηκε στο προηγούμενο βήμα. Ο χρόνος (T_2) που θα χρειαστεί για να φτάσει στη στοίβα δίνεται από το πηλίκο της απόστασης που θα διανύσει μέχρι αυτή τη θέση προς την ταχύτητα που θα κινείται. Η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει μέχρι την j στοίβα είναι $(12,2^m) \cdot j$, όπου 12,2 είναι το μήκος ενός εμπορευματοκιβωτίου 40'. Η ταχύτητα του οχήματος στο τμήμα αυτό είναι 10km/h. Επομένως ο χρόνος που χρειάζεται να φτάσει στη στοίβα j είναι: $T_2 = (12,2^m) \cdot j / 10^{km/h}$.

4. Τέλος ορίστηκε μια τρίτη γεννήτρια (RND3) που παράγει τυχαία τους αριθμούς 0,1,2 με βάση κάποιες πιθανότητες. Οι αριθμοί 0,1,2 ορίζουν τον αριθμό των αναδιατάξεων που θα χρειαστεί να εκτελέσει το όχημα πλαίσιο στη σειρά i και στη στοίβα j για να παραλάβει το ζητούμενο εμπορευματοκιβώτιο. Ορίστηκε εξ' αρχής ότι το μέγιστο ύψος στοίβας είναι ίσο με 3. Επομένως είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν μέχρι και 2 αναδιατάξεις για την παραλαβή του ζητούμενου εμπορευματοκιβωτίου.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή, ορίστηκε ότι υπάρχουν από 20 έως 30 εμπορευματοκιβώτια σε κάθε σειρά, περίπου δηλαδή 20 ($c=20$). Επομένως σύμφωνα με τον τύπο (1) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(0)=0,4\%$
- η πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(1)=7\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(2)=34,7\%$
- η πιθανότητα να υπάρχουν 0 εμπορευματοκιβώτια σε οποιαδήποτε στοίβα της σειράς είναι: $P(3)=57,9\%$

Στη συνέχεια σύμφωνα με τον τύπο (2) ισχύει ότι:

- η πιθανότητα να απαιτούνται 0 αναδιατάξεις είναι ίση με την πιθανότητα να υπάρχει 1 εμπορευματοκιβώτιο συν τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(0 \text{ shuffles}) = P(0) + P(1) + 1/2P(2) + 1/3P(3) = 44,1\%$
- η πιθανότητα να απαιτείται 1 αναδιάταξη είναι ίση με τη μισή πιθανότητα να υπάρχουν 2 εμπορευματοκιβώτια συν το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(1 \text{ shuffle}) = 1/2P(2) + 1/3P(3) = 36,6\%$
- η πιθανότητα να απαιτούνται 2 αναδιατάξεις είναι ίση με το ένα τρίτο της πιθανότητας να υπάρχουν 3 εμπορευματοκιβώτια, δηλαδή είναι:
 $P(2 \text{ shuffles}) = 1/3P(3) = 19,3\%$

Με βάση λοιπόν αυτές τις πιθανότητες, διαμορφώθηκε ο επόμενος Πίνακας 4.7 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο του excel για να παραχθούν οι τυχαίοι αριθμοί 0,1,2 με βάση τις πιθανότητες εμφάνισής τους.

Πίνακας 4. 7: Πιθανότητα εμφάνισης αναδιατάξεων στην 1^η περίπτωση

Αριθμός αναδιατάξεων	Πιθανότητα	Αθροιστική πιθανότητα
0	44,1%	0%
1	36,6%	44,1%
2	19,3%	80,7%

Ο χρόνος λοιπόν (T_3) που θα χρειαστεί για να πραγματοποιηθούν 0, 1 ή 2 αναδιατάξεις θα είναι ίσος το γινόμενο του αριθμού των αναδιατάξεων επί το χρόνο του ενός λεπτού (1min) που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μία αναδιάταξη.

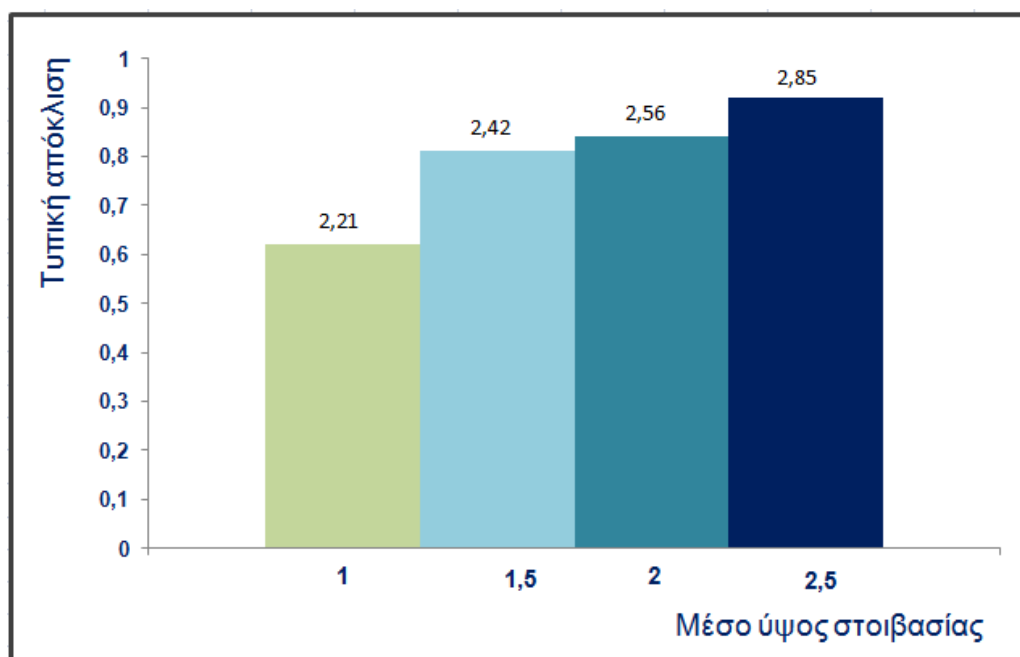
Τελικά, ο χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς δίνεται κάθε φορά από τη σχέση:
 $T = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 + T_3 \text{ (min)}$

Βέβαια σε ένα λιμάνι με επαρκή χώρο και κατάλληλη διαμόρφωση, ο χώρος στοιβάσεως οργανώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχουν αναδιατάξεις και άρα άσκοπες καθυστερήσεις. Τότε ο χρόνος κύκλου δεν περιλαμβάνει τις αναδιατάξεις και δίνεται από τη σχέση: $T_o = T_k + 2 \cdot T_1 + 2 \cdot T_2 \text{ (min)}$

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου αυτού προέκυψε ότι ο μέσος χρόνος κύκλου του οχήματος μεταφοράς, για την παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων από το χώρο στοιβάσεως είναι: $T = 2,85 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,96$. Στην περίπτωση βέβαια που ο χώρος στοιβάσεως είναι οργανωμένος έτσι ώστε να μην προκύπτουν αναδιατάξεις, ο μέσος χρόνος κύκλου είναι: $T = 2,04 \text{ min}$ και παρουσιάζει τυπική απόκλιση $s = 0,51$.

Η αναλυτική επίλυση και οι πίνακες που πραγματοποιήθηκαν για την επίλυση των μοντέλων των παραπάνω τεσσάρων περιπτώσεων βρίσκεται στο Παράρτημα ΣΤ.

Μελετώντας τις τέσσερις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν προέκυψε το Σχήμα 4.7. Με βάση το σχήμα αυτό, αν είναι γνωστό το μέσο ύψος στοιβάσεως ενός χώρου στοιβάσεως και η πληροφορία για το αν γίνονται διαδικασίες οργάνωσης του χώρου, με βάση το πλάνο φορτοεκφόρτωσης, αν δηλαδή πραγματοποιείται προ-οργάνωση του χώρου για να μην προκύπτουν αναδιατάξεις, τότε μπορεί να εκτιμηθεί η τυπική απόκλιση που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αν δεν πραγματοποιούνται διαδικασίες προ-οργάνωσης του χώρου πιθανόν για λόγους ανεπάρκειας χώρου ή μη κατάλληλης διάταξης τότε μπορεί να εκτιμηθεί μια τιμή της τυπικής απόκλισης που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο χρόνο κύκλου των οχημάτων μεταφοράς.



Σχήμα 4. 7: Εύρεση τυπικής απόκλισης σε σχέση με το μέσο ύψος στοιβάσεως

4.6 ΜΕΡΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν δύο στρατηγικές ανάθεσης εργασιών στα οχήματα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, στο υποσύστημα κρηπίδωμα – χώρος στοιβάσις. Ζητούμενο ήταν να βρεθεί η αποτελεσματικότερη στρατηγική η οποία θα ολοκληρώνει τις εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων σε μικρότερο χρόνο.

Η πρώτη στρατηγική ήταν η σταθερή ανάθεση των οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες και η δεύτερη στρατηγική ήταν η ανάθεση ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες των πλοίων.

Διατυπώθηκαν μοντέλα που περιέγραφαν τις δύο στρατηγικές ανάθεσης εργασιών σε διαδικασίες εκφόρτωσης πλοίων μόνο και σε διαδικασίες ταυτόχρονης φόρτωσης και εκφόρτωσης πλοίων. Με μικρές τροποποιήσεις λάμβαναν κάθε φορά υπόψη τυχόν αποκλίσεις στο χρόνο κύκλου των γερανογεφυρών και στο χρόνο κύκλο των οχημάτων μεταφοράς.

Εξετάστηκαν περιπτώσεις χωρίς ή με αποκλίσεις στους δύο χρόνους κύκλους, των γερανογεφυρών και των οχημάτων μεταφοράς. Όσο μεγαλύτερη ήταν η τιμή της τυπικής απόκλισης που λαμβανόταν υπόψη τόσο μεγαλύτερος ήταν ο χρόνος ολοκλήρωσης των διαδικασιών φόρτωσης και εκφόρτωσης των πλοίων. Σε κάθε τιμή τυπικής απόκλισης υπήρχε μια διαφορετική κρίσιμη απόσταση μεταξύ των χώρων στοιβάσις που η τιμή της σε σύγκριση με την πραγματική απόσταση καθόριζε την αποτελεσματικότερη στρατηγική. Ωστόσο, η τιμή τη κρίσιμης απόστασης κυμαινόταν πάντα μεταξύ 200-300m. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα λιμάνι θα μπορούσαν δύο πλοία στη σειρά να εξυπηρετούνται μαζί εφαρμόζοντας μια στρατηγική ανάθεσης ομάδας και οι εργασίες φορτοεκφόρτωσης να ολοκληρωθούν γρηγορότερα σε σχέση με μια στρατηγική σταθερής ανάθεσης.

Ένα γενικότερο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι σε λιμάνια με γραμμικά κρηπιδώματα, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των χώρων στοιβάσις είναι μεγάλες, η στρατηγική της σταθερής ανάθεσης θα ήταν αποτελεσματικότερη σε σχέση με μια στρατηγική ανάθεσης ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες των πλοίων.

Ενώ σε λιμάνια με κρηπιδώματα μορφής τραπεζίου, όπου οι αποστάσεις των χώρων στοιβάσις είναι μικρές, η στρατηγική της ανάθεσης ομάδας θα ήταν αποτελεσματικότερη σε σχέση με μια σταθερή ανάθεση οχημάτων στις γερανογέφυρες των πλοίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια παρουσίαση των εναλλακτικών τεχνικών οργάνωσης του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου, εντός λιμενικών τερματικών σταθμών. Η βασική μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η προσομοίωση.

Αρχικά, έγινε μια συνοπτική παρουσίαση του συστήματος λιμενικών εγκαταστάσεων εμπορευματοκιβωτίων και του υποσυστήματος, ειδικότερα, μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου. Εντοπίστηκαν προβλήματα στο σύστημα και πραγματοποιήθηκε επισκόπηση όλων των μεθόδων της επιχειρησιακής έρευνας που έχουν χρησιμοποιηθεί για να τα επιλύσουν.

Αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης λιμενικών εγκαταστάσεων με το λογισμικό Arena και πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι εγκυρότητας τους οι οποίοι ήταν επιτυχείς.

Αναπτύχθηκαν επίσης, μοντέλα προσομοίωσης, με το λογισμικό Arena, του υποσυστήματος διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ κρηπιδώματος και χερσαίου χώρου, στα οποία μελετήθηκαν εναλλακτικές τεχνικές οργάνωσης του υποσυστήματος. Συγκεκριμένα αναλύθηκαν η στρατηγική της σταθερής ανάθεσης οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες και η στρατηγική της ανάθεσης ομάδας οχημάτων μεταφοράς σε γερανογέφυρες ίδιων ή διαφορετικών πλοίων. Οι στρατηγικές αυτές εφαρμόστηκαν σε διάφορα σενάρια σε διαδικασίες εκφόρτωσης πλοίων και σε διαδικασίες ταυτόχρονης φόρτωσης και εκφόρτωσης. Επίσης λήφθηκαν υπόψη αποκλίσεις στους χρόνους κύκλου των γερανογεφυρών και των οχημάτων που μπορεί να προκύψουν και προτάθηκε μέθοδος για την εκτίμηση των αποκλίσεων στους χρόνους κύκλου των οχημάτων μεταφοράς. Προέκυψε ότι η εφαρμογή της στρατηγικής ανάθεσης ομάδας οχημάτων μεταφοράς στις γερανογέφυρες πλεονεκτεί σημαντικά σε ότι αφορά το χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών υπό προϋποθέσεις.

Συγκεκριμένα, σε λιμάνι με κρηπίδωμα μορφής τραπεζίου, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των χώρων στοιβάσεως είναι μικρές, μια στρατηγική ανάθεσης ομάδας οχημάτων στις γερανογέφυρες θα μπορούσε να ολοκληρώνει τις διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης δύο πλοίων κατά μία ώρα νωρίτερα για κάθε εκατό εμπορευματοκιβώτια, σε σχέση με μια στρατηγική σταθερής ανάθεσης των οχημάτων μεταφοράς.

Για την περαιτέρω μελέτη του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η διερεύνηση των παρακάτω:

- Να εξεταστούν και άλλες τεχνικές οργάνωσης του υποσυστήματος, όπως οι λειτουργίες διπλού κύκλου των γερανογεφυρών στο κρηπίδωμα, όπου θα εκφορτώνουν ένα εμπορευματοκιβώτιο από το πλοίο και στον ίδιο κύκλο θα παραλαμβάνουν ένα άλλο εμπορευματοκιβώτιο και θα το φορτώνουν στο πλοίο.
- Να εξεταστούν περιπτώσεις όπου συμβαίνουν απρόβλεπτα προβλήματα, όπως η βλάβη κάποιου οχήματος μεταφοράς ή η άφιξη επιτακτικών πελατών και η ανάγκη για εξυπηρέτηση σύμφωνα με προτεραιότητες.
- Να αναπτυχθούν οι τεχνικές οργάνωσης που εφαρμόστηκαν και σε άλλα λογισμικά προσομοίωσης ή ακόμα και με άλλες τεχνικές της επιχειρησιακής έρευνας (για παράδειγμα με Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό) και να συγκριθούν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα.
- Να γίνει εφαρμογή των τεχνικών οργάνωσης που παρουσιάστηκαν σε πραγματικά δεδομένα λιμανιών και να αναπτυχθούν μοντέλα μεγαλύτερης κλίμακας ώστε συγκρίνοντας τα πραγματικά δεδομένα με τα αποτελέσματα των μοντέλων να πραγματοποιείται επικύρωση (validation) τους και στη συνέχεια αξιολόγηση διάφορων σεναρίων για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Γενική Βιβλιογραφία

Γιαννάτος, Γ. και Ανδριανόπουλος, Σ. (1990), Logistics Μεταφορές-Διανομή, Αθήνα, Εκδόσεις: ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ ΣΕΛΚΑ 4Μ.

Κοκολάκης, Γ. και Σπηλιώτης, Ι. (2010), Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική με Εφαρμογές, Αθήνα, Εκδόσεις: ΣΥΜΕΩΝ.

Σιφνιώτης, Χ. Κ. (1997), Logistics Management Θεωρία και Πράξη, Αθήνα, Εκδόσεις: ΠΑΠΑΖΗΣΗ.

Lambert M.D., Stock R.J., Ellram L.M., (1998), Fundamentals of Logistics Management, Marketing and Advertising Series, Mc Graw Hill International Editions.

Nehrling B.C. (1970), Container Ship Loading and Unloading Simulation, No (080), University of Michigan, College of Engineering.

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

[1] Bastian Solutions, <http://www.bastiansolutions.com>, τελευταία πρόσβαση στις 10/9/2015.

[2] Buiscar, Cargo Solutions, <http://www.buiscar.com/mts.htm>, τελευταία πρόσβαση 10/9/2015.

[3] Edmonds, R. (2010), A new profile at the Port of Savannah, <http://www.racheledmonds.com/blog/category/shipping/>, τελευταία πρόσβαση 10/9/2015.

[4] Horn Logistic Services, <http://www.hornlogistic.com/en/portfolio-item/operations-de-manutention-sur-terminal-rail-route-trr/>, τελευταία πρόσβαση 10/9/2015.

[5] International Marine Consultancy (IMC), (2009), <http://www.imcbrokers.com/blog/overview/detail/malcolm-mclean-the-inventor-of-iso-shipping-containers>, τελευταία πρόσβαση στις 5/9/2015.

[6] Kalmar, <http://www.kalmarglobal.com/equipment/>, τελευταία πρόσβαση 10/9/2015.

[7] KoneCranes, <http://www.konecranes.com/>, τελευταία πρόσβαση 10/9/2015.

[8] Schlub, C., and Gore, M. (2011), A good performance. Port Strategy, insight for senior port executives, <http://www.portstrategy.com/features101/port-operations/port-performance/legal-kpis>, Accessed August 08,2015.

- [9] Simulation tools, http://test.kat-logics.com/?page_id=683 , τελευταία πρόσβαση στις 10/9/2015.
- [10] Terex, <http://www.terex.com/port-solutions/en/>, τελευταία πρόσβαση 10/9/2015.
- [11] Transport Information Service (TIS), http://www.tis-gdv.de/tis_e/containe/inhalt2.htm, τελευταία πρόσβαση 24/9/2015.
- [12] Wikipedia, ISO Container, https://en.wikipedia.org/wiki/Intermodal_container, τελευταία πρόσβαση στις 5/9/2015.
- [13] Wikipedia, Malcom Maclean, https://en.wikipedia.org/wiki/Malcom_McLean, τελευταία πρόσβαση στις 5/9/2015.
- [14] Wikipedia, Terminal Tractor, https://en.wikipedia.org/wiki/Terminal_tractor, τελευταία πρόσβαση 24/9/2015.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [15] Αμπακούμκιν, Κ.Γ. (1990), Μοναδοποιημένα φορτία – συνδυασμένες μεταφορές εμπορευμάτων, Εκδόσεις: Συμμετρία.
- [16] Καρλαύτης Μ.Γ., Λαγαρός Ν.Δ. (2010), Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς, Εκδόσεις: Συμμετρία.
- [17] Κεμετζής, Γ. (2008), Διπλωματική εργασία, Προσομοίωση στη διοίκηση με το λογισμικό Arena, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [18] Μαλιάγκα, Ε. (2014), Διπλωματική εργασία, Ανάπτυξη βάσης δεδομένων για ατυχήματα σύγκρουσης, επαφής και προσάραξης σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [19] Μπαλλής, Α. (1995), Διδακτορική διατριβή, Ανάπτυξη προτύπου για την αναπαράσταση λειτουργιών τερματικής εγκατάστασης διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [20] Ξηροκώστας, Δ. (1990), Επιχειρησιακή έρευνα – Εφαρμοσμένη θεωρία αναμονής, Εκδόσεις: Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων.
- [21] Οικονομική Επιτροπή για την Ευρώπη (Eurostat), Γλωσσάριο για τις στατιστικές των μεταφορών, 4^η Έκδοση.
- [22] Σημειώσεις μαθήματος (2014), Συνδυασμένες μεταφορές – Μοναδοποιημένα φορτία, Μπαλλής, Α.
- [23] Τριπολίτης, Κ. και Τριάντης, Γ., Ναυτική τέχνη – Έκτακτη ανάγκη, Εκδόσεις: Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων.

[24] Τσιτσάμης, Δ. (2009), Διδακτορική διατριβή, Σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων λιμένων: Προσομοιωτικά μοντέλα και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

[25] Altioek, T. and Melamed B., (2007), Simulation modelling and Analysis with Arena, Elsevier Inc.

[26] Arango, C., Cortis P., Mupuzuri J., Onieva L., (2011), Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimization, Advanced Engineering Informatics, vol.25: 452-461.

[27] Assuma, V., Vitetta A., (2006), Microsimulation models in a Ro-Ro high speed services intermodal container terminal: Ordinary and Perturbed conditions, Association for European Transport and Contributors.

[28] Aykagan, Ak., (2008), Berth and quay crane scheduling: Problems, models and solution methods. Thesis, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology.

[29] Ballis, A. (2011), Port terminal and operations: problems and associated modelling approaches, Athens.

[30] Ballis, A., Dimitriou, L., Paravantis, D. (2010), Quay to Storage Container Transfer: A Critical Review of Modelling Techniques and Practical Outcomes. Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

[31] Bartošek, A., Marek, O. (2013), Quay Cranes in Container Terminals, Transaction on Transport Sciences, vol.6(1): 1-10, doi: 10.2478/v10158-012-0027-y.

[32] Bassan, S., (2007), Evaluating seaport operation and capacity analysis-preliminary methodology, Maritime Policy & Management, vol.34: 3-19, doi: 10.1080/03088830601102725.

[33] Bish, E.K. (2003), A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal, European Journal of Operational Research vol.144: 83–107, doi:10.1016/S0377-2217(01)00382-4.

[34] Bose, J., Reiniers, T., Steenken, D., and Voss, S. (2000), Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, Piscataway, doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/HICSS.2000.926669.

[35] Bose, K., (2002), Basic Queueing Theory, M/M/-/- Type Queues.

- [36] Chapman, R. and Jackson, R.R.P. (1964), Operational research studies of port operation, *Progress in Cargo Handling Research*, vol.4: 143-166.
- [37] Chen L., Bostel N., Dejax P., Cai J., and L. Xi, (2007), A Tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal, *European Journal of Operational Research*, vol.181: 40-58.
- [38] Dekker, R., Voogd, P. and Asperen, E. (2006), Advanced methods for container stacking, *OR Spectrum*, vol.28: 563–586, doi: 10.1007/978-3-540-49550-5_7.
- [39] Dorokhov, A. (1999), Simulation simple models and comparison with queueing theory.
- [40] Dragovic, B., Park, N.K., Radmilović, Z. (2006), Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches, *Maritime Policy & Management*, vol.33: 281-299, doi: 10.1080/03088830600783277.
- [41] Edmond, E. and Maggs, R. (1978), How useful are queue models in Port investment decisions for container berths?, *J.Opl.Res.Soc*, vol.29 (8): 741-750.
- [42] Frankel, E.G. (1980), Container System Selection, The 2nd Terminal Operations Conference, Cargo Systems Publications, U.S.A.
- [43] Froyland, G., Koch, T., Megow, N., Duane, E., and Wren, H. (2008), Optimizing the landside operation of a container terminal, *OR Spectrum*, vol.30: 53-75 doi: 10.1007/s00291-007-0082-7.
- [44] Garrido, R.A., Allendes, F. (2002), Modeling the internal transport system in a container port, *Transportation Research Record*, 1782, pp. 84-91, doi:10.3141/1782-10
- [45] Golias, M., Boile, M., Theofanis, S. (2007), The Berth Allocation Problem: A formulation reflecting service delay penalties and early premiums, *Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- [46] Goodchild, A.V. (2005), Crane Double Cycling in Container Ports: Algorithms, Evaluation and Planning, PhD dissertation, Berkeley, University of California, doi:10.1016/j.trb.2007.02.006.
- [47] Hansen, P., Oguz, C., Mladenovic. N. (2008), Variable neighbourhood search for minimum cost berth allocation, *European Journal of Operational Research*, vol.131(3): 636-649.
- [48] Hatzitheodorou, G.C. (1983), Gate Requirements for Intermodal Facilities, *Transportation Research Record*, Issue 907, pp. 52-57. ISSN: 0361-1981.
- [49] Holland, J., (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.

- [50] Hua-An, Lu and Jing-Yi, Jeng (2005), Modeling and Solution for Yard Truck Dispatch Planning at Container Terminal, *Operations Research*, pp. 117-122.
- [51] Huynh, N., and Walton, C.M. (2004), A selection model for in-terminal container handling systems, *Journal of Marine Science and Technology*, vol.12(3): 159-170.
- [52] Imai, A., K., Sasaki, E., Nishimura and S. Papadimitriou, (2006), Multi – Objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks, *European Journal of Operational Research*, vol.171: 373-389.
- [53] John D.C. Little, (1961), A Proof for the Queueing Formula " $L=\lambda*W$ ", *Operations Research*, vol.9 (3): 383-387.
- [54] Kelton, W. D., Sadowski, R. P., Sturrock, D.T. (2004), *Simulation with Arena*, Third Edition, McGraw Hill.
- [55] Kendal, D.G., (1964), Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of Imbedded Markov Chains, *Annals of Mathematical Statistics*, vol.24: 338-354.
- [56] Kim, Y., Kim K.H. (1999), A routing algorithm for a single straddle carrier to load export containers onto a containership, *Int. J. Production Economics*, vol.59: 425-433.
- [57] Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi (1983), Optimization by Simulated Annealing, *Science, New Series*, vol.220 (4598): 671-680, doi: 10.1126/science.220.4598.671.
- [58] Kozan, E. and P. Preston, (1999), Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals, *International Transactions in Operations Research*, vol.6: 311-329.
- [59] Kozan, E., (2003), *Container transfer logistics at multimodal container terminals*, Australia.
- [60] Lam, L. (1988), Selecting container handling equipment for growth, Presented in Terminal Operators Conference, June 1988, Marseille, France.
- [61] Land, A. H., and Doig, A. G. (1960), An automatic method of solving discrete programming problems, *Econometrica* vol.28(3): 497-520.
- [62] Lau, H., and Y. Zhao, (2008), Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals, *International Journal of Production Economics*, vol.112: 665-682, doi:10.1016/j.ijpe.2007.05.015.
- [63] Legato, P. and Mazza, R. (2001), Berth Planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation, *European Journal of Operational Research*, vol:133, doi:10.1016/S0377-2217(00)00200-9.

- [64] Lu, H.A. and J.Y. Jeng, (2006), Modeling and Solution for Yard Truck Dispatch Planning at Container Terminal, Operations Research Proceedings 2005, Springer Berlin, pp. 117-122.
- [65] Meersmans, P. J. M. (2002), Optimization of container handling systems, Ph.D. Thesis, Tinbergen Institute 271, Erasmus University Rotterdam.
- [66] Ng, W.C. and K.L. Mak (2005), Yard Crane scheduling in port container terminals, Applied Mathematical Modelling, vol.29: 263-276.
- [67] Notteboom, T., Rodrigue, J.P., (2009), Inland terminals, Regions, and Supply Chains, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific.
- [68] Notteboom, Th.E. (2006), The time factor in liner shipping services, Maritime Economics and Logistics, vol.8: 10-39, doi:10.1057/palgrave.mel.9100148.
- [69] Pace, D.K. (2004), Modelling and Simulation Verification and Validation Challenges, Johns Hopkins Applied Technical Digest, vol.25 (2).
- [70] Pallis, A., PW De Langen, Vitsounis, Th. (2007), Port Research: Themes and methods in port economics management and policies, Paper presented at the: 11th World Conference on Transport Research (proceedings: CD-Rom format), Berkley CA, US.
- [71] Park, M.Y., Kim, H.K.A., (2003), Scheduling method for berth and quay cranes, OR Spectrum, vol.25: 1-23.
- [72] Park, N.K., Dragovic B. and J.Y. Kim, (2009), Dynamic Equipment Deployment at a Container Terminal: Transfer system based on real time positioning, Journal of Mechanical Engineering, vol.55 (2).
- [73] Pendel, Palmer and Tritton, Consulting and Designing Engineers, The Computer Simulation of Container Operations, London.
- [74] Petering, M., (2011), Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability and scalability issues at sea port container terminals, Transportation Research, pp. 85-103, doi: 10.1016/j.tre.2010.07.007.
- [75] Saanen, Y., and M. Valkengoed, (2005), Comparison of three automated stacking alternatives by means of simulation, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, pp.1567-1576.
- [76] Sameer, S.S. (2014), Simulation: Analysis of Single Server Queueing Model, International Journal on Information Theory, vol.3 (3).
- [77] Shahpanaha, A., Hashemia A., Nouredinb G., Zahraeea S.M., Helmia S.A., (2014), Reduction of Ship Waiting Time at Port Container Terminal Through Enhancement of the Tug/Pilot Machine Operation, Journal of Technology, vol.68: 63-66.

- [78] Shammoon, A., (2009), Simulation and Analysis of Port Bottlenecks: The Case of Male, Thesis, Lincoln University.
- [79] Sheikholeslami A., Gholamreza I., Hassannayebi E., (2013), A Simulation Model for the Problem in Integrated Berth and Quay Crane Assignment, Journal of Basic and Applied Scientific Research, vol.3 (8): 343-354.
- [80] Solomenikovs, A., (2006), Simulation Modelling and Research of Marine Container Terminal Logistics Chains, Case Study of Baltic Container Terminal, Doctoral Thesis.
- [81] Soriguera, F., Robuste F., Juanola R., and A. Lopez-Pita, (2006), Handling equipment optimization in the container terminal of the Port of Barcelona, Transportation Research Board of the National Academies.
- [82] Stahlbock, R., and Voss, S. (2008), Vehicle Routing Problems and Container Terminal Operations - An Update of Research. In: B. Golden, S. Raghavan, E. Wasil (Eds.): The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, Springer US, pp: 551-589, doi: 10.1007/978-0-387-77778-8_25.
- [83] Steeken, D., S. Voss, and R. Stahlbock, (2004), Container terminal operation and operations research – A classification and literature review, OR Spectrum, vol.26: 3-49.
- [84] Strauss, A-Wieder Inc, (2002), Intermodal access to us ports: report on survey findings, Report prepared for U.S., Department of Transportation, U.S. Maritime Administration, Office of Intermodal Development.
- [85] Sztrik, J., (2012), Basic Queueing Theory, University of Debrecen, Faculty of Informatics.
- [86] Tahar, R.M., Hussain K., (2000), Simulation and Analysis for the Kelang Container Terminal operations, Logistics Information Management, vol.13 (1): 14-20.
- [87] Taleb-Ibrahimi, M., Castilho B.D., and Daganzo, C.F. (1993), Storage space vs. handling work in container terminals, Transportation Research B, vol.27 (1): 13–32. [doi:10.1016/0191-2615\(93\)90009-Y](https://doi.org/10.1016/0191-2615(93)90009-Y).
- [88] Theofanis, S., Boile, M., Golias, M.M. (2009), Container Terminal Berth Planning: Research Approaches and Practical Challenges – A Critical Review, Proceedings of the 88th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C.
- [89] Tsai, J. (2010), Maximizing Port and Transportation System Productivity by Exploring Alternative Port Operation Strategies: Report 09-03, Georgia Transportation Institute, University Transportation Center.

- [90] Tsitsamis, D., Vlachos D., Truck Operations Planning at a Container Terminal, 1st Olympus International Conference On Supply Chains, Katerini, Greece.
- [91] UNCTAD (1985), Port Development, A Handbook for Planners in Developing Countries, United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, Second Edition, United Nations, New York.
- [92] UNCTAD (2014), Review of Maritime Transport, Nations Conference on Trade and Development, United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, United Nations, New York.
- [93] Vis, I.F.A. (2006), A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal, International Journal of Production Economics, vol.103: 680-693, [doi:10.1016/j.ijpe.2006.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.01.002)
- [94] Vis, I.F.A., Harika, I. (2004), Comparison of vehicles types at an automated container terminal, OR Spectrum, vol.26: 117-143.
- [95] Yang, C., Choi, Y., and T. Ha (2004), Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals, OR Spectrum, vol.26(2): 149-170, doi: 10.1007/s00291-003-0151-5.
- [96] Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.W., Murty, K. and Linn, R. (2003), Storage space allocation in container terminals, Transportation Research Part B, vol.37: 883–903, [doi:10.1016/S0191-2615\(02\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00089-9).
- [97] Zhang, H., and Kim, K., (2009), Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals, Computers and Industrial Engineering vol.56: 979–992, [doi:10.1016/j.cie.2008.09.008](https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.008).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Το σύστημα των εμπορευματοκιβωτίων

Η μοναδοποίηση των φορτίων είναι μια εξαιρετικά απλή ιδέα, που αναφέρεται στις διάφορες μεθόδους με τις οποίες πολλά αντικείμενα (είτε μικρού μεγέθους, είτε μεγάλου μεγέθους αλλά που παρουσιάζουν δυσχέρειες στο χειρισμό τους) μπορούν να ενωθούν και να μεταφερθούν ως μια μονάδα. Σκοπός της μοναδοποίησης είναι η απλοποίηση της διαδικασίας μεταφοράς (συσκευασία, μετακίνηση, φορτοεκφόρτωση) και άρα η ελάττωση του κόστους μεταφοράς, ιδιαίτερα εκείνου που αναφέρεται στις διαδικασίες στις περιοχές των συγκοινωνιακών κόμβων. Τέτοιες μέθοδοι μεταφοράς οδήγησαν στην κατασκευή μεταφορικών μονάδων που χωρίς να είναι αυτοκινούμενες (τουλάχιστον δεν είναι απαραίτητο) εξασφαλίζουν με την πιο απλή (και φθηνή) διαδικασία φορτοεκφόρτωσης και αποθήκευσης και με την κατά το εφικτό καλύτερη προστασία του εμπορεύματος, την μεταφορά του εμπορεύματος. Συγχρόνως επιχειρείται και σε σοβαρό ποσοστό επιτυγχάνεται, η μεταφορά «θύρα προς θύρα» (door to door) δηλαδή η μεταφορά από την ακριβή θέση προέλευσης στην ακριβή θέση προορισμού, χωρίς καμιά ενδιάμεση διαδικασία φορτοεκφόρτωσης του εμπορεύματος, αλλά μόνο της μεταφορικής μονάδας. Οι συνδυασμένες μεταφορές στην Ευρώπη πραγματοποιούνται με χρήση τεσσάρων συστημάτων μεταφοράς φορτίων: το σύστημα των εμπορευματοκιβωτίων ISO, το σύστημα των χερσαίων εμπορευματοκιβωτίων (inland containers), το σύστημα των κινητών αμαξωμάτων (swap bodies) και το σύστημα μεταφοράς με ημι-ρυμουλκούμενα (semi-trailers).

Σήμερα, τα εμπορευματοκιβώτια είναι η κυρίαρχη μονάδα των θαλάσσιων μεταφορών στον κόσμο. Το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο με τη σημερινή μορφή, χρησιμοποιήθηκε το 1933 για χερσαία μεταφορά και επινοήθηκε από τον Αμερικανό Malcolm Mclean, ο οποίος θεωρείται «Πατέρας των εμπορευματοκιβωτίων»^[5]. Ο Malcolm Mclean είχε την ιδέα για την απλοποίηση της μεταφοράς εμπορευμάτων, αποφεύγοντας τη συνεχή φόρτωση και εκφόρτωση από το ένα μέσο μεταφοράς στο άλλο, αλλά και μειώνοντας το χρόνο που χρειάζεται για τη μεταφορά. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου κατάφερε να παρακάμψει τα όποια προβλήματα και σκέφτηκε να φορτώνει στα πλοία το ρυμουλκούμενο μέρος των φορτηγών μαζί με το εμπορευματοκιβώτιο και αργότερα μόνο το εμπορευματοκιβώτιο. Οι εφοπλιστές της εποχής ήταν πολύ επιφυλακτικοί με την ιδέα του Malcolm Mclean. Το γεγονός αυτό τον ώθησε να γίνει ο ίδιος εφοπλιστής και η εταιρία του ονομάστηκε Sea – Land A.E. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 ο Malcolm Mclean πώλησε την εταιρία του στην ναυτιλιακή εταιρία Maersk, αλλά το όνομα της εταιρίας ζει στο όνομα Maersk Sealand. Αν και η εμφάνιση του εμπορευματοκιβωτίου στις θαλάσσιες μεταφορές έγινε περί το 1956 στις ΗΠΑ, στην Ευρώπη εμφανίστηκε μια δεκαετία αργότερα. Περί το 1966 ξεκίνησε η μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων από την Νέα Υόρκη στη Γερμανία στο Bremer, στην Ολλανδία στο Rotterdam και στη Σκωτία στο Grangemouth. Περί το 1967 έφτασε η μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων στο Βιετνάμ ενώ το 1968 η μεταφορά εξαπλώθηκε στο Χονγκ Κόνγκ και στη Ταϊβάν και το 1969 στη Σιγκαπούρη, στη Ταϊλάνδη και στις Φιλιππίνες το 1971^[1]. Οι εφοπλιστές στην Ευρώπη και Ιαπωνία αναγνώρισαν γρήγορα τα πλεονεκτήματα του εμπορευματοκιβωτίου και άρχισαν να επενδύουν στη νέα τεχνολογία μεταφοράς.

Από την έναρξη της μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μέσω των θαλάσσιων μεταφορών, η πρόοδος και η συμβολή στη ναυτιλία και στο παγκόσμιο εμπόριο είναι τεράστια.

Ειδικότερα, η χρήση του εμπορευματοκιβωτίου παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα^[24]:

- *Ενιαία μεταφορική μονάδα.* Τα εμπορευματοκιβώτια συγκεντρώνουν σε μια μεταφορική μονάδα το φορτίο, που προηγουμένως αποτελείτο από ένα πλήθος μικρών ή μεγαλύτερων εμπορευμάτων.
- *Χειρισμός.* Καθώς το φορτίο είναι μοναδοποιημένο, ο χειρισμός γίνεται ευκολότερος και γρηγορότερος, με αποτέλεσμα να μειώνεται εντυπωσιακά ο χρόνος φόρτωσης και εκφόρτωσης.
- *Συσκευασία φορτίου.* Η προστασία που παρέχεται από τα εμπορευματοκιβώτια στο φορτίο μειώνει σημαντικά τις ανάγκες της συσκευασίας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η δυνατότητα για μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων φορτίου.
- *Οικονομία χώρου.* Η ταξινόμηση του φορτίου μέσα στο εμπορευματοκιβώτιο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του διαθέσιμου χώρου αποθήκευσης ενός πλοίου, βαγονιού ή φορτηγού. Η βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου συνεπάγεται οικονομικότερη μεταφορά.
- *Ασφάλεια φορτίου.* Το μέγεθος και το βάρος των εμπορευματοκιβωτίων καθιστούν δυσχερέστερη την κλοπή των εμπορευμάτων.
- *Προστασία φορτίου.* Τα τοιχώματα και η μόνωση του εμπορευματοκιβωτίου παρέχουν κάλυψη στο φορτίο από τις καιρικές και άλλες δυσμενείς συνθήκες, αλλά και από ζημιές και φθορές κατά τη μεταφορά και ιδιαίτερα κατά την φορτοεκφόρτωση.
- *Μείωση γραφειοκρατίας.* Η μοναδοποίηση του φορτίου μειώνει τη γραφειοκρατία, καθώς συνεπάγεται τη χρήση ενός μόνο εγγράφου, που αφορά το σύνολο του περιεχομένου του εμπορευματοκιβωτίου, ως μονάδα, και όχι τη χρήση της σειράς των εγγράφων που αναφέρονται σε καθένα από τα προϊόντα, σε περίπτωση που αυτά μεταφέρονται μεμονωμένα. Δεδομένου, όπως είναι γνωστό, ότι κάθε πράξη μεταφοράς εμπεριέχει μια σειρά διαδικασιών, είναι αυτονόητο ότι η χρήση εμπορευματοκιβωτίου συνεπάγεται πολλαπλασιαστικό όφελος.
- *Κόστος ασφάλισης.* Η μείωση του κόστους ασφάλισης αποτελεί ένα επιπλέον πλεονέκτημα που προκύπτει από τη μοναδοποίηση του φορτίου κατά τη χρήση εμπορευματοκιβωτίου. Οι μεταφορικές εταιρίες ασφαλίζουν, κατά κανόνα, τα εμπορευματοκιβώτια με κόστος χαμηλότερο από το αθροιστικό κόστος ασφάλισης των περιεχομένων προϊόντων.

Το εμπορευματοκιβώτιο αρχικά, είναι ένα κανονικό κιβώτιο που προορίζεται για μεταφορά εμπορευμάτων. Όμως το υλικό κατασκευής του και αυτή η ίδια κατασκευή του πρέπει να πληροί ορισμένα πρότυπα αντοχής και ασφάλειας, μια και το εμπορευματοκιβώτιο προορίζεται για πολλές χρήσεις και για σημαντική διάρκεια ζωής. Συγκεκριμένα το εμπορευματοκιβώτιο κατά την ISO (International Standards Organization) είναι η μονάδα μεταφοράς που:

- Έχει χαρακτηριστικό τη διάρκεια και αντέχει να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές (5 περίπου χρόνια για τα εμπορευματοκιβώτια από χάλυβα, 5-6 χρόνια για τα εμπορευματοκιβώτια από χαλύβδινο σκελετό και 10 χρόνια για τα εμπορευματοκιβώτια από ανοξείδωτο χάλυβα).
- Είναι ειδικά κατασκευασμένο να διευκολύνει τη μεταφορά εμπορευμάτων με ένα ή περισσότερα μέσα μεταφοράς, χωρίς να διακόπτεται η φόρτωση του εμπορεύματος (στο εμπορευματοκιβώτιο), και έχει κατάλληλη εξάρτηση που διευκολύνει το χειρισμό του, κυρίως όταν αλλάζει μεταφορικό μέσο.
- Φέρει κατάλληλα ανοίγματα για εύκολο γέμισμα και άδειασμα.
- Έχει ωφέλιμο εσωτερικό χώρο τουλάχιστον 10m².

Επειδή στόχος είναι το εμπορευματοκιβώτιο να μπορεί εύκολα να μεταφερθεί με πλωτά μέσα, με σιδηρόδρομο και με οδικά οχήματα, οι διαστάσεις του έχουν προσαρμοσθεί κατάλληλα. Το πλάτος του ανταποκρίνεται στα μέγιστα πλάτη των οδικών οχημάτων. Το μήκος του ανταποκρίνεται στο μήκος ή υποπολλαπλάσιο του μήκους συνήθων σιδηροδρομικών οχημάτων και αντιστοιχεί προς αποδεκτά μήκη οδικών οχημάτων. Τέλος, το ύψος του αντιστοιχεί στα κατασκευαστικά ύψη των οχημάτων και τα διεθνή περιτυπώματα των σταθερών εμποδίων.

Η διεθνής οργάνωση τυποποίησης (International Standards Organization, ISO) έχει δεχτεί τις εξής μέγιστες εξωτερικές διαστάσεις:

- μήκος έως 40ft (12,192m)
- ύψος έως 8 ½ ft (2,591m)
- πλάτος έως 8ft (2.438m)

Η μέτρηση εμπορευματοκιβωτίων διαφορετικού μήκους έχει επικρατήσει να ανάγεται σε μονάδες των 20ft (TEU) με βάση το μήκος. Το 90% των εμπορευματοκιβωτίων που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως είναι τα εμπορευματοκιβώτια των 20ft και των 40ft (1ft=33cm). Παρ' όλα αυτά, οι ΗΠΑ και ο Καναδάς χρησιμοποιούν και εμπορευματοκιβώτια μεγαλύτερου μήκους, δηλαδή εμπορευματοκιβώτια των 45ft (13.7m), 48ft (14.6m), και 53ft (16.15m)^[12].

Οι τύποι εμπορευματοκιβωτίων όπως ορίζονται στο ISO Standards Handbook on Freight Containers είναι οι εξής:

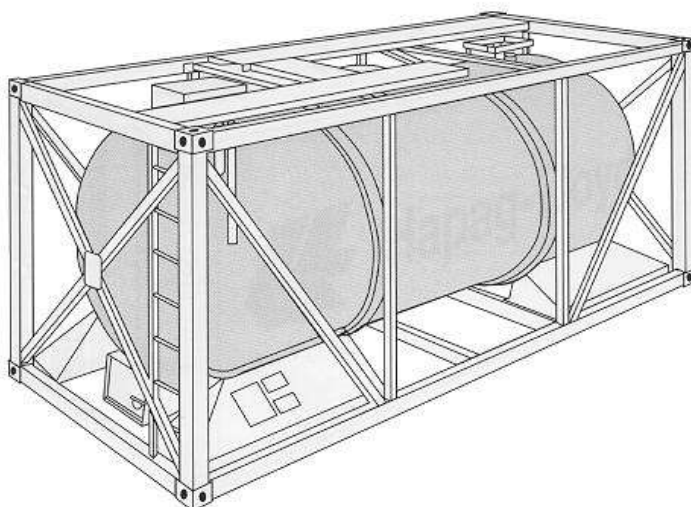
- Τα εμπορευματοκιβώτια γενικού σκοπού (Εικόνα A-1)
- Τα εμπορευματοκιβώτια ειδικού σκοπού (ανοιχτής οροφής, κλειστά αεριζόμενα, πλατφόρμας κλπ) (Εικόνα A-2)
- Τα εμπορευματοκιβώτια ειδικού φορτίου (θερμικά, ψυγεία, υγρού χύδην φορτίου κλπ) (Εικόνα A-3)



Εικόνα Α- 2: Εμπορευματοκιβώτιο γενικού σκοπού. Πηγή: [11]



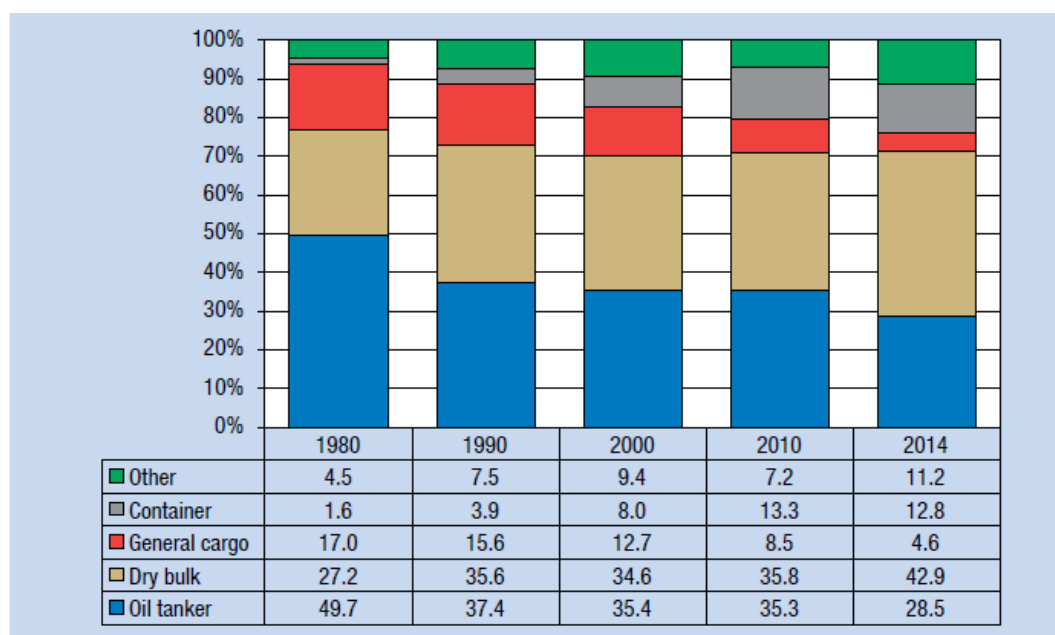
Εικόνα Α- 3: Εμπορευματοκιβώτιο ανοιχτής οροφής. Πηγή: [11]



Εικόνα Α- 1: Εμπορευματοκιβώτιο υγρού χύδην φορτίου. Πηγή: [11]

Η τεράστια βιομηχανική ανάπτυξη, στην οποία οφείλεται η μεγάλη ποικιλία των βιομηχανικών προϊόντων έφερε ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των πλοίων σε πολλές κατηγορίες και τύπους. Τα προϊόντα αυτά μπορεί να είναι πρώτες ύλες, υλικά λειτουργίας και συντήρησης (καύσιμα κτλ.) των βιομηχανικών μονάδων και βέβαια τα παραγόμενα προϊόντα που προορίζονται για το εμπόριο και τη τελική κατανάλωση τους από τον άνθρωπο. Είναι επομένως λογικό ότι, για την μεταφορά των φορτίων που ενδεικτικά αναφέρθηκαν χρειάζεται και ένας διαφορετικός τύπος πλοίου. Τα πλοία λοιπόν που χρησιμοποιούνται στις θαλάσσιες μεταφορές, για τη μεταφορά φορτίων, είναι τα φορτηγά πλοία (cargo ships). Τα φορτηγά πλοία διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου (dry cargoes ships) και στα φορτηγά υγρού φορτίου (oil/liquid ships)^[23]. Τα πλοία ξηρού φορτίου διακρίνονται με τη σειρά τους στα πλοία γενικού φορτίου (general cargo), στα πλοία ομοειδών φορτίων (bulk carrier) και στα φορτηγά γραμμής (cargo liners). Τα πλοία ομοειδών φορτίων (bulk carrier) μπορεί να μεταφέρουν τσιμέντο, σιδηρομεταλλεύματα, λιπάσματα ή άλλα γενικής χρήσης φορτία. Τα φορτηγά πλοία γραμμής (cargo liners) μπορεί να μεταφέρουν παλέτες (pallet ship), εμπορευματοκιβώτια (Ro-Ro ships, Lo-Lo ships), ή αυτοκίνητα (car carrier). Τα πλοία υγρού φορτίου (oil/liquid ships) διακρίνονται στα δεξαμενόπλοια πετρελαίου (crude oil carrier), στα υγραεριοφόρα (Υγραεριοφόρα φυσικού αερίου, Liquified Natural Gas – LPG και Υγραεριοφόρα πετρελαϊκού αερίου, Liquified Petroleum Gas – LNG) και στα οινόφορα (Alcohol tanker). Τα δεξαμενόπλοια πετρελαίου (crude oil carrier) μεταφέρουν προϊόντα πετρελαίου αλλά και χημικά φορτία. Τα υγραεριοφόρα πλοία (LPG και LNG) μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια.

Μετά από μια ετήσια αύξηση 4,1% το 2013, ο παγκόσμιος στόλος ανήλθε στα 1,69 εκατομμύρια τόνους «νεκρού βάρους» (χωρητικότητα εκτοπίσματος, dead weight tonnage – dwt) τον Ιανουάριο του 2014. Τα πλοία ομοειδών φορτίων (bulk carrier) αντιπροσώπευαν το 42,9% της συνολικής χωρητικότητας, ακολούθως τα δεξαμενόπλοια πετρελαίου (crude oil carrier) το 28,5% και τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (containerships) αντιπροσώπευαν το 12,8%.



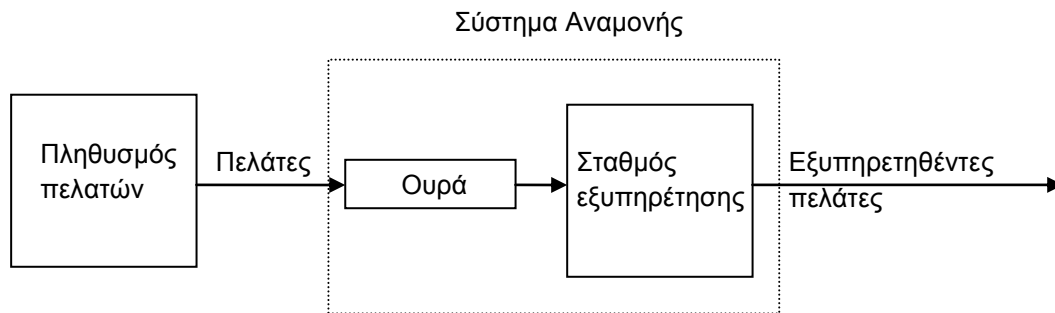
Εικόνα Α- 4: Παγκόσμιος στόλος από τους κύριους τύπους πλοίων, 1980-2014 (σε ποσοστό dwt). Πηγή: [92]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Θεωρία αναμονής

Οι ουρές (queues) ή γραμμές αναμονής (waiting lines) είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο, που δημιουργείται όταν η τρέχουσα ζήτηση για μια εξυπηρέτηση είναι μεγαλύτερη από την τρέχουσα δυναμικότητα του συστήματος, που παρέχει την εξυπηρέτηση. Οι αποφάσεις που έχουν σχέση με τον προσδιορισμό της δυναμικότητας είναι πολλές φορές δύσκολες, επειδή είναι συχνά αδύνατο να προβλέψουμε επακριβώς πότε θα αφιχθούν οι μονάδες στο σύστημα για να εξυπηρετηθούν και πόσος χρόνος θα χρειασθεί για την εξυπηρέτησή τους. Η ύπαρξη στο σύστημα μεγαλύτερης δυναμικότητας από αυτή που χρειάζεται, θα απαιτήσει μεγαλύτερο κόστος. Έτσι αντικειμενικός σκοπός είναι να βρεθεί μια οικονομική ισορροπία μεταξύ του κόστους εξυπηρέτησης και του κόστους που συνδέεται με την αναμονή για αυτή την εξυπηρέτηση. Η θεωρία αναμονής δεν λύνει το πρόβλημα αυτό άμεσα, όμως δίνει την πληροφόρηση που χρειάζεται για μια τέτοια απόφαση, με το να προσδιορίζει τα διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος^[20].

Η θεωρία αναμονής παρέχει ένα μεγάλο αριθμό μαθηματικών προτύπων για την περιγραφή των καταστάσεων των γραμμών αναμονής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά από τα πιο βασικά πρότυπα.

Το απλούστερο σύστημα αναμονής είναι εκείνο που ακολουθεί την εξής διαδικασία : πελάτες που πρόκειται να εξυπηρετηθούν δημιουργούνται από ένα *πληθυσμό πελατών*, εισέρχονται σ' ένα *σύστημα αναμονής* και ακολουθούν μια *ουρά*. Ο πελάτης εξυπηρετείται από ένα *σταθμό εξυπηρέτησης* και μετά φεύγει από το σύστημα αναμονής. Το σύστημα αυτό αναπαριστάται στο ακόλουθο Σχήμα Β-1.



Σχήμα Β- 1: Σύστημα αναμονής ενός σταθμού εξυπηρέτησης. Πηγή: [20]

Ένα βασικό σύστημα αναμονής προσδιορίζεται από έξι χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία είναι^[22]:

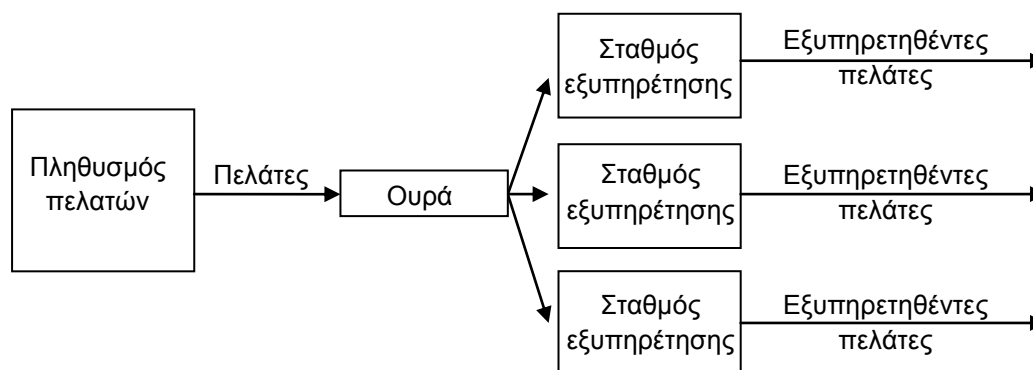
1. Κατανομή αφίξεων (arrival distribution)
2. Κατανομή εξυπηρετήσεων (service distribution)
3. Αριθμός παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης του συστήματος εξυπηρέτησης
4. Νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησης των πελατών (service discipline)
5. Μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής
6. Μέγεθος πηγής προέλευσης των πελατών

Η κατανομή των αφίξεων μπορεί να εκφρασθεί είτε σαν κατανομή του αριθμού των αφικνουμένων πελατών στην μονάδα του χρόνου, οπότε έχουμε κατανομή διακριτής τυχαίας μεταβλητής, είτε σαν κατανομή των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων, οπότε έχουμε κατανομή συνεχούς τυχαίας μεταβλητής. Αντίστοιχα και η κατανομή εξυπηρετήσεων μπορεί να εκφρασθεί ως διακριτή κατανομή ή ως τυχαία κατανομή. Μπορεί να γίνει η διάκριση δυο ακραίων περιπτώσεων στην κατανομή αφίξεων και εξυπηρετήσεων και είναι οι εξής :

- Σταθερές αφίξεις ή εξυπηρετήσεις, δηλαδή τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών αφίξεων ή τα χρονικά διαστήματα εξυπηρετήσεων σταθερά.
- Εντελώς τυχαίες αφίξεις και εξυπηρετήσεις οι οποίες θα εκφραστούν στη συνέχεια με την κατανομή *Poisson*, όταν πρόκειται για την κατανομή των αφικνουμένων ή εξυπηρετημένων πελατών στη μονάδα του χρόνου, και από την αρνητική εκθετική κατανομή, όταν πρόκειται για την κατανομή των χρονικών διαστημάτων μεταξύ αφίξεων ή των χρονικών διαστημάτων εξυπηρετήσεων. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη Θεωρία Αναμονής.

Μεταξύ των δύο ακραίων περιπτώσεων μπορούν να υπάρξουν αφίξεις ή εξυπηρετήσεις που ακολουθούν διάφορες κατανομές πιθανότητας, είτε εκφραζόμενες μαθηματικά, είτε όχι.

Ο αριθμός παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης του συστήματος εξυπηρέτησης αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του συστήματος. Η εξυπηρέτηση κάθε πελάτη αρχίζει και τελειώνει στον ίδιο σταθμό. Η μορφή του απεικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα Β-2.



Σχήμα Β- 2: Σύστημα αναμονής πολλών παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης. Πηγή: [20]

Ο νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησης των πελατών είναι ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται οι πελάτες στην ουρά για να εξυπηρετηθούν. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι εξυπηρέτησης είναι οι εξής :

- Εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (First In – First Out, FIFO). Είναι η πιο συνηθισμένη πειθαρχία η οποία μπορεί να παρατηρηθεί στην καθημερινότητα μας, κατά την οποία ο πρώτος πελάτης που φτάνει στο σύστημα εξυπηρετείται πρώτος.
- Εξυπηρέτηση με αντίστροφη προτεραιότητα (Last In – First Out, LIFO). Ο τρόπος αυτός εξυπηρέτησης συνηθίζεται σε βιομηχανικά προβλήματα, κατά τον οποίο ο πελάτης που φτάνει τελευταίος εξυπηρετείται πρώτος.
- Τυχαία εξυπηρέτηση (Service In Random Order, SIRO). Ο τρόπος αυτός εξυπηρέτησης συναντάται επίσης σε βιομηχανικά προβλήματα κυρίως, κατά τον οποίο οι πελάτες επιλέγονται με τυχαία σειρά προκειμένου να εξυπηρετηθούν.
- Ουρές με προτεραιότητες (Priority Queues). Στην εξυπηρέτηση με προτεραιότητες μια κατηγορία πελατών παίρνει προτεραιότητα από άλλη κατηγορία πελατών, που ήδη περιμένουν στην σειρά αναμονής.

Ωστόσο, μπορεί να παρουσιαστεί και μη τυποποιημένη συμπεριφορά των πελατών (GD). Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να περιγραφεί από ιδιομορφίες όπως:

- μη προσχώρηση στην σειρά αναμονής όταν είναι μεγάλη (balking)
- προσχώρηση στην σειρά αναμονής αλλά αποχώρηση όταν ο χρόνος αναμονής υπερβεί μια τιμή (reneging)
- άφιξη των πελατών κατά ομάδες (bulk arrivals)

Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός πελατών στο σύστημα καθώς και ο αριθμός των αφικνουμένων πελατών μπορεί να είναι απερίοριστος ή περιορισμένος και αυτό εξαρτάται από το σχεδιασμό του συστήματος.

Συμβολική παράσταση συστημάτων αναμονής

Τα συστήματα αναμονής ακολουθούν ένα συγκεκριμένο συμβολισμό, ο οποίος προτάθηκε από τον David George Kendall (1964)^[55], έτσι ώστε να υπάρξει μια κοινή “γλώσσα” αναφοράς για όλους. Προτάθηκε η μορφή $a/b/c$, όπου το a παριστάνει την κατανομή αφίξεων, το b την κατανομή εξυπηρέτησεων και το c τον αριθμό των παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης. Αργότερα το 1966 ο A.Lee πρόσθεσε δυο ακόμα χαρακτηριστικά τα d, e και το 1971 ο H.Taha πρόσθεσε και ένα έκτο χαρακτηριστικό το f . Το d παριστάνει το νόμο προτεραιότητας των πελατών στο σύστημα αναμονής, το e παριστάνει τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό πελατών στο σύστημα αναμονής και το f παριστάνει το μέγεθος της πηγής προέλευσης των πελατών. Η τελική μορφή του συμβολισμού είναι $(a/b/c) : (d/e/f)$ και τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται για να το περιγράψουν δίνονται στον Πίνακα B-1.

Πίνακας Β- 1: Συμβολισμός των συστημάτων αναμονής. Πηγή: [55]

Χαρακτηριστικά	Σύμβολο	Ερμηνεία
Κατανομή αφίξεων (a)	M	Poisson
	D	Κανονική
	Ek	Erlang παραμέτρου k
	G	Γενική
Κατανομή εξυπηρετήσεων (b)	M	Εκθετική
	D	Κανονική
	Ek	Erlang παραμέτρου k
	G	Γενική
Αριθμός παράλληλων σταθμών εξυπηρέτησης (c)	1,2,...,∞	Αριθμός σταθμών εξυπηρέτησης
Νόμος προτεραιότητας στο σύστημα αναμονής (d)	FIFO	Εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης
	LIFO	Εξυπηρέτηση με αντίστροφη προτεραιότητα
	SIRO	Τυχαία εξυπηρέτηση
	PRI	Ουρές με προτεραιότητα
	GD	Συμπεριφορά μη τυποποιούμενη
Μέγιστη δυνατότητα συστήματος (e) , (f)	1,2,...,∞	Αριθμός πελατών

Ορολογία και Συμβολισμοί

Στην θεωρία αναμονής χρησιμοποιείται η εξής ορολογία:

- λ = μέσος ρυθμός αφίξεων (mean arrival rate)
- $1/\lambda$ = μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων (expected or mean interarrival time)
- μ = μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης (mean service rate)
- $1/\mu$ = μέσος χρόνος εξυπηρέτησεων (expected or mean service time)
- ρ = πυκνότητα κυκλοφορίας (traffic intensity)
- U = βαθμός χρησιμοποίησης των σταθμών εξυπηρέτησης (utilization factor)

Για να ισχύουν η θεωρία και οι τύποι που παρουσιάζονται στη συνέχεια θα πρέπει το σύστημα αναμονής να βρίσκεται σε ισορροπία. Δηλαδή θα πρέπει ο βαθμός χρησιμοποίησης να είναι μικρότερος της μονάδας ($U < 1$) ή ο ρυθμός αφίξεων να είναι μικρότερος του ρυθμού εξυπηρέτησης που έχουν οι σταθμοί εξυπηρέτησης ($\lambda < \mu$). Όταν ένα σύστημα έχει αρχίσει να λειτουργεί πρόσφατα, η κατάσταση του συστήματος θα επηρεαστεί σημαντικά από την αρχική κατάσταση και το σύστημα τότε βρίσκεται σε *μεταβατική κατάσταση* (transient conditions). Με την πάροδο του χρόνου όμως, το σύστημα γίνεται ανεξάρτητο της αρχικής κατάστασης και λέμε ότι έχει μεταβεί στη *σταθερή κατάσταση* (steady - state conditions), στην οποία οι ρυθμοί άφιξης λ και εξυπηρέτησης μ , είναι σταθεροί. Η θεωρία αναμονής εξετάζει τα συστήματα τα οποία έχουν μεταβεί σε σταθερή κατάσταση και χρησιμοποιεί τους

συμβολισμούς και τους τύπους που δίνονται στη συνέχεια. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν τους δείκτες απόδοσης ενός συστήματος.

- N = ο αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής
- P_o = η πιθανότητα να μην υπάρχουν πελάτες στο σύστημα
- P_n = η πιθανότητα να υπάρχουν n πελάτες στο σύστημα
- L = αναμενόμενος ή μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής, στην ουρά και στην εξυπηρέτηση (expected number of customers in the system or expected line length)
- L_q = αναμενόμενος ή μέσος αριθμός πελατών στη σειρά αναμονής (expected number of customers in the queue)
- W = αναμενόμενος ή μέσος χρόνος παραμονής ενός πελάτη στο σύστημα αναμονής (expected waiting time per customer in the system)
- W_q = αναμενόμενος ή μέσος χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην σειρά αναμονής (expected waiting time per customer in the queue)

Στις αρχές του 1961 ο John D.C. Little^[53] απέδειξε τη σχέση που συνδέει τα μεσαία μεγέθους συστήματα σε σταθερή κατάσταση με τους σταθερούς χρόνους αναμονής των πελατών. Η σχέση αυτή είναι η εξής :

$$L = \lambda * W \quad (1)$$

Με βάση τη σχέση (1) προκύπτει και η εξής σχέση :

$$Lq = \lambda * Wq \quad (2)$$

Ακόμα, με την προϋπόθεση ότι ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης είναι σταθερός και ίσος με $1/\mu$ εξ' ορισμού προκύπτουν οι εξής σχέσεις :

$$W = Wq + \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

$$L = Lq + \rho \quad (4)$$

Μοντέλα θεωρίας αναμονής

Τα βασικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή συστημάτων διαχωρίζονται σε «Μοντέλα Πουασσόν» και «Μοντέλα μη Πουασσόν». Τα «Μοντέλα Πουασσόν» είναι τα μαθηματικά μοντέλα των συστημάτων αναμονής στα οποία τόσο οι αφίξεις όσο και οι εξυπηρετήσεις συμβαίνουν με την κατανομή Πουασσόν. Είναι απλά στην μαθηματική τους επεξεργασία γιατί η περιγραφή των καταστάσεων τους γίνεται μέσω του αριθμού $N(t)$ των πελατών στο σύστημα και μόνο. Αυτό συμβαίνει χάρη στη σπουδαία ιδιότητα της έλλειψης μνήμης της αρνητικής εκθετικής κατανομής, που ονομάζεται και «Μαρκοβιανή Ιδιότητα», και εξασφαλίζει ότι η μελλοντική εξέλιξη του συστήματος από μια χρονική στιγμή t και έπειτα εξαρτάται από την κατάσταση $N(t)$ και καθόλου από την κατάσταση του συστήματος πριν την χρονική στιγμή t . Στα «Μοντέλα μη Πουασσόν» δεν ισχύει αυτή η ιδιότητα καθώς η εξέλιξη του συστήματος εκτός από το $N(t)$ εξαρτάται και από τον χρόνο που έχει παρέλθει του t γι αυτό και η επίλυση τους παρουσιάζει δυσκολίες. Στον Πίνακα Β-2 φαίνονται ορισμένοι τύποι μοντέλων Πουασσόν και μη Πουασσόν.

Πίνακας Β- 2: Τύποι μοντέλων Πουασσόν και μη Πουασσόν.

Μοντέλα Πουασσόν	Μοντέλα μη Πουασσόν
$(M/M/1):(GD/\infty/\infty)$	$(M/G/1):(GD/\infty/\infty)$
$(M/M/s):(GD/\infty/\infty)$	$(M/D/1):(GD/\infty/\infty)$
$(M/M/1):(GD/N/\infty)$	$(M/D/s):(GD/\infty/\infty)$
$(M/M/s):(GD/N/\infty)$	$(D/M/s):(GD/\infty/\infty)$
$(M/M/1):(GD/\infty/K)$	$(E_k/M/1):(GD/\infty/\infty)$
$(M/M/s):(GD/\infty/K)$	$(M/E_l/1):(GD/\infty/\infty)$
	$(E_k/E_l/1):(GD/\infty/\infty)$
	$(E_k/E_l/s):(GD/\infty/\infty)$

Παρακάτω δίνεται μια συνοπτική περιγραφή κάποιων μοντέλων αναμονής που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους εγκυρότητας μοντέλων σε λιμενικά συστήματα. Επίσης δίνονται οι αναλυτικοί τύποι επίλυσης αυτών των μοντέλων.

Μοντέλο $(M/M/1):(GD/\infty/\infty)$

Το μοντέλο αυτό είναι το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να υπάρξει και για να εφαρμοστεί πρέπει να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις :

- Η διαδικασία αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Poisson με σταθερό μέσο ρυθμό αφίξεων λ . Ισοδύναμα ο μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων $1/\lambda$ ακολουθεί την εκθετική κατανομή.
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί την κατανομή Poisson με σταθερό μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης μ . Ισοδύναμα ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησεων $1/\mu$ ακολουθεί την εκθετική κατανομή.
- Υπάρχει ένας σταθμός εξυπηρέτησης ($s = 1$) και η εξυπηρέτηση γίνεται σε μια φάση.
- Υπάρχει μία μόνο ουρά στην οποία γίνεται εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (FIFO).
- Η χωρητικότητα του συστήματος αναμονής είναι απεριόριστη.
- Η πηγή των πελατών προέρχεται από ένα άπειρο πλήθος πελατών.
- Δεν παρατηρούνται μη τυποποιημένες συμπεριφορές όπως η αποχώρηση από την ουρά.
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από τον μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης ($\lambda < \mu$) ώστε το σύστημα να είναι σε ισορροπία.

Οι βασικοί τύποι που περιγράφουν το μοντέλο αυτό είναι οι εξής :

- Η πιθανότητα να μην υπάρχουν πελάτες στο σύστημα :

$$P_0 = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)$$

- Η πιθανότητα να υπάρχουν n πελάτες στο σύστημα :

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)$$

- Μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής, στην ουρά και στην εξυπηρέτηση :

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

- Μέσος αριθμός πελατών στη σειρά αναμονής :

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

- Μέσος χρόνος παραμονής ενός πελάτη στο σύστημα αναμονής :

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{L}{\lambda}$$

- Μέσος χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην σειρά αναμονής :

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{L_q}{\lambda}$$

- Βαθμός χρησιμοποίησης του σταθμού εξυπηρέτησης :

$$U = \frac{\lambda}{\mu}$$

Μοντέλο (M/M/s):(GD/∞/∞)

Για την εφαρμογή αυτού του μοντέλου θα πρέπει να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις :

- Η διαδικασία αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Poisson με σταθερό μέσο ρυθμό αφίξεων λ . Ισοδύναμα ο μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων $1/\lambda$ ακολουθεί την εκθετική κατανομή.
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί την κατανομή Poisson με σταθερό μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης μ . Ισοδύναμα ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησεων $1/\mu$ ακολουθεί την εκθετική κατανομή.
- Υπάρχουν περισσότεροι από έναν σταθμοί εξυπηρέτησης s .
- Υπάρχει μία μόνο ουρά στην οποία γίνεται εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (FIFO).
- Η χωρητικότητα του συστήματος αναμονής είναι απεριόριστη.
- Η πηγή των πελατών προέρχεται από ένα άπειρο πλήθος πελατών.
- Δεν παρατηρούνται μη τυποποιημένες συμπεριφορές όπως η αποχώρηση από την ουρά.
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης να είναι μικρότερος του ρυθμού εξυπηρέτησης των σταθμών εξυπηρέτησης ($\lambda < s\mu$) ώστε το σύστημα να είναι σε ισορροπία.

Οι βασικοί τύποι που περιγράφουν το μοντέλο αυτό είναι οι εξής :

- Η πιθανότητα να μην υπάρχουν πελάτες στο σύστημα :

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^s \left(\frac{s\mu}{s\mu - \lambda} \right)}$$

- Η πιθανότητα να υπάρχουν n πελάτες στο σύστημα :

$$P_n = \frac{1}{s! s^{n-s}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 \quad \text{για } n > s$$

$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 \quad \text{για } n \leq s$$

- Μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής, στην ουρά και στην εξυπηρέτηση :

$$L = \frac{\lambda \mu \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^s}{(s-1)! (s\mu - \lambda)^2} P_0 + \frac{\lambda}{\mu}$$

- Μέσος αριθμός πελατών στη σειρά αναμονής :

$$L_q = L - \frac{\lambda}{\mu}$$

- Μέσος χρόνος παραμονής ενός πελάτη στο σύστημα αναμονής :

$$W = \frac{L}{\lambda}$$

- Μέσος χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην σειρά αναμονής :

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

- Βαθμός χρησιμοποίησης των σταθμών εξυπηρέτησης :

$$U = \frac{\lambda}{s * \mu}$$

Μοντέλο (E_k/M/1):(GD/∞/∞)

- Η διαδικασία αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Erlang k σταδίων με ρυθμό αφίξεων λ.
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί την κατανομή Poisson με σταθερό μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης μ. Ισοδύναμα ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησεων 1/μ ακολουθεί την εκθετική κατανομή.
- Υπάρχει ένας σταθμός εξυπηρέτησης (s = 1) και η εξυπηρέτηση γίνεται σε μια φάση.
- Υπάρχει μία μόνο ουρά στην οποία γίνεται εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (FIFO).
- Η χωρητικότητα του συστήματος αναμονής είναι απεριόριστη.
- Η πηγή των πελατών προέρχεται από ένα άπειρο πλήθος πελατών.
- Δεν παρατηρούνται μη τυποποιημένες συμπεριφορές όπως η αποχώρηση από την ουρά.
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από τον μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης (λ < μ) ώστε το σύστημα να είναι σε ισορροπία.

Οι βασικοί τύποι που περιγράφουν το μοντέλο αυτό είναι οι εξής :

- Μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής, στην ουρά και στην εξυπηρέτηση :

$$L = \sum_{n=1}^{\infty} nP_n$$

$$\left(P_n = \begin{cases} 1 - \rho & \text{για } n = 0 \\ \frac{z_0^k - 1}{z_0^{kn}} \rho & \text{για } n \geq 1 \end{cases} \right)$$

- Μέσος αριθμός πελατών στη σειρά αναμονής :

$$Lq = L - \frac{\lambda}{\mu}$$

- Μέσος χρόνος παραμονής ενός πελάτη στο σύστημα αναμονής :

$$W = \frac{L}{\lambda}$$

- Μέσος χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην σειρά αναμονής :

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

- Βαθμός χρησιμοποίησης των σταθμών εξυπηρέτησης :

$$U = \frac{\lambda}{\mu}$$

Μοντέλο (M/E₁/1):(GD/∞/∞)

- Η διαδικασία αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Poisson με σταθερό μέσο ρυθμό αφίξεων λ. Ισοδύναμα ο μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων 1/λ ακολουθεί την εκθετική κατανομή.
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί την κατανομή Erlang I σταδίων με ρυθμό εξυπηρέτησεων μ.
- Υπάρχει ένας σταθμός εξυπηρέτησης (s = 1) και η εξυπηρέτηση γίνεται σε μια φάση.
- Υπάρχει μία μόνο ουρά στην οποία γίνεται εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (FIFO).
- Η χωρητικότητα του συστήματος αναμονής είναι απεριόριστη.
- Η πηγή των πελατών προέρχεται από ένα άπειρο πλήθος πελατών.
- Δεν παρατηρούνται μη τυποποιημένες συμπεριφορές όπως η αποχώρηση από την ουρά.
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από τον μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης (λ < μ) ώστε το σύστημα να είναι σε ισορροπία.

Οι βασικοί τύποι που περιγράφουν το μοντέλο αυτό είναι οι εξής :

- Μέσος αριθμός πελατών στο σύστημα αναμονής, στην ουρά και στην εξυπηρέτηση :

$$L = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{1+k}{2k} * \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

- Μέσος αριθμός πελατών στη σειρά αναμονής :

$$Lq = L - \frac{\lambda}{\mu}$$

- Μέσος χρόνος παραμονής ενός πελάτη στο σύστημα αναμονής :

$$W = \frac{L}{\lambda}$$

- Μέσος χρόνος αναμονής ενός πελάτη στην σειρά αναμονής :

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

- Βαθμός χρησιμοποίησης των σταθμών εξυπηρέτησης :

$$U = \frac{\lambda}{\mu}$$

Μοντέλο (E_k/E₁/1):(GD/∞/∞)

- Η διαδικασία αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Erlang k σταδίων με ρυθμό αφίξεων λ.
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί την κατανομή Erlang l με ρυθμό εξυπηρετήσεων μ.
- Υπάρχει ένας σταθμός εξυπηρέτησης (s = 1) και η εξυπηρέτηση γίνεται σε μια φάση.
- Υπάρχει μία μόνο ουρά στην οποία γίνεται εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (FIFO).
- Η χωρητικότητα του συστήματος αναμονής είναι απεριόριστη.
- Η πηγή των πελατών προέρχεται από ένα άπειρο πλήθος πελατών.
- Δεν παρατηρούνται μη τυποποιημένες συμπεριφορές όπως η αποχώρηση από την ουρά.
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από τον μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης (λ < μ) ώστε το σύστημα να είναι σε ισορροπία.

Λόγω της πολυπλοκότητας της επίλυσης των τύπων του μοντέλου αυτού, η βιβλιογραφία δίνει συνήθως σε μορφή πινάκων τις τιμές του μέσου χρόνου αναμονής των πελατών στην ουρά, για διάφορους βαθμούς χρησιμοποίησης των σταθμών εξυπηρέτησης^[20].

Μοντέλο (E_k/E₁/s):(GD/∞/∞)

- Η διαδικασία αφίξεων ακολουθεί την κατανομή Erlang k σταδίων με ρυθμό αφίξεων λ.
- Η διαδικασία εξυπηρέτησης ακολουθεί την κατανομή Erlang l με ρυθμό εξυπηρετήσεων μ.
- Υπάρχουν περισσότεροι από έναν σταθμοί εξυπηρέτησης s.
- Υπάρχει μία μόνο ουρά στην οποία γίνεται εξυπηρέτηση κατά προτεραιότητα άφιξης (FIFO).
- Η χωρητικότητα του συστήματος αναμονής είναι απεριόριστη.
- Η πηγή των πελατών προέρχεται από ένα άπειρο πλήθος πελατών.
- Δεν παρατηρούνται μη τυποποιημένες συμπεριφορές όπως η αποχώρηση από την ουρά.
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από τον μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης (λ < μ) ώστε το σύστημα να είναι σε ισορροπία.

Λόγω της πολυπλοκότητας της επίλυσης των τύπων του μοντέλου αυτού, η βιβλιογραφία δίνει σε μορφή πινάκων τις τιμές του μέσου χρόνου αναμονής των πελατών στην ουρά, για διάφορους βαθμούς χρησιμοποίησης των σταθμών εξυπηρέτησης^[20].

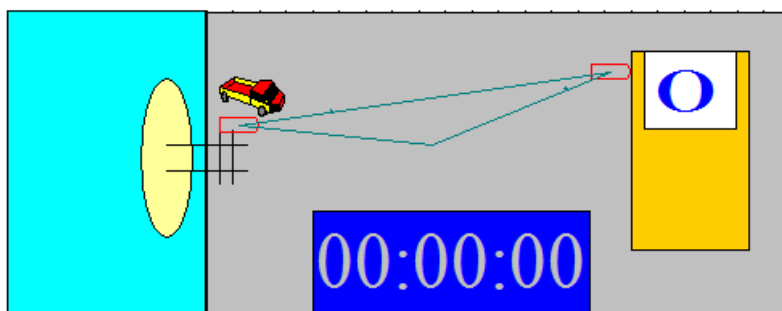
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων προσομοίωσης Arena μέσω σύγκρισης με αναλυτική αριθμητική επίλυση

Για τον έλεγχο εγκυρότητας μοντέλων προσομοίωσης Arena έγινε σύγκριση με αναλυτική αριθμητική επίλυση. Πραγματοποιήθηκαν δύο έλεγχοι ώστε να επαληθευτεί η σειρά που εκτελούνται οι λειτουργίες στα μοντέλα, με κριτήριο το χρόνο που απαιτεί κάθε λειτουργία να πραγματοποιηθεί. Ο πρώτος έλεγχος είναι ένα απλό σενάριο κατά το οποίο πρόκειται να εκφορτωθεί ένα πλοίο και ο εξοπλισμός που διατίθεται είναι μία γερανογέφυρα και ένα όχημα μεταφοράς. Ο χρόνος εκφόρτωσης στο δάπεδο στοιβασίας είναι σταθερός. Ο δεύτερος έλεγχος είναι επίσης ένα απλό σενάριο κατά το οποίο πρόκειται να εκφορτωθεί ένα πλοίο και ο εξοπλισμός που διατίθεται είναι μία γερανογέφυρα, ένα όχημα μεταφοράς και ένα όχημα πλαίσιο. Ο χρόνος εναπόθεσης του εμπορευματοκιβωτίου στη τελική του θέση είναι μεταβλητός.

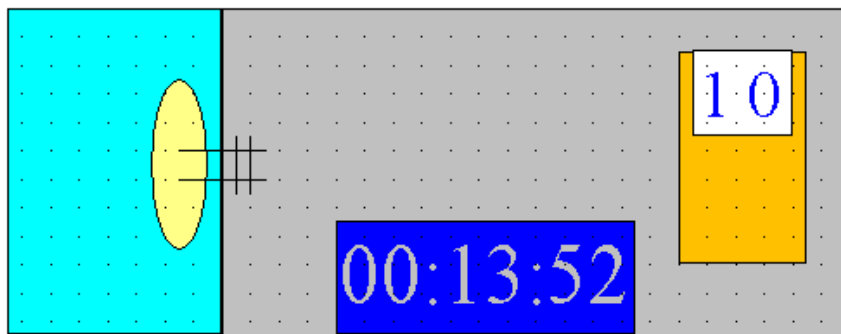
Σενάριο ελέγχου #1

Ένα λιμάνι διαθέτει μία θέση παραβολής για τα πλοία, μία γερανογέφυρα για να τα εξυπηρετήσει και ένα φορτηγό (YT) που εκτελεί τις λειτουργίες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων από το κρηπίδωμα στη χερσαία πλευρά, στο χώρο προσωρινής εναπόθεσης. Φτάνοντας ένα πλοίο στο λιμάνι, που πρόκειται να εκφορτωθεί, του εκχωρείται η γερανογέφυρα η οποία χρειάζεται 10 δευτερόλεπτα για να πάρει ένα εμπορευματοκιβώτιο από το πλοίο και 13 δευτερόλεπτα για να το φορτώσει στο φορτηγό. Το φορτηγό έχει ταχύτητα 1m/s και χρειάζεται να διανύσει 36m μέχρι το χώρο εναπόθεσης. Η εκφόρτωση του θα πραγματοποιηθεί σε 17 δευτερόλεπτα και έπειτα θα επιστρέψει στο κρηπίδωμα για να παραλάβει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Όταν το φορτηγό επιστρέφει στο κρηπίδωμα έχει ταχύτητα 2m/s και διανύει επίσης 36m. Γίνεται η υπόθεση ότι πρόκειται να εκφορτωθούν 10 εμπορευματοκιβώτια.

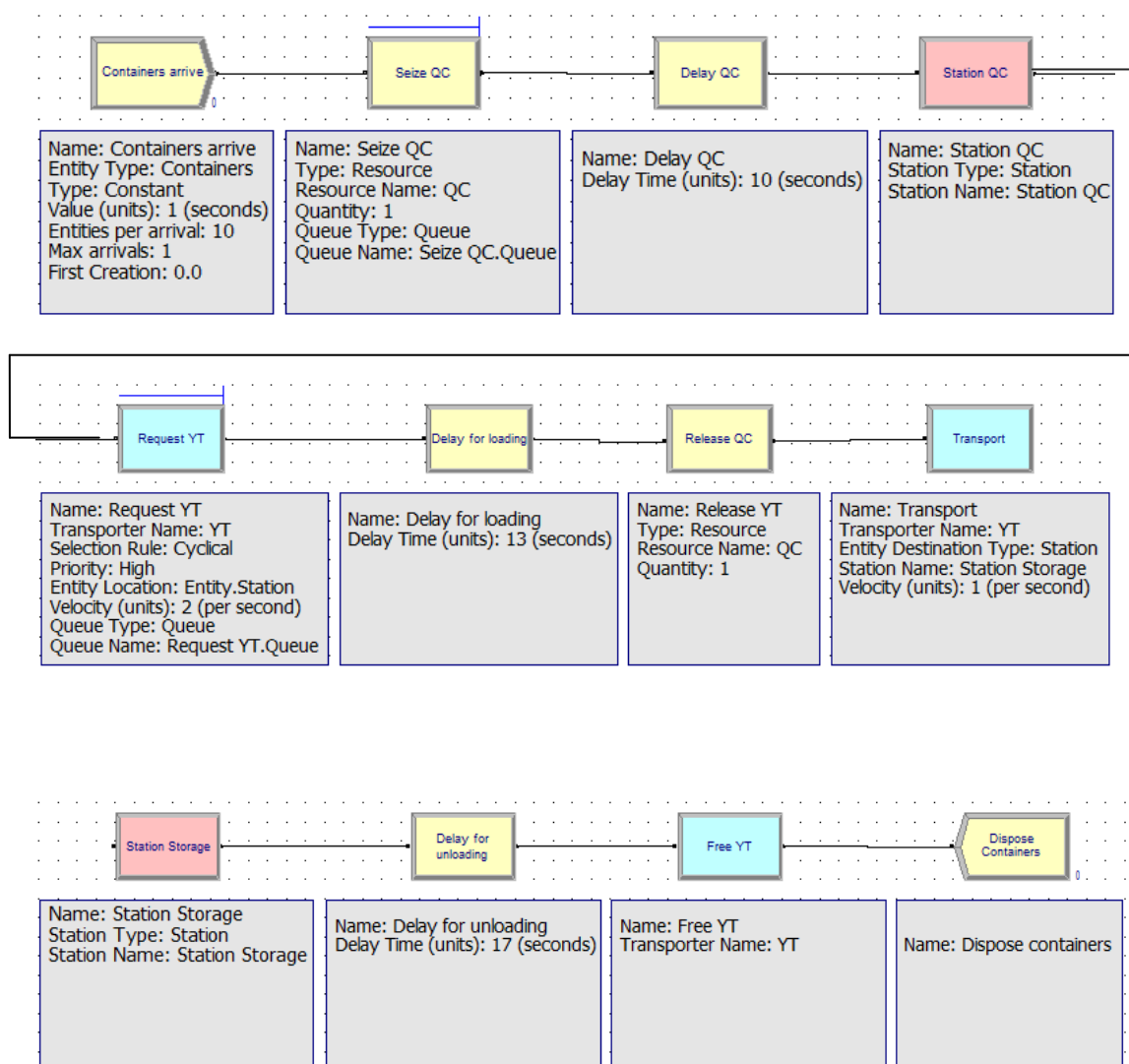
Για την παρακολούθηση του χρόνου στο μοντέλο προσομοίωσης Arena, χρησιμοποιήθηκε το ρολόι όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ-1. Το πρόγραμμα εκτελέστηκε μέχρι να εκφορτωθούν και τα 10 εμπορευματοκιβώτια και ολοκληρώθηκε τη χρονική στιγμή 13min και 52sec, όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ-2. Στην Εικόνα Γ-3 φαίνεται η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα Γ- 1: Χρονική στιγμή $t=0$ (Σενάριο ελέγχου #1)



Εικόνα Γ- 2: Χρονική στιγμή $t=13\text{min}$ και 52sec κατά την οποία ολοκληρώθηκε η εξυπηρέτηση των 10 εμπορευματοκιβωτίων (τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας)



Εικόνα Γ- 3: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #1)

Η αναλυτική επίλυση για τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάστηκε για να εκφορτωθούν και τα 10 εμπορευματοκιβώτια και να μεταφερθούν στο χώρο προσωρινής εναπόθεσης είναι η εξής:

1^ο εμπορευματοκιβώτιο: χρειάζονται 10sec ώστε να παραληφθεί από τη γερανογέφυρα, 13sec ώστε να φορτωθεί στο φορτηγό, 36sec ($=36\text{m}/1\text{m/s}$) ώστε να μεταφερθεί στο χώρο εναπόθεσης και 17sec ώστε να εκφορτωθεί. Δηλαδή: $10+13+36+17=76\text{sec}$.

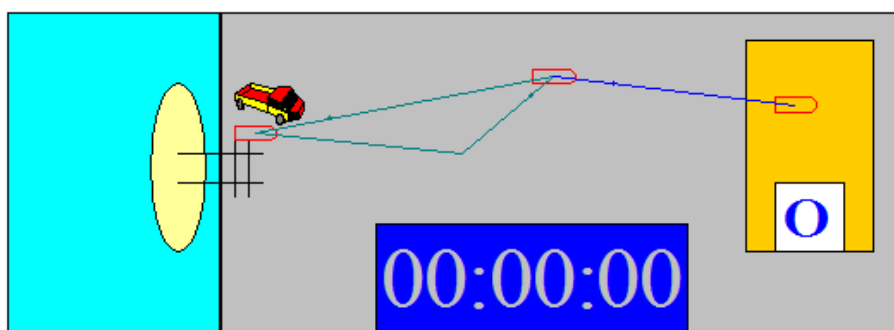
2^ο εμπορευματοκιβώτιο: χρειάζονται 18sec ($=36\text{m}/2\text{m/s}$) ώστε να επιστρέψει το φορτηγό στο κρηπίδωμα, 13sec ώστε να φορτωθεί το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο, 36sec ($=36\text{m}/1\text{m/s}$) ώστε να μεταφερθεί στο χώρο εναπόθεσης και 17sec ώστε να εκφορτωθεί. Δεν λαμβάνονται υπόψη τα 10sec που χρειάζεται η γερανογέφυρα να πάρει αυτό το εμπορευματοκιβώτιο διότι ο χρόνος αυτός έχει επικαλυφθεί από το χρόνο που έκανε το φορτηγό να μεταφέρει το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο στο χώρο εναπόθεσης. Αμέσως μετά τη φόρτωση του φορτηγού με το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο, η γερανογέφυρα παραλαμβάνει το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο και περιμένει να επιστρέψει το φορτηγό. Άρα ο συνολικός χρόνος για το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο είναι: $18+13+36+17=84\text{sec}$.

Ομοίως και τα επόμενα εμπορευματοκιβώτια θα χρειαστούν τον ίδιο χρόνο το καθένα. Τελικά ο χρόνος για να εκφορτωθούν και τα 10 εμπορευματοκιβώτια είναι: $76+84*9 = 832\text{sec} = 13\text{min}$ και 52sec, όσο δηλαδή υπολογίστηκε και στο μοντέλο της προσομοίωσης.

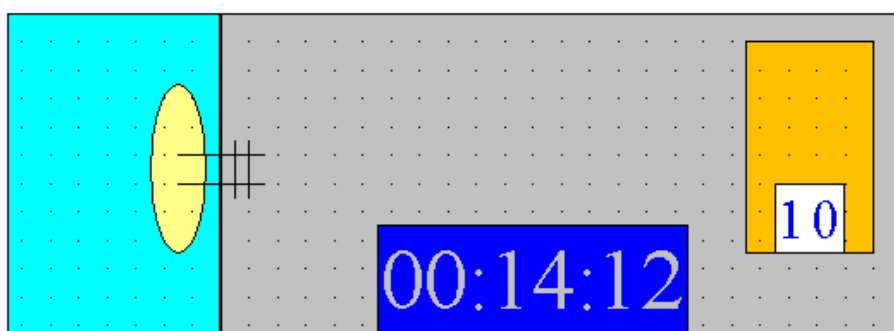
Σενάριο ελέγχου #2

Το σενάριο αυτό αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου. Μόλις το φορτηγό φτάσει στο χώρο εναπόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων και πραγματοποιηθεί εκφόρτωση του από ένα όχημα πλαίσιο, το φορτηγό θα επιστρέψει στο κρηπίδωμα. Το όχημα πλαίσιο θα εναποθέσει το εμπορευματοκιβώτιο στη τελική του θέση ακολουθώντας μια διαδρομή η οποία πραγματοποιείται σε 11sec για το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο, 12sec για το 2^ο, 13sec για το 3^ο κτλ. Γίνεται η ίδια υπόθεση ότι πρόκειται να εκφορτωθούν 10 εμπορευματοκιβώτια.

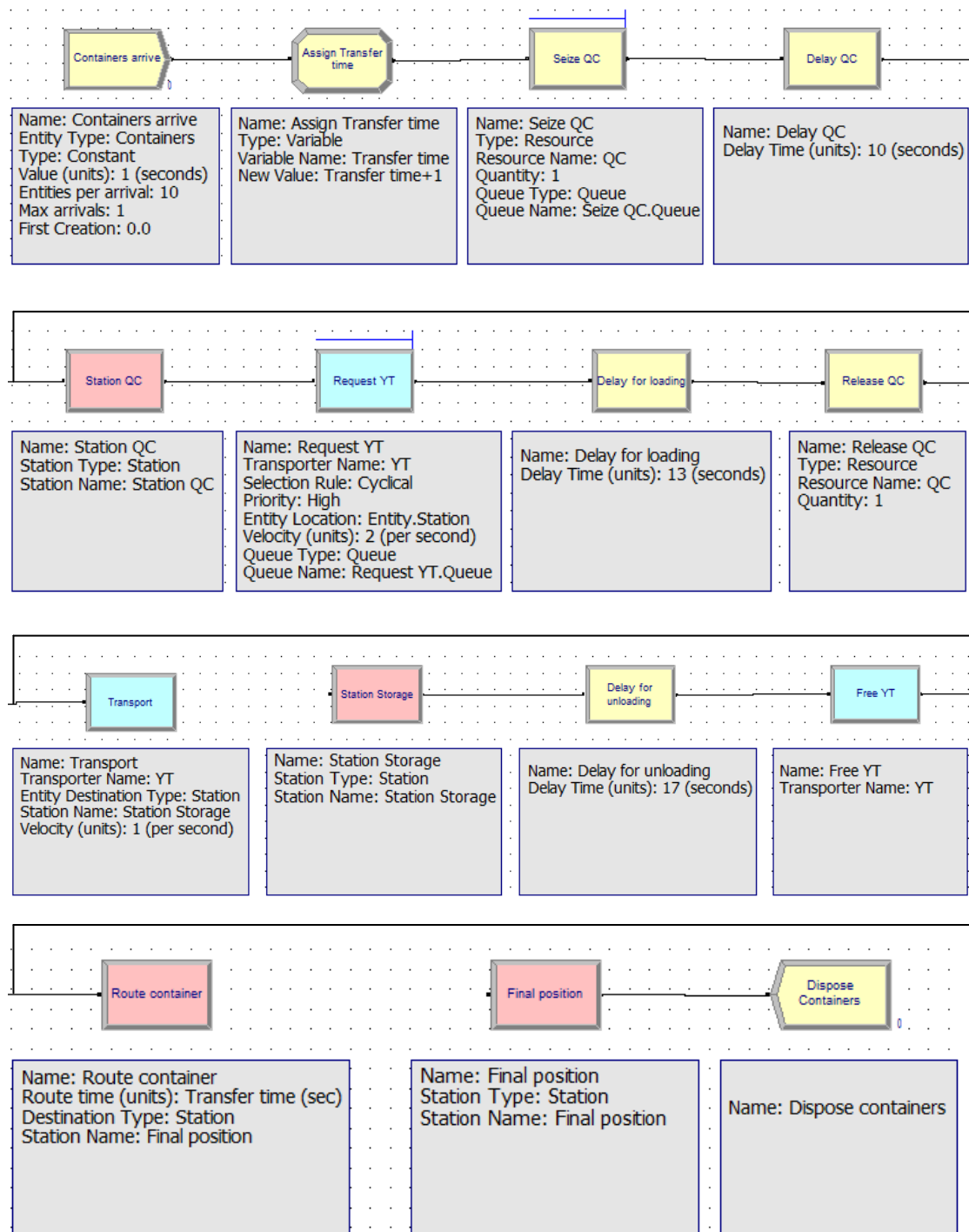
Για την παρακολούθηση του χρόνου στο μοντέλο προσομοίωσης Arena, χρησιμοποιήθηκε το ρολόι όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ-4. Το πρόγραμμα εκτελέστηκε μέχρι να εκφορτωθούν και τα 10 εμπορευματοκιβώτια και ολοκληρώθηκε τη χρονική στιγμή 14min και 12sec, όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ-5. Στην Εικόνα Γ-6 φαίνεται η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα Γ- 4: Χρονική στιγμή $t=0$ (Σενάριο ελέγχου #2)



Εικόνα Γ- 5: Χρονική στιγμή $t= 14\text{min}$ και 12sec κατά την οποία ολοκληρώθηκε η εξυπηρέτηση των 10 εμπορευματοκιβωτίων (τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας)



Εικόνα Γ- 6: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #2)

Η αναλυτική επίλυση για τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάστηκε για να εκφορτωθούν και τα 10 εμπορευματοκιβώτια και να μεταφερθούν στο χώρο προσωρινής εναπόθεσης είναι η εξής:

1^ο εμπορευματοκιβώτιο: χρειάζονται 10sec ώστε να παραληφθεί από τη γερανογέφυρα, 13sec ώστε να φορτωθεί στο φορτηγό, 36sec ($=36\text{m}/1\text{m/s}$) ώστε να μεταφερθεί στο χώρο εναπόθεσης και 17sec ώστε να εκφορτωθεί. Στη συνέχεια χρειάζονται 11sec ώστε να μεταφερθεί το εμπορευματοκιβώτιο στη τελική του θέση. Όμως ταυτόχρονα το φορτηγό επιστρέφει για να παραλάβει το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο και χρειάζεται 18sec ($=36\text{m}/2\text{m/s}$) για να φτάσει στο κρηπίδωμα. Επομένως τα 11sec επικαλύπτονται από αυτό το χρόνο. Τελικά για το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος: $10+13+36+17=76\text{sec}$.

2^ο εμπορευματοκιβώτιο: χρειάζονται 18sec ($=36\text{m}/2\text{m/s}$) ώστε να επιστρέψει το φορτηγό στο κρηπίδωμα, 13sec ώστε να φορτωθεί το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο, 36sec ($=36\text{m}/1\text{m/s}$) ώστε να μεταφερθεί στο χώρο εναπόθεσης και 17sec ώστε να εκφορτωθεί. Δεν λαμβάνονται υπόψη τα 10sec που χρειάζεται η γερανογέφυρα να πάρει αυτό το εμπορευματοκιβώτιο διότι ο χρόνος αυτός έχει επικαλυφθεί από το χρόνο που έκανε το φορτηγό να μεταφέρει το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο στο χώρο εναπόθεσης. Αμέσως μετά τη φόρτωση του φορτηγού με το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο, η γερανογέφυρα παραλαμβάνει το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο και περιμένει να επιστρέψει το φορτηγό. Επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος που χρειάζεται το εμπορευματοκιβώτιο να μεταφερθεί στην τελική του θέση, δηλαδή τα $(11+1)\text{sec}$ γιατί επικαλύπτεται. Άρα ο συνολικός χρόνος για το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο είναι: $18+13+36+17=84\text{sec}$.

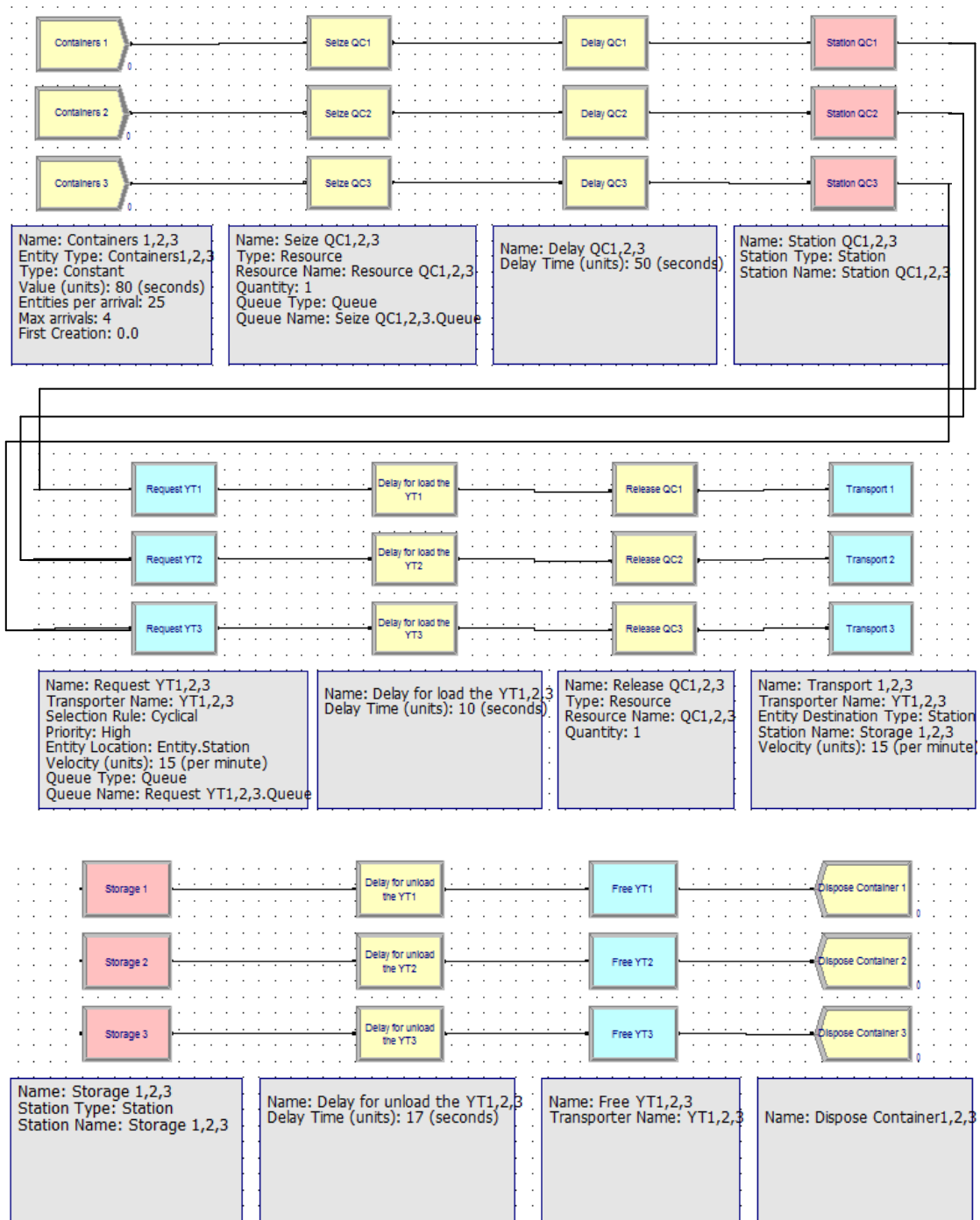
Ομοίως και τα επόμενα εμπορευματοκιβώτια θα χρειαστούν τον ίδιο χρόνο το καθένα, με εξαίρεση το τελευταίο εμπορευματοκιβώτιο, του οποίου ο χρόνος για να μεταφερθεί στην τελική θέση θα προσμετρηθεί, γιατί δεν υπάρχει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο να επικαλύψει αυτό το χρόνο. Ο χρόνος αυτός έχει αρχική τιμή τα 11sec και έπειτα για κάθε ένα εμπορευματοκιβώτιο προστίθεται 1sec. Αυτό σημαίνει ότι, το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο θα χρειαστεί 11sec, το 2^ο εμπορευματοκιβώτιο 12sec, το 3^ο εμπορευματοκιβώτιο 13sec και τελικά το 10^ο εμπορευματοκιβώτιο 20sec. Τελικά ο χρόνος για να εκφορτωθούν και τα 10 εμπορευματοκιβώτια είναι: $76+84*9+20 = 852\text{sec} = 14\text{min}$ και 12sec, όσο δηλαδή υπολογίστηκε και στο μοντέλο της προσομοίωσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Έλεγχος προσομοιωτικής διαδικασίας για την κατανομή εργασιών στα οχήματα μεταφοράς

Σενάριο ελέγχου #3

Σταθερή ανάθεση εξυπηρετητών στις γερανογέφυρες του ίδιου πλοίου (Fixed allocation)

Στον έλεγχο αυτό, γίνεται προσομοίωση των διαδικασιών εκφόρτωσης ενός πλοίου που έχει παραβάλει σε μια θέση στο λιμάνι. Στο πλοίο έχουν εκχωρηθεί τρεις γερανογέφυρες, όπου η κάθε μια πρόκειται να εκφορτώσει 100 εμπορευματοκιβώτια από το πλοίο. Σε κάθε γερανογέφυρα έχουν εκχωρηθεί δύο φορτηγά τα οποία θα φορτώνονται στο κρηπίδωμα από τη γερανογέφυρα, θα εκτελούν τη διαδρομή μέχρι το χώρο εναπόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων, όπου θα εκφορτώνονται και θα επιστρέφουν στο κρηπίδωμα για να παραλάβουν επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Υπάρχουν τρεις χώροι εναπόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων που αντιστοιχούν σε κάθε γερανογέφυρα. Κάθε γερανογέφυρα χρειάζεται 50sec για να παραλάβει ένα εμπορευματοκιβώτιο και 10sec για να το φορτώσει στο φορτηγό. Τα φορτηγά (YT1-2units) που έχουν εκχωρηθεί στη πρώτη γερανογέφυρα (QC1) διανύουν απόσταση 50m μέχρι το χώρο εναπόθεσης και 50m για να επιστρέψουν πάλι στο κρηπίδωμα. Τα φορτηγά (YT2-2units) που έχουν εκχωρηθεί στη δεύτερη γερανογέφυρα (QC2) διανύουν απόσταση 40m μέχρι το χώρο εναπόθεσης και 40m για να επιστρέψουν πάλι στο κρηπίδωμα. Τα φορτηγά (YT3-2units) που έχουν εκχωρηθεί στη τρίτη γερανογέφυρα (QC3) διανύουν απόσταση 60m μέχρι το χώρο εναπόθεσης και 60m για να επιστρέψουν πάλι στο κρηπίδωμα. Όλα τα φορτηγά χρειάζονται 17sec για να εκφορτώσουν τα εμπορευματοκιβώτια στο χώρο εναπόθεσης και όλα κινούνται με ταχύτητα 15m/min ανεξάρτητα από το αν είναι έμφορτα ή κενά. Επίσης όλα τα φορτηγά βρίσκονται σε μια αρχική θέση πριν ξεκινήσουν οι λειτουργίες. Η θέση αυτή είναι σε απόσταση 10m από τη πρώτη γερανογέφυρα, 20m από τη δεύτερη και 30m από τη τρίτη. Στην Εικόνα Δ-1 φαίνεται η κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο πρόγραμμα Arena.



Transporter - Advanced Transfer								
	Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	Report Statistics
1	YT1	2	Free Path	YT1.Distance	15	Per Minute	1 rows	✓
2	YT2	2	Free Path	YT2.Distance	15	Per Minute	1 rows	✓
3	YT3	2	Free Path	YT3.Distance	15	Per Minute	1 rows	✓

Distance - Advanced Transfer			
	Name	Stations	
1	YT1.Distance	3 rows	

Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station QC1	Storage 1	50
2	Storage 1	Station QC1	50
3	Station Parking	Station QC1	10

Distance - Advanced Transfer			
	Name	Stations	
1	YT1.Distance	3 rows	
2	YT2.Distance	3 rows	

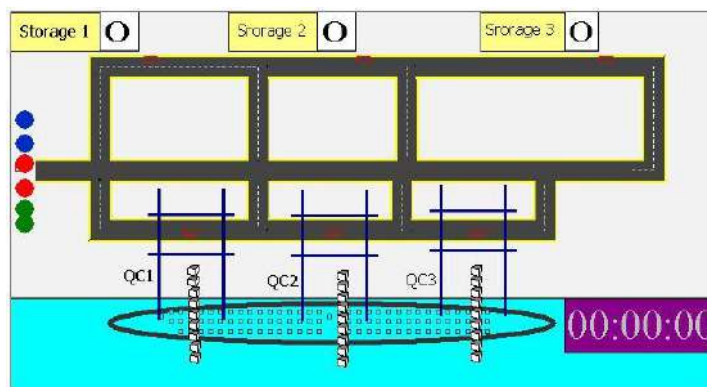
Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station QC2	Storage 2	40
2	Storage 2	Station QC2	40
3	Station Parking	Station QC2	20

Distance - Advanced Transfer		
	Name	Stations
1	YT1.Distance	3 rows
2	YT2.Distance	3 rows
3	YT3.Distance	3 rows

Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station QC3	Storage 3	60
2	Storage 3	Station QC3	60
3	Station Parking	Station QC3	30

Εικόνα Δ- 1: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #3)

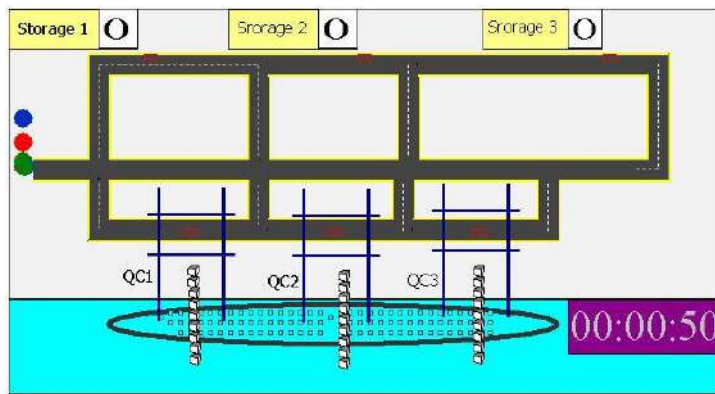
Εκτός από την κατασκευή του μοντέλου έχει σχεδιαστεί και animation για να γίνει λεπτομερής έλεγχος των λειτουργιών που συμβαίνουν. Στις επόμενες εικόνες φαίνονται στιγμιότυπα από το animation κατά την διάρκεια της εκτέλεσης, που επαληθεύουν την ορθότητα του μοντέλου.



Εικόνα Δ- 2: Χρονική στιγμή $t_1=0$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Τη χρονική στιγμή $t_1=0$, έχει παραβάλει ένα πλοίο στο λιμάνι και του έχουν εκχωρηθεί τρεις γερανογέφυρες (QC1, QC2, QC3) όπου η κάθε μια πρόκειται να εκφορτώσει 100 εμπορευματοκιβώτια. Σε μια αρχική θέση βρίσκονται έξι φορτηγά που αναπαρίστανται με χρωματιστούς κύκλους,

όπου οι δύο μπλε κύκλοι είναι τα δύο φορτηγά που έχουν εκχωρηθεί στη πρώτη γερανογέφυρα (QC1), οι δύο κόκκινοι κύκλοι είναι τα δύο φορτηγά που έχουν εκχωρηθεί στη δεύτερη γερανογέφυρα (QC2) και οι δύο πράσινοι κύκλοι είναι τα δύο φορτηγά που έχουν εκχωρηθεί στη τρίτη γερανογέφυρα (QC3). Στην εικόνα φαίνονται τα εμπορευματοκιβώτια που αναμένουν στην ουρά για να εκφορτωθούν. Τα φορτηγά θα μεταφέρουν τα εμπορευματοκιβώτια στους χώρους προσωρινής εναπόθεσης (Storage 1, 2, 3) ακολουθώντας συγκεκριμένη διαδρομή. Σε κάθε χώρο εναπόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων έχει τοποθετηθεί σε λευκό πλαίσιο μετρητής, που δείχνει πόσο εμπορευματοκιβώτια έχουν μεταφερθεί στους χώρους αυτούς. Όταν μεταφερθούν 100 εμπορευματοκιβώτια σε κάθε χώρο τότε το μοντέλο θα τερματιστεί.

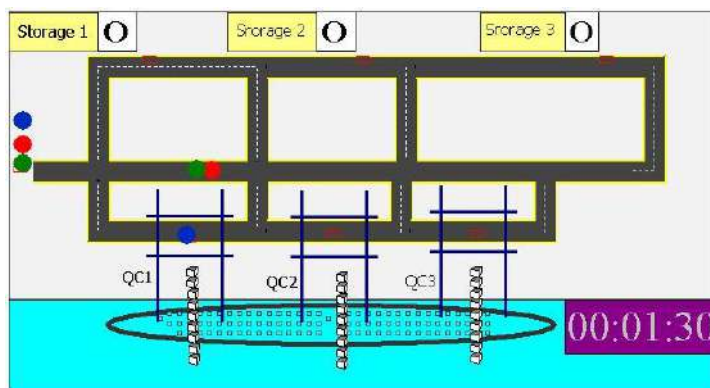


Εικόνα Δ- 3: Χρονική στιγμή $t_2=50\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Τη χρονική στιγμή $t_2=50\text{sec}$ οι γερανογέφυρες έχουν παραλάβει από ένα εμπορευματοκιβώτιο και καλούν τα φορτηγά (με την εντολή: Request YT) για να τα φορτώσουν. Όπως φαίνεται λοιπόν στην εικόνα τα τρία φορτηγά (τα οποία έχουν επικαλυφθεί) ξεκινούν τη διαδρομή προς τις γερανογέφυρες.

Λόγω της σταθερής ανάθεσης των φορτηγών στις γερανογέφυρες είναι δυνατή η παρακολούθηση του μοντέλου σε τμήματα. Δηλαδή είναι δυνατή η μεμονωμένη παρακολούθηση των δύο φορτηγών που έχουν εκχωρηθεί στη πρώτη γερανογέφυρα εφόσον δεν επηρεάζονται οι κινήσεις τους από τις κινήσεις των λοιπών φορτηγών. Ομοίως είναι δυνατή η μεμονωμένη παρακολούθηση και των υπόλοιπων φορτηγών.

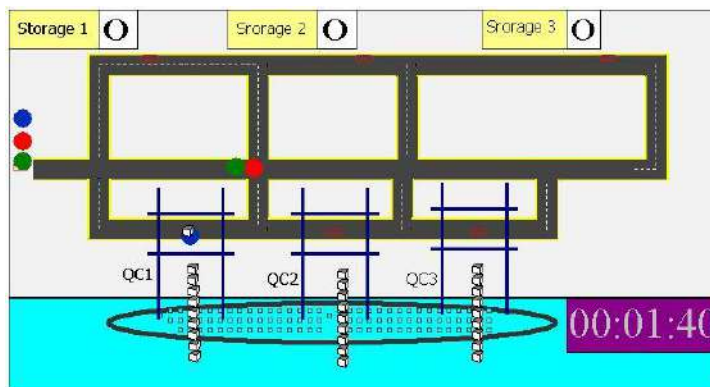
Παρακολούθηση των YT1 (2 μπλε κύκλοι)



Εικόνα Δ- 4: Χρονική στιγμή $t_{3-1}=1\text{min} \& 30\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

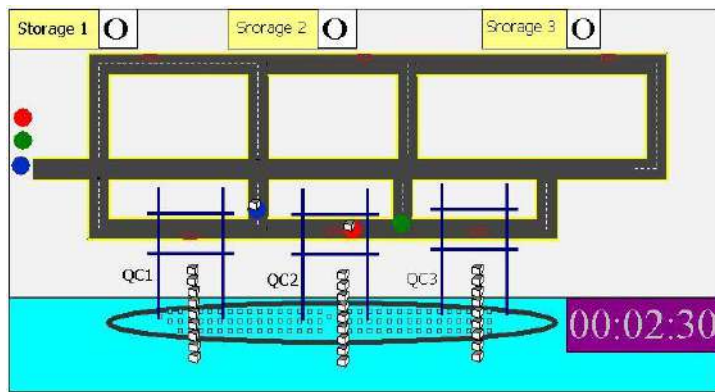
Τη χρονική στιγμή $t_{3-1}=1\text{min} \& 30\text{sec}$, έχει φτάσει το πρώτο φορτηγό στη πρώτη γερανογέφυρα και πρόκειται να φορτωθεί. Σύμφωνα με τα δεδομένα, το φορτηγό αυτό χρειάστηκε να διανύσει 10m από την αρχική του θέση μέχρι τη θέση που είναι τώρα με ταχύτητα 15m/min. Δηλαδή χρειάστηκε 40sec ($=60 \cdot 10 / 15$), που

επαληθεύεται από τη διαφορά των χρονικών στιγμών $t_{3-1} - t_2$.



Εικόνα Δ- 5: Χρονική στιγμή $t_{4-1}=1\text{min} \& 40\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

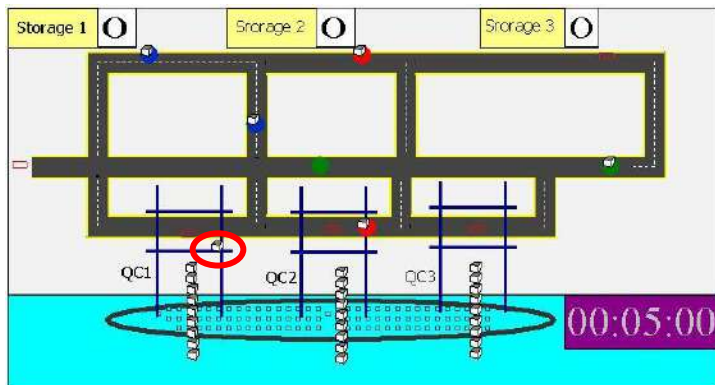
Τη χρονική στιγμή $t_{4-1}=1\text{min} \& 40\text{sec}$, ύστερα δηλαδή από 10sec, έχει ολοκληρωθεί η φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο πρώτο φορτηγό και πρόκειται να αναχωρήσει για τον χώρο εναπόθεσης του (Storage 1).



Εικόνα Δ- 6: Χρονική στιγμή $t_{5-1}=2\text{min} \ \& \ 30\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

εμπορευματοκιβωτίου, το επόμενο φορτηγό καλείται στη θέση της γερανογέφυρας για να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο.

Τη προηγούμενη χρονική στιγμή $t_{4-1}=1\text{min} \ \& \ 40\text{sec}$ όπου το φορτηγό φορτώθηκε και αναχώρησε, η γερανογέφυρα ξεκίνησε τη διαδικασία για να παραλάβει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Για τη διαδικασία αυτή χρειάζεται 50sec. Τη χρονική στιγμή λοιπόν $t_{5-1}=2\text{min} \ \& \ 30\text{sec}$ όπου έχει ολοκληρωθεί η παραλαβή επόμενου

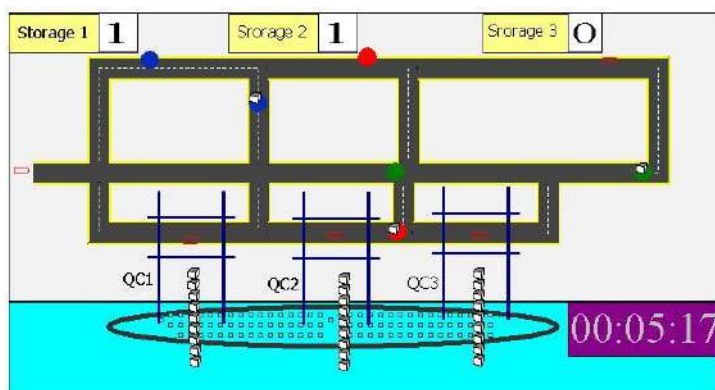


Εικόνα Δ- 7: Χρονική στιγμή $t_{6-1}=5\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

επαληθεύεται από τη διαφορά των χρονικών στιγμών $t_{6-1}-t_{4-1}$. Στη θέση αυτή θα χρειαστεί 17sec για να εκφορτωθεί και αμέσως μετά θα επιστρέψει στη θέση της γερανογέφυρας για να παραλάβει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο που αναμένει στην ουρά όπως φαίνεται και στην εικόνα.

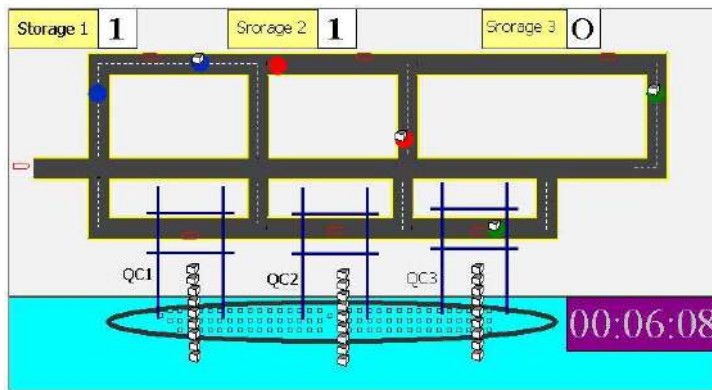
Τη χρονική στιγμή $t_{4-1}=1\text{min} \ \& \ 40\text{sec}$ το πρώτο φορτηγό είχε αναχωρήσει από τη γερανογέφυρα φορτωμένο για να πάει στο χώρο εναπόθεσης. Έφτασε τη χρονική στιγμή $t_{6-1}=5\text{min}$. Διένυσε 50m με ταχύτητα 15m/min. Δηλαδή

χρειάστηκε 200sec
($=60 \cdot 50 / 15$) που



Εικόνα Δ- 8: Χρονική στιγμή $t_{7-1}=5\text{min} \ \& \ 17\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Ύστερα από 17sec το πρώτο φορτηγό έχει εκφορτωθεί και το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο έχει τοποθετηθεί στο χώρο προσωρινής αποθήκευσης (Storage 1). Ο μετρητής στο χώρο αποθήκευσης έχει την ένδειξη 1.

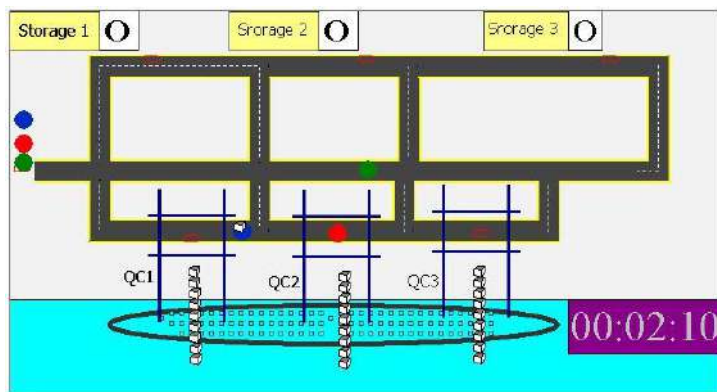


Εικόνα Δ- 9: Χρονική στιγμή $t_{8-1}=6\text{min} \& 8\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

περιμένει.

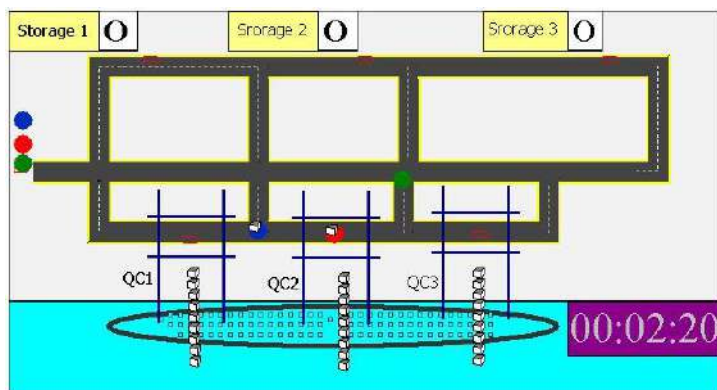
Οι διαδικασίες αυτές επαναλαμβάνονται συνεχώς μέχρι να εκφορτωθούν και τα 100 εμπορευματοκιβώτια.

Παρακολούθηση των YT2 (2 κόκκινοι κύκλοι)



Εικόνα Δ- 10: Χρονική στιγμή t_{3-2} (Σενάριο ελέγχου #3)

15m/min. Δηλαδή χρειάστηκε 80sec ($=60 \cdot 20 / 15$), που επαληθεύεται από τη διαφορά των χρονικών στιγμών $t_{3-2} - t_2$.

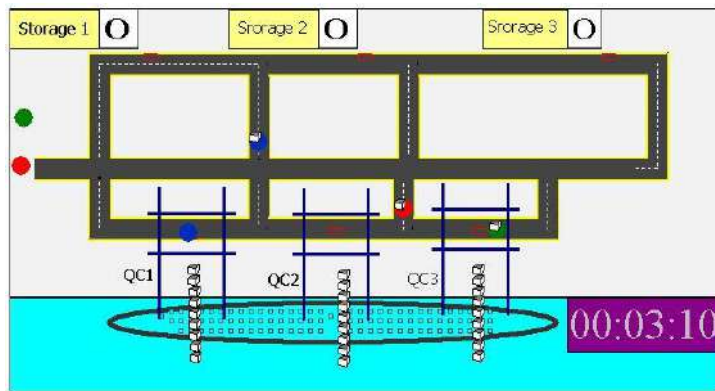


Εικόνα Δ- 11: Χρονική στιγμή $t_{4-2}=2\text{min} \& 20\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Η επόμενη τυχαία χρονική στιγμή $t_{8-1}=6\text{min} \& 8\text{sec}$ δείχνει ότι μετά την εκφόρτωση, το πρώτο φορτηγό, θα επιστρέψει στη θέση της γερανογέφυρας κενό, ώστε να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο που

Τη χρονική στιγμή $t_{3-2}=2\text{min} \& 10\text{sec}$, έχει φτάσει το πρώτο φορτηγό αυτής της ομάδας στη δεύτερη γερανογέφυρα και πρόκειται να φορτωθεί. Σύμφωνα με τα δεδομένα, το φορτηγό αυτό χρειάστηκε να διανύσει 20m από την αρχική του θέση μέχρι τη θέση που είναι τώρα με ταχύτητα

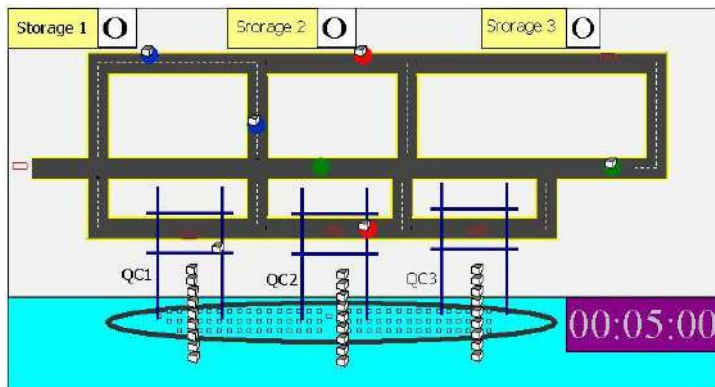
Τη χρονική στιγμή $t_{4-2}=2\text{min} \& 20\text{sec}$, ύστερα δηλαδή από 10sec, έχει ολοκληρωθεί η φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο πρώτο φορτηγό και πρόκειται να αναχωρήσει για τον χώρο εναπόθεσης του (Storage 2).



Εικόνα Δ- 12: Χρονική στιγμή $t_{5-2}=3\text{min} \& 10\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

ολοκληρωθεί η παραλαβή επόμενου εμπορευματοκιβωτίου, το επόμενο φορτηγό καλείται στη θέση της γερανογέφυρας για να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο.

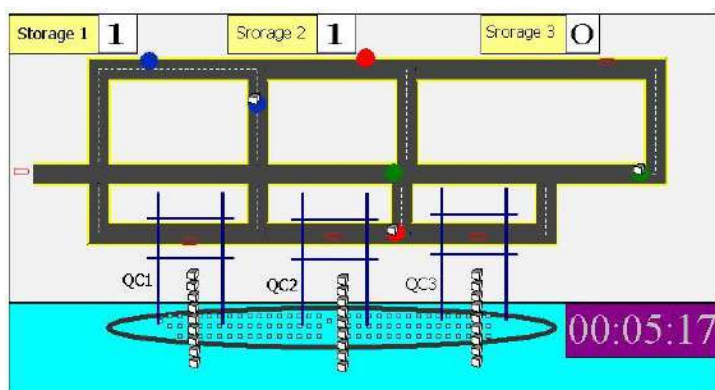
Τη προηγούμενη χρονική στιγμή $t_{4-2}=2\text{min} \& 20\text{sec}$ όπου το πρώτο φορτηγό φορτώθηκε και αναχώρησε για το χώρο εναπόθεσης, η γερανογέφυρα ξεκίνησε τη διαδικασία για να παραλάβει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Για τη διαδικασία αυτή χρειάζεται 50sec. Τη χρονική στιγμή λοιπόν $t_{5-2}=3\text{min} \& 10\text{sec}$ όπου έχει



Εικόνα Δ- 13: Χρονική στιγμή $t_{6-2}=5\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

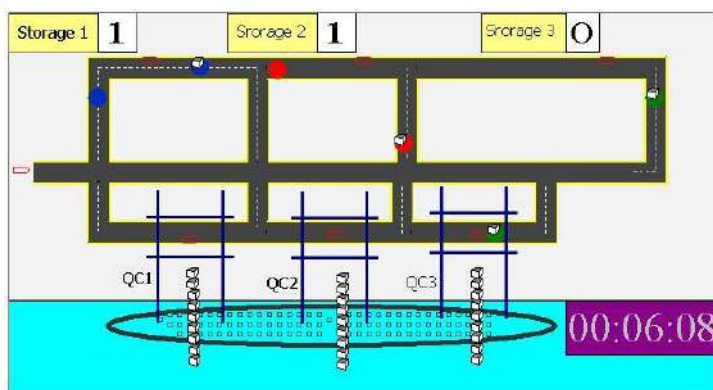
διαφορά των χρονικών στιγμών $t_{6-2} - t_{4-2}$. Στη θέση αυτή θα χρειαστεί 17sec για να εκφορτωθεί και αμέσως μετά θα επιστρέψει στη θέση της γερανογέφυρας για να παραλάβει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Τη χρονική στιγμή $t_{4-2}=2\text{min} \& 20\text{sec}$ το πρώτο φορτηγό είχε αναχωρήσει από τη γερανογέφυρα φορτωμένο για να πάει στο χώρο εναπόθεσης. Έφτασε τη χρονική στιγμή $t_{6-2}=5\text{min}$. Διένυσε 40m με ταχύτητα 15m/min. Δηλαδή χρειάστηκε 160sec ($=60 \cdot 40/15$) που επαληθεύεται από τη



Εικόνα Δ- 14: Χρονική στιγμή $t_{7-2}=5\text{min} \& 17\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Ύστερα από 17sec το πρώτο φορτηγό έχει εκφορτωθεί και το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο έχει τοποθετηθεί στο χώρο προσωρινής αποθήκευσης (Storage 2). Ο μετρητής στο χώρο αποθήκευσης έχει την ένδειξη 1.

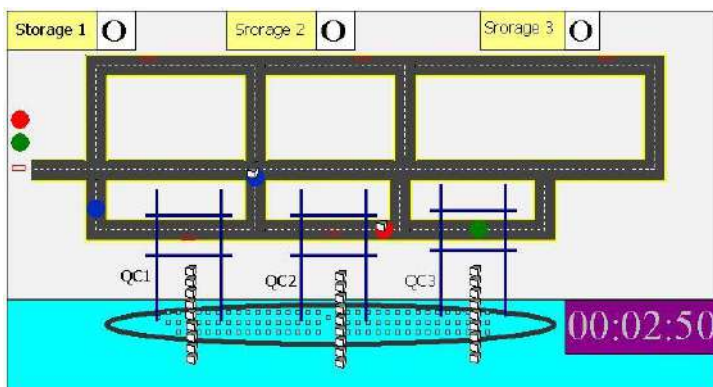


Εικόνα Δ- 15: Χρονική στιγμή $t_{8-2}=6\text{min} \& 8\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Η επόμενη τυχαία χρονική στιγμή $t_{8-2}=6\text{min} \& 8\text{sec}$ δείχνει ότι μετά την εκφόρτωση, το πρώτο φορτηγό, θα επιστρέψει στη θέση της γερανογέφυρας κενό, ώστε να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο που περιμένει.

Οι διαδικασίες αυτές επαναλαμβάνονται συνεχώς μέχρι να εκφορτωθούν και τα 100 εμπορευματοκιβώτια.

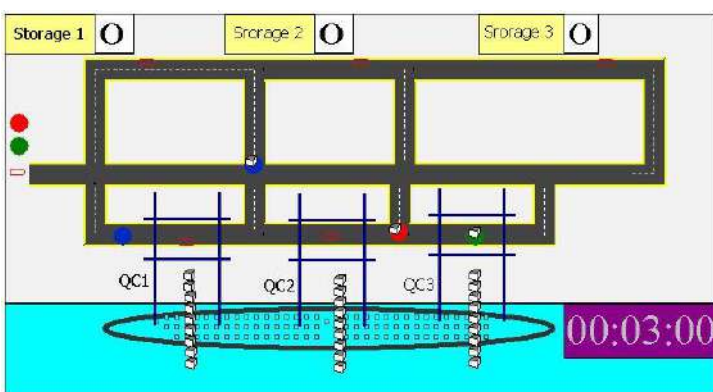
Παρακολούθηση των YT3 (2 πράσινοι κύκλοι)



Εικόνα Δ- 16: Χρονική στιγμή $t_{3-3}=2\text{min} \& 50\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

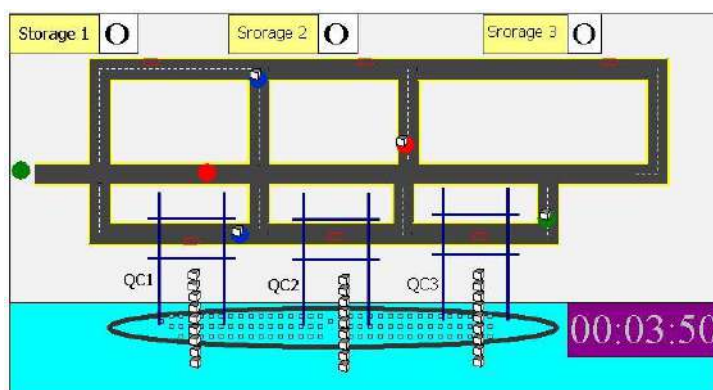
Τη χρονική στιγμή $t_{3-3}=2\text{min} \& 50\text{sec}$, έχει φτάσει το πρώτο φορτηγό αυτής της ομάδας στη τρίτη γερανογέφυρα και πρόκειται να φορτωθεί. Σύμφωνα με τα δεδομένα, το φορτηγό αυτό χρειάστηκε να διανύσει 30m από την αρχική του θέση μέχρι τη θέση που είναι τώρα με ταχύτητα 15m/min. Δηλαδή

χρειάστηκε 120sec ($=60 \cdot 20/15$), που επαληθεύεται από τη διαφορά των χρονικών στιγμών $t_{3-3} - t_2$.



Εικόνα Δ- 17: Χρονική στιγμή $t_{4-3}=3\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Τη χρονική στιγμή $t_{4-3}=3\text{min}$, ύστερα δηλαδή από 10sec, έχει ολοκληρωθεί η φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο πρώτο φορτηγό και πρόκειται να αναχωρήσει για τον χώρο εναπόθεσης του (Storage 3).

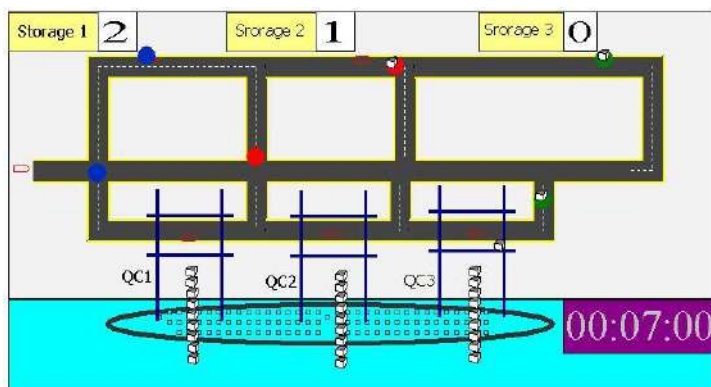


Εικόνα Δ- 18: Χρονική στιγμή $t_{5-3}=3\text{min} \& 50\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Χρονική στιγμή λοιπόν $t_{5-3} = 3\text{min}$ όπου έχει ολοκληρωθεί η παραλαβή επόμενου εμπορευματοκιβωτίου, το επόμενο φορτηγό καλείται στη θέση της γερανογέφυρας για να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο.

Τη προηγούμενη χρονική στιγμή $t_{4-3}=3\text{min}$ όπου το πρώτο φορτηγό φορτώθηκε και αναχώρησε για το χώρο εναπόθεσης, η γερανογέφυρα ξεκίνησε τη διαδικασία για να παραλάβει το επόμενο

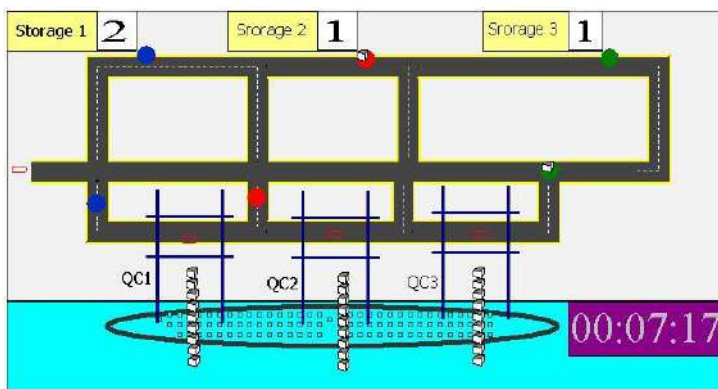
εμπορευματοκιβώτιο. Για τη διαδικασία αυτή χρειάζεται 50sec. Τη



Εικόνα Δ- 19: Χρονική στιγμή $t_{6-3}=7\text{min}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

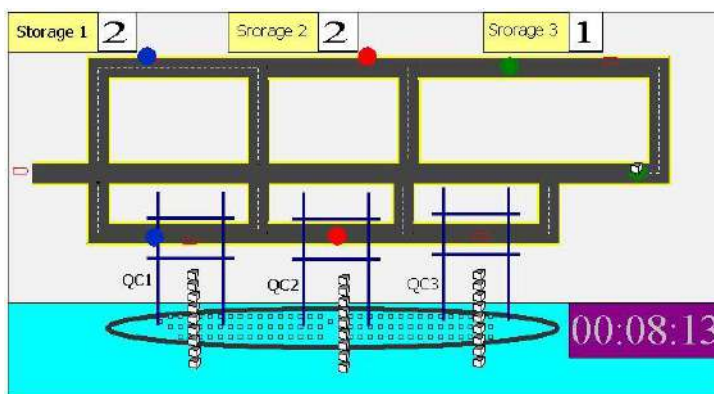
διαφορά των χρονικών στιγμών $t_{6-3} - t_{4-3}$. Στη θέση αυτή θα χρειαστεί 17sec για να εκφορτωθεί και αμέσως μετά θα επιστρέψει στη θέση της γερανογέφυρας για να παραλάβει το επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Τη χρονική στιγμή $t_{4-3}=3\text{min}$ το πρώτο φορτηγό είχε αναχωρήσει από τη γερανογέφυρα φορτωμένο για να πάει στο χώρο εναπόθεσης. Έφτασε τη χρονική στιγμή $t_{6-3}=7\text{min}$. Διένυσε 60m με ταχύτητα 15m/min. Δηλαδή χρειάστηκε 240sec ($=60 \cdot 60 / 15$) που επαληθεύεται από τη



Εικόνα Δ- 20: Χρονική στιγμή $t_{7-3}=7\text{min} \& 17\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

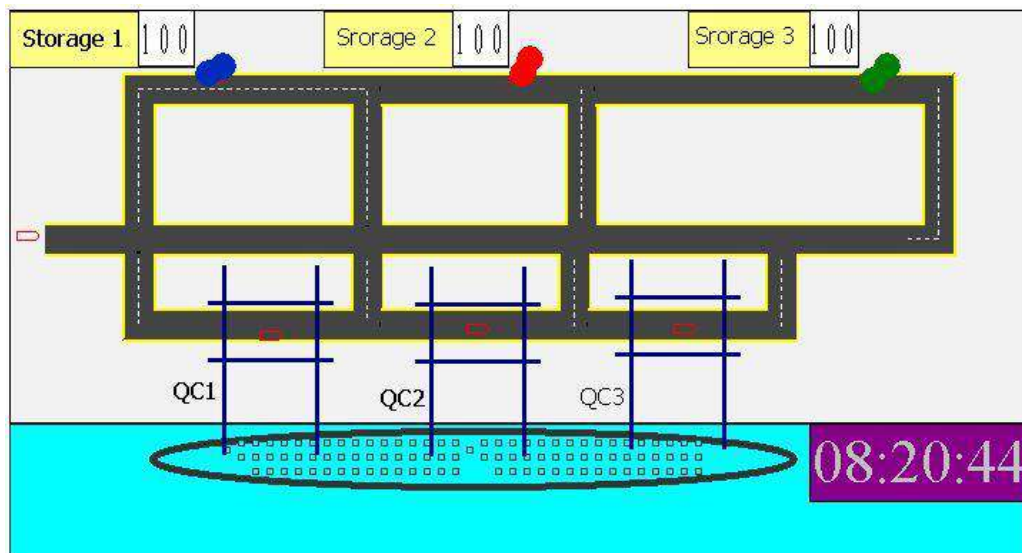
Ύστερα από 17sec το πρώτο φορτηγό έχει εκφορτωθεί και το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο έχει τοποθετηθεί στο χώρο προσωρινής αποθήκευσης (Storage 3). Ο μετρητής στο χώρο αποθήκευσης έχει την ένδειξη 1.



Εικόνα Δ- 21: Χρονική στιγμή $t_{8-3}=8\text{min} \ \& \ 13\text{sec}$ (Σενάριο ελέγχου #3)

Η επόμενη τυχαία χρονική στιγμή $t_{8-3}=8\text{min} \ \& \ 13\text{sec}$ δείχνει ότι μετά την εκφόρτωση, το πρώτο φορτηγό, θα επιστρέψει στη θέση της γερανογέφυρας κενό, ώστε να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο που περιμένει.

Οι διαδικασίες αυτές επαναλαμβάνονται συνεχώς μέχρι να εκφορτωθούν και τα 100 εμπορευματοκιβώτια. Στην Εικόνα Δ-22 φαίνεται η ολοκλήρωση του μοντέλου με την εκφόρτωση όλων των εμπορευματοκιβωτίων.



Εικόνα Δ- 22: Τέλος προσομοιωτικής διαδικασίας (Σενάριο ελέγχου #3)

Η εκφόρτωση του πλοίου ολοκληρώθηκε μετά από 8hr, 22min και 44sec. Ο βαθμός χρησιμοποίησης των γερανογεφυρών και των φορτηγών ήταν :

- Γερανογέφυρα 1 (QC1): 85,70%
- Γερανογέφυρα 2 (QC2): 72,69%
- Γερανογέφυρα 3 (QC3): 99,14%
- Φορτηγά 1 (YT1): 70,53%
- Φορτηγά 2 (YT2): 57,48%
- Φορτηγά 3 (YT3): 83,98%

Η διαδρομή που εκτελούσαν τα φορτηγά YT3 ήταν η μεγαλύτερη σε μήκος (60m) και τα εμπορευματοκιβώτια έπρεπε να περιμένουν περισσότερο για να εξυπηρετηθούν. Επομένως τα μεγάλα ποσοστά χρησιμοποίησης της γερανογέφυρας QC3 και των φορτηγών YT3, σε σχέση με τον υπόλοιπο εξοπλισμό, είναι λογικά και αναμενόμενα. Αντιθέτως η διαδρομή που εκτελούσαν τα φορτηγά YT2, ήταν η μικρότερη σε μήκος (40m) και τα εμπορευματοκιβώτια είχαν μικρότερους χρόνους αναμονής. Επομένως τα ποσοστά χρησιμοποίησης της γερανογέφυρας QC2 και των φορτηγών YT2 είναι ευλόγως μικρότερα.

Σενάριο ελέγχου #4

Ανάθεση ομάδας εξυπηρετητών σε γερανογέφυρες ίδιου ή διαφορετικών πλοίων (Pooled allocation)

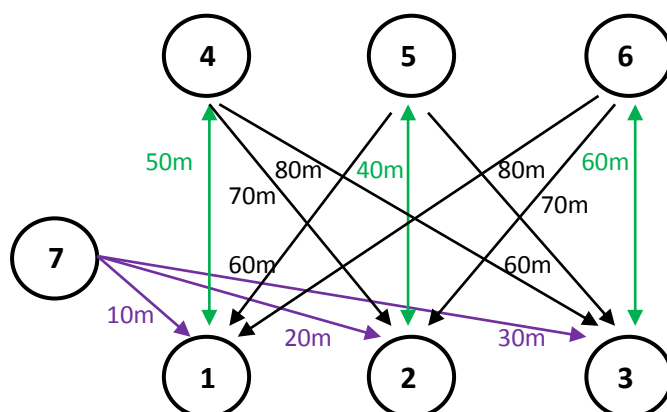
Στον έλεγχο αυτό, γίνεται προσομοίωση των διαδικασιών εκφόρτωσης ενός πλοίου που έχει παραβάλει σε μια θέση στο λιμάνι. Στο πλοίο έχουν εκχωρηθεί τρεις γερανογέφυρες, όπου η κάθε μια πρόκειται να εκφορτώσει 100 εμπορευματοκιβώτια από το πλοίο. Σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο, εδώ υπάρχει μια ομάδα από έξι φορτηγά (YTs) τα οποία θα εκχωρούνται στις γερανογέφυρες ανάλογα με κάποιους κανόνες. Οι κανόνες αυτοί είναι οι εξής:

- Cyclical: Τα φορτηγά θα επιλέγονται με κυκλική σειρά. Δηλαδή θα επιλέγεται το 1^ο, μετά το 2^ο, το 3^ο, το 4^ο, το 5^ο, το 6^ο και ύστερα πάλι το 1^ο κτλ. Όμως αν είναι σειρά να επιλεγεί το 3^ο και αυτό δεν είναι διαθέσιμο τότε επιλέγεται το 4^ο κλπ. Αν έχει επιλεγεί το 4^ο και ο εξυπηρετητής ολοκληρώσει την ενέργεια τότε η επόμενη ζήτηση του εκκινεί από το 5^ο φορτηγό.
- Random: Τα φορτηγά επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από έναν αριθμό διαθέσιμων φορτηγών.
- Preferred Order: Θα επιλέγεται πάντα το πρώτο διαθέσιμο φορτηγό. Δηλαδή θα ελέγχεται πρώτα αν είναι διαθέσιμο το 1^ο φορτηγό. Αν ναι θα επιλέγεται αυτό, αλλιώς θα ελέγχεται το 2^ο φορτηγό και αν είναι διαθέσιμο θα επιλέγεται αλλιώς θα γίνεται έλεγχος στο 3^ο κτλ. Όταν η ενέργεια ολοκληρωθεί, η επιλογή ξεκινά πάλι από το 1^ο φορτηγό και αν αυτό δεν είναι διαθέσιμο συνεχίζει στο επόμενο.
- Specific Member: Με τον κανόνα αυτό η κάθε γερανογέφυρα μπορεί να επιλέγει ένα ή περισσότερα συγκεκριμένα φορτηγά για να την εξυπηρετήσει. Για παράδειγμα μια γερανογέφυρα μπορεί να επιθυμεί να εξυπηρετείται μόνο από το 3^ο φορτηγό.
- Largest Distance: Με τον κανόνα αυτό, όταν υπάρχει ένας αριθμός φορτηγών που είναι διαθέσιμα τότε θα επιλέγεται το φορτηγό που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση. Σε συγκεκριμένη λειτουργική μονάδα συμπληρώνονται οι αποστάσεις των σταθμών, με βάση τη διαδρομή που ακολουθείται για να φτάσουν τα οχήματα μεταφορά στους σταθμούς.
- Smallest Distance: Με τον κανόνα αυτό, όταν υπάρχει ένας αριθμός φορτηγών που είναι διαθέσιμα τότε θα επιλέγεται το φορτηγό που βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση.

Υπάρχουν τρεις χώροι εναπόθεσης των εμπορευματοκιβωτίων που αντιστοιχούν σε κάθε γερανογέφυρα. Κάθε γερανογέφυρα χρειάζεται 50sec για να παραλάβει ένα εμπορευματοκιβώτιο και 10sec για να το φορτώσει στο φορτηγό. Επίσης τα φορτηγά κινούνται όλα με ταχύτητα 15m/min και χρειάζονται 17sec ώστε να εκφορτωθούν στο χώρο προσωρινής αποθήκευσης των εμπορευματοκιβωτίων. Ο χώρος που φορτώνονται τα φορτηγά κάτω από τη 1^η γερανογέφυρα (QC1) είναι ο σταθμός 1 (Station 1) και στις επόμενες εικόνες συμβολίζεται με τον αριθμό 1. Αντίστοιχα υπάρχουν οι αριθμοί 2 και 3. Ο χώρος που εκφορτώνονται τα εμπορευματοκιβώτια από τη 1^η (QC1) είναι ο σταθμός 4 (Station 4) και συμβολίζεται με τον αριθμό 4. Αντίστοιχα υπάρχουν και οι αριθμοί 5 και 6. Στην αρχή του μοντέλου, όλα τα φορτηγά

βρίσκονται σε μια αρχική θέση που ονομάζεται σταθμός 7 (Station 7) και συμβολίζεται με τον αριθμό 7. Οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών είναι οι εξής:

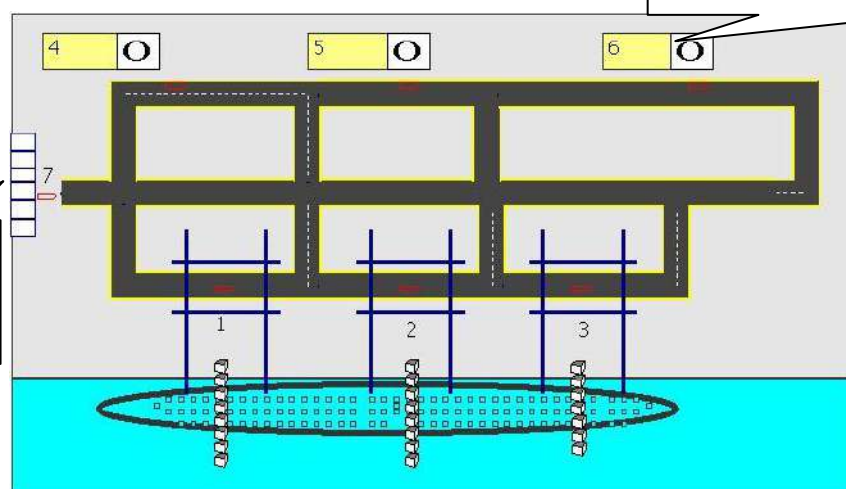
- Σταθμός 7 – Σταθμός 1 = 10m
- Σταθμός 7 – Σταθμός 2 = 20m
- Σταθμός 7 – Σταθμός 3 = 30m
- Σταθμός 1 – Σταθμός 4 = 50m
- Σταθμός 2 – Σταθμός 5 = 40m
- Σταθμός 3 – Σταθμός 6 = 60m
- Σταθμός 4 – Σταθμός 1 = 50m
- Σταθμός 5 – Σταθμός 2 = 40m
- Σταθμός 6 – Σταθμός 3 = 60m
- Σταθμός 4 – Σταθμός 2 = 70m
- Σταθμός 4 – Σταθμός 3 = 80m
- Σταθμός 5 – Σταθμός 1 = 60m
- Σταθμός 5 – Σταθμός 3 = 60m
- Σταθμός 6 – Σταθμός 1 = 80m
- Σταθμός 6 – Σταθμός 2 = 70m



Στο μοντέλο αυτό δεν θα εξεταστούν οι χρόνοι και η σειρά των διαδικασιών που συμβαίνουν διότι ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο μοντέλο. Θα εξεταστούν οι κανόνες επιλογής των φορτηγών και θα επαληθευτεί ότι τηρούνται σε κάθε περίπτωση.

Στην Εικόνα Δ-23 φαίνεται το animation που έχει πραγματοποιηθεί για το μοντέλο και οι συμβολισμοί για τους σταθμούς. Η ομάδα των έξι φορτηγών φαίνεται στο αριστερό μέρος της εικόνας. Είναι σταθμευμένα στο σταθμό 7 και αναπαριστώνται με λευκά ορθογώνια. Στα δεξιά της εικόνας έχουν τοποθετηθεί έξι κουτάκια τα οποία δείχνουν κάθε στιγμή που βρίσκεται ή που έχει εκχωρηθεί να πάει κάθε ένα φορτηγό. Στη συνέχεια στην Εικόνα Δ-24 φαίνεται η κατασκευή του μοντέλου. Η λειτουργική μονάδα που ζητάει φορτηγά σε κάποιο σταθμό (Request module) έχει κανόνα επιλογής τον κυκλικό. Σε παραδείγματα που θα γίνουν παρακάτω για τον έλεγχο των κανόνων, ο κανόνας θα αλλάζει.

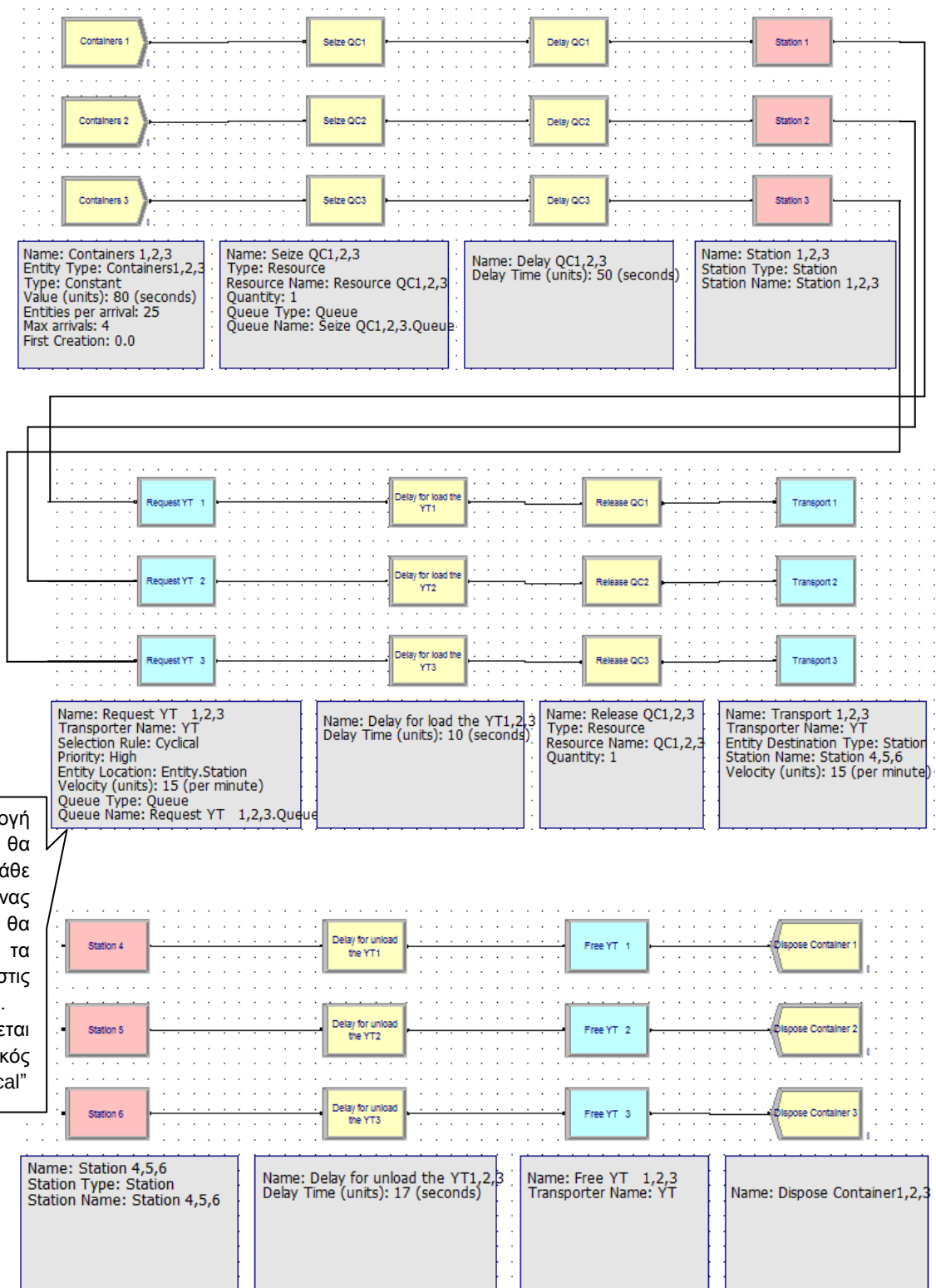
Η μεταβλητή αυτή δείχνει πόσα ε/κ έχουν τοποθετηθεί στο χώρο στοιβάσεως μετά την εκφόρτωση τους από το πλοίο



YT-1	YT-2	YT-3
7	7	7
YT-4	YT-5	YT-6
7	7	7
00:00:00		

Η μεταβλητή αυτή δείχνει σε πιο σταθμό βρίσκεται ή έχει εκχωρηθεί να πάει το YT-6 κάθε χρονική στιγμή

Εικόνα Δ- 23: Εικόνα του συστήματος τη χρονική στιγμή t=0 (Σενάριο ελέγχου #4)



Η επιλογή του τύπου των YT ως "Free Path" δηλώνει ότι ο χρόνος για να μετακινηθούν από ένα σταθμό σε ένα άλλο εξαρτάται μόνο από δύο παράγοντες: την απόσταση των σταθμών και την ταχύτητα τους.

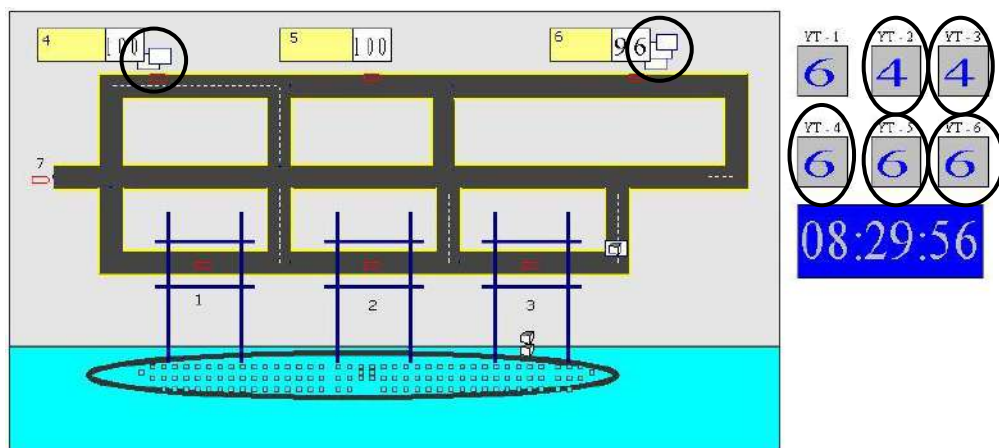
Transporter - Advanced Transfer								
	Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	Report Statistics
1	YT	6	Free Path	YT.Distance	15	Per Minute	1 rows	☒

Distance - Advanced Transfer		
	Name	Stations
1	YT.Distance	15 rows

Στην επιλογή "Distance" προσδιορίζονται οι αποστάσεις στο εσωτερικό οδικό δίκτυο της λιμενικής εγκατάστασης.

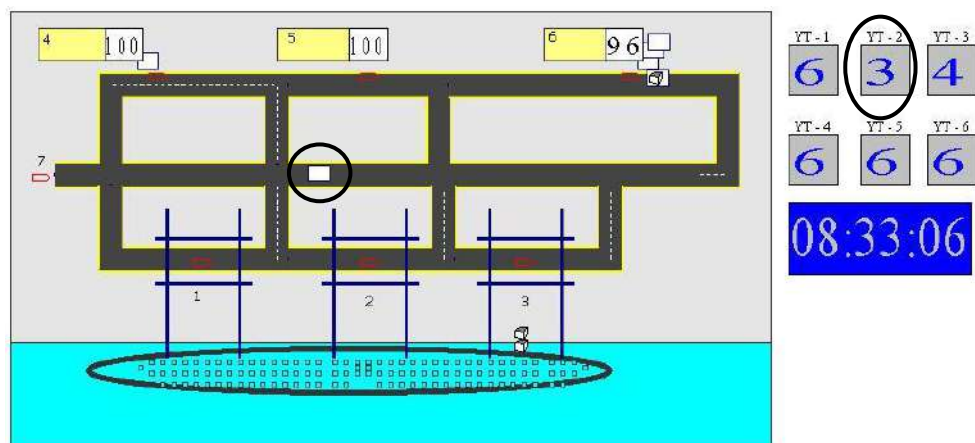
Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Station 7	Station 1	10
2	Station 7	Station 2	20
3	Station 7	Station 3	30
4	Station 1	Station 4	50
5	Station 4	Station 1	50
6	Station 2	Station 5	40
7	Station 5	Station 2	40
8	Station 3	Station 6	60
9	Station 6	Station 3	60
10	Station 4	Station 2	70
11	Station 6	Station 1	80
12	Station 4	Station 3	80
13	Station 6	Station 2	70
14	Station 5	Station 1	60
15	Station 5	Station 3	60

Εικόνα Δ- 24: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης (Σενάριο ελέγχου #4)

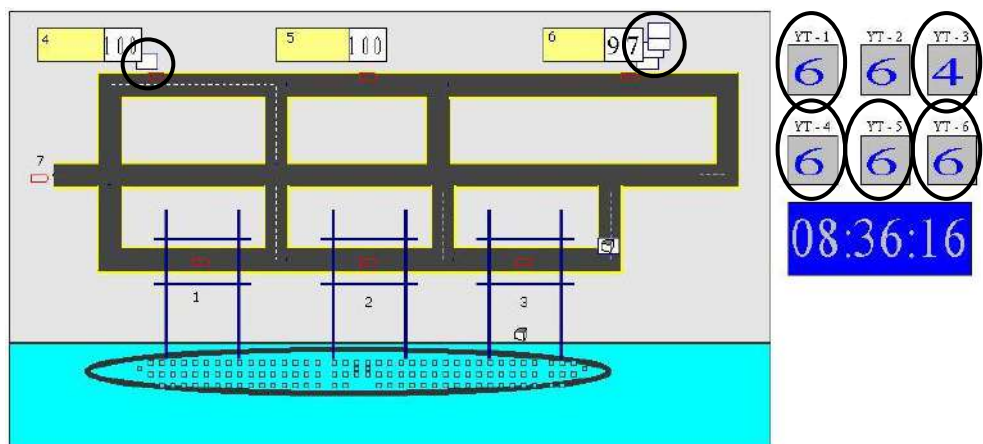


Εικόνα Δ- 27: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 29min & 56sec

Τη χρονική στιγμή 08:29:56 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-2 και YT-3 στο σταθμό 4 και YT-4, YT-5, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-1 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-28 επιλέχτηκε το YT-2 από το σταθμό 4 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Τηρήθηκε η κυκλική σειρά.

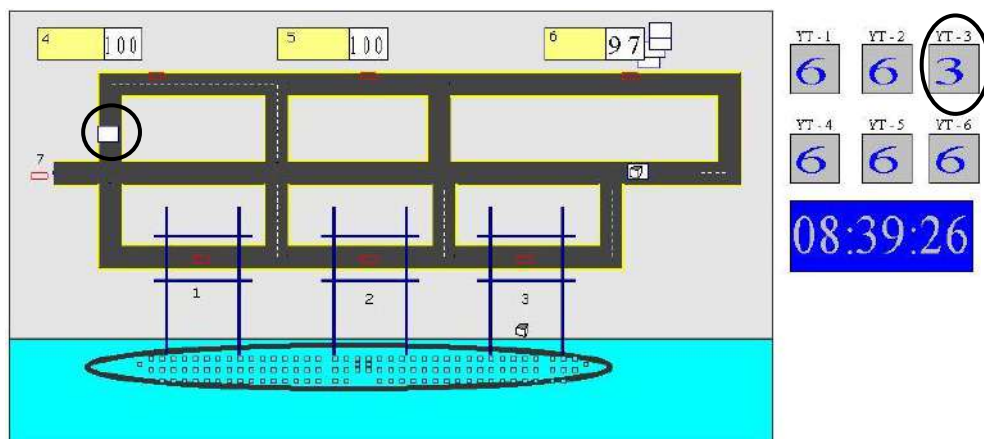


Εικόνα Δ- 28: Το YT-2 κατευθύνεται προς το σταθμό 3 (cyclical)

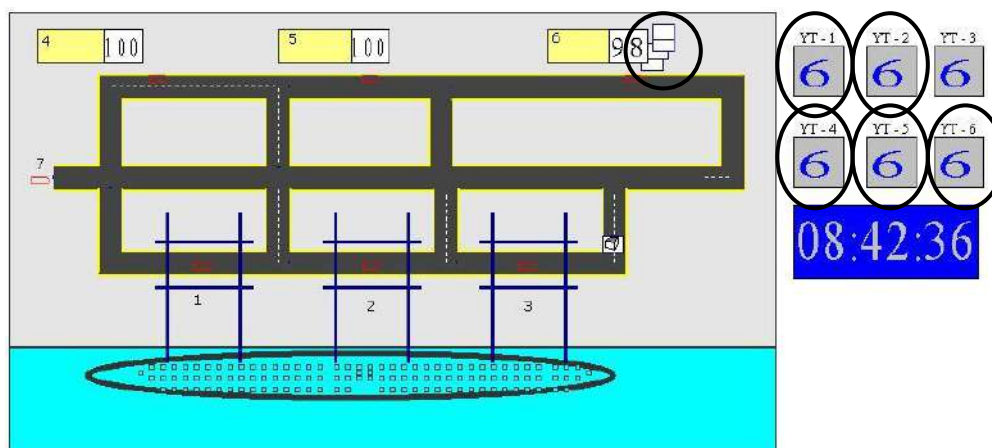


Εικόνα Δ- 29: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 36min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 08:36:16 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-3 στο σταθμό 4 και YT-1, YT-4, YT-5, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-2 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-30 επιλέχθηκε το YT-3 από το σταθμό 4 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Τηρήθηκε η κυκλική σειρά.

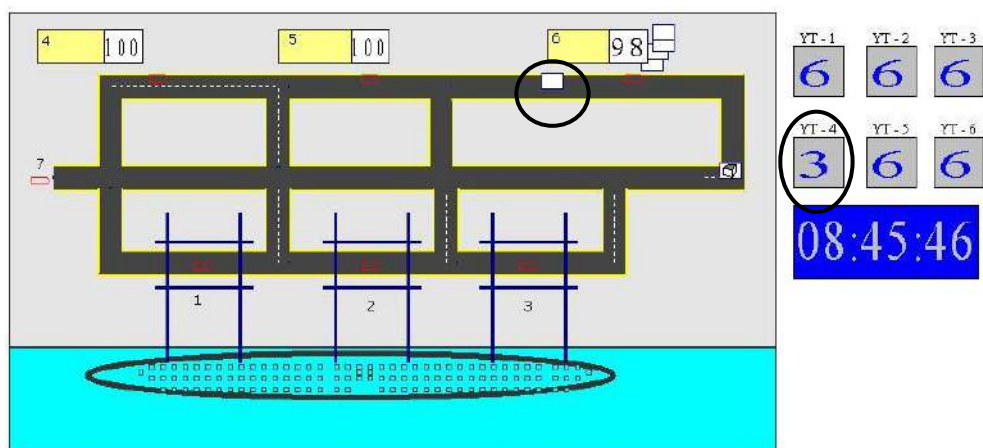


Εικόνα Δ- 30: Το YT-3 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (cyclical)



Εικόνα Δ- 31: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 42min & 36sec

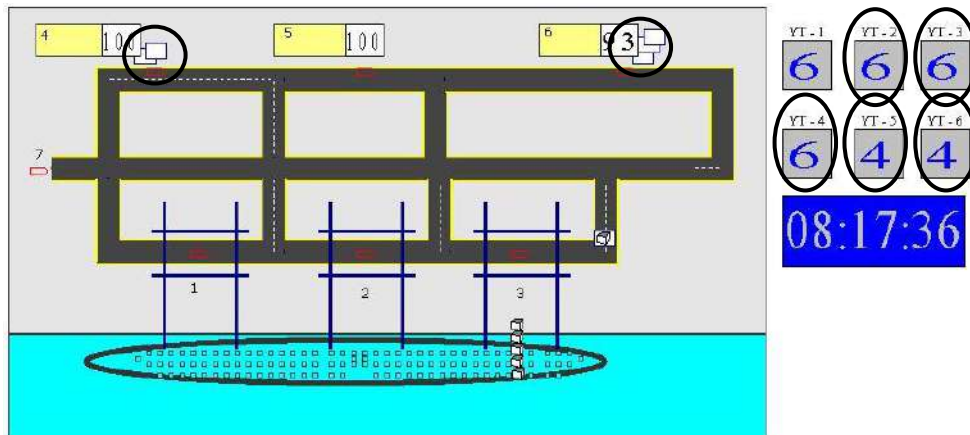
Τη χρονική στιγμή 08:42:36 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-1, YT-2, YT-4, YT-5, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-3 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-32 επιλέχτηκε το YT-4 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Τηρήθηκε η κυκλική σειρά.



Εικόνα Δ- 32: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (cyclical)

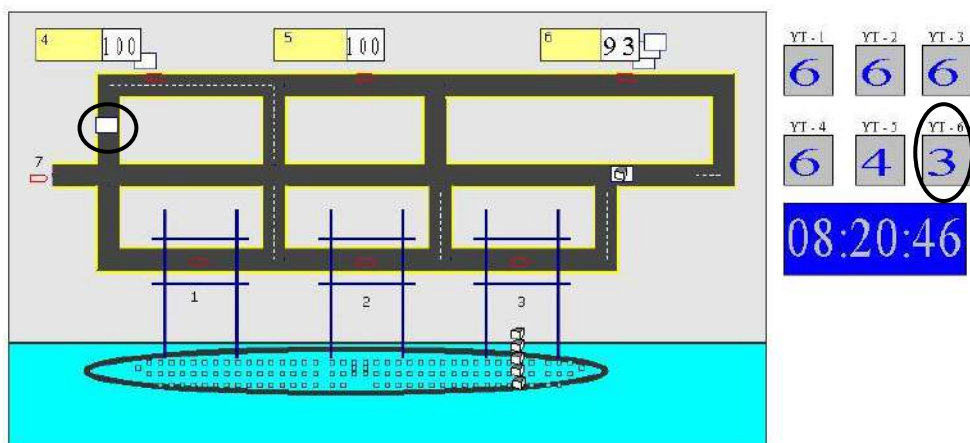
Κανόνας επιλογής: Τυχαίος (Random)

Τα φορτηγά θα επιλέγονται με τυχαίο τρόπο από έναν αριθμό διαθέσιμων φορτηγών.

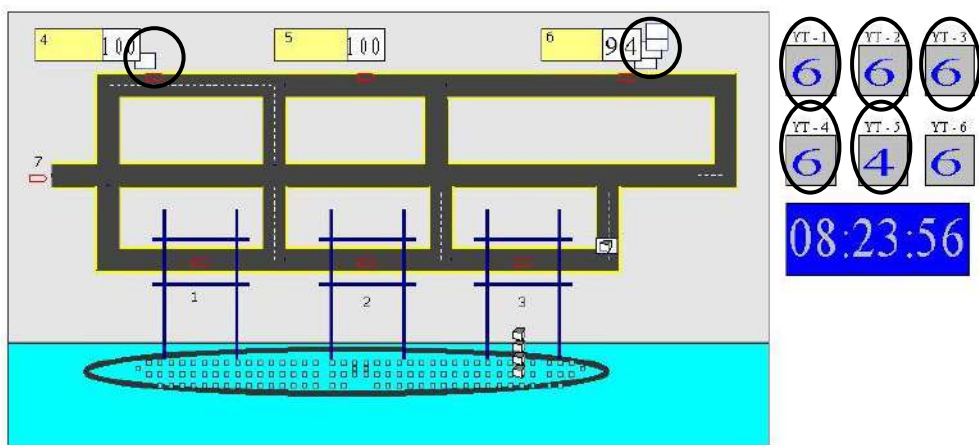


Εικόνα Δ- 33: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 17min & 36sec

Τη χρονική στιγμή 08:17:36 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5, YT-5, στο σταθμό 4 και τα YT-2, YT-3, YT-4 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-1 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-34 επιλέχτηκε το YT-6 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3.

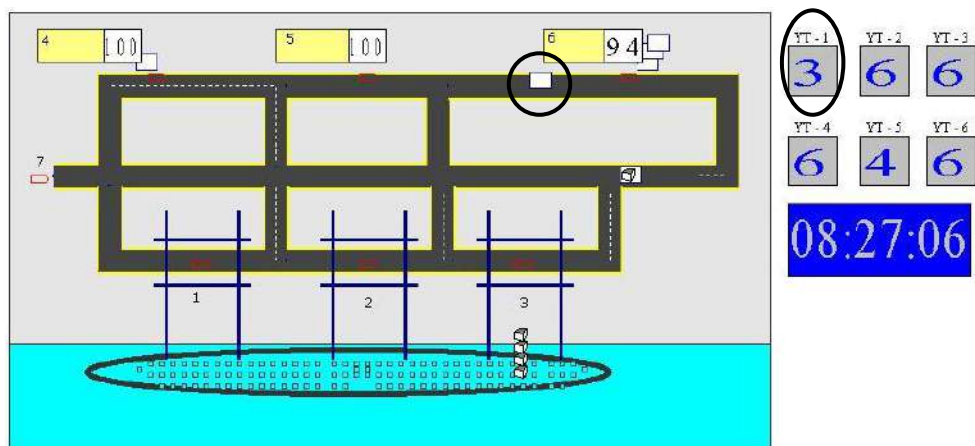


Εικόνα Δ- 34: Το YT-6 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random)

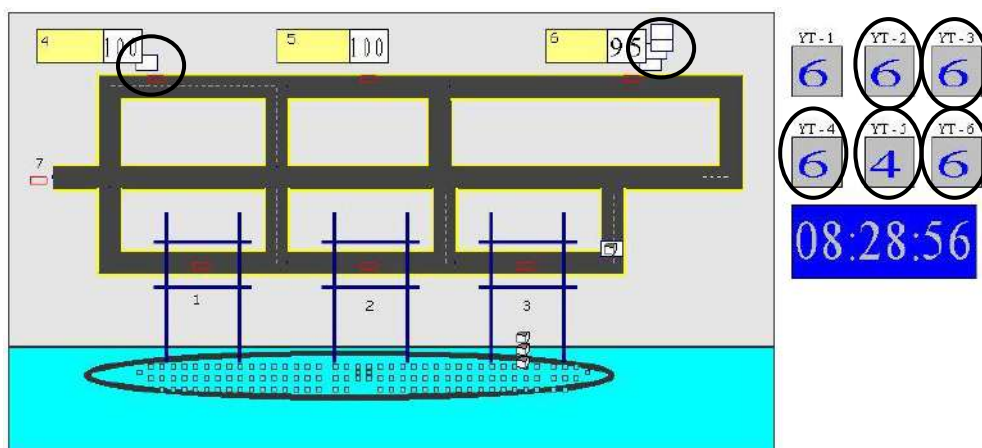


Εικόνα Δ- 35: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 23min & 56sec

Τη χρονική στιγμή 08:23:56 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-1, YT-2, YT-3, YT-4 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-6 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-36 επιλέχτηκε το YT-1 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3.

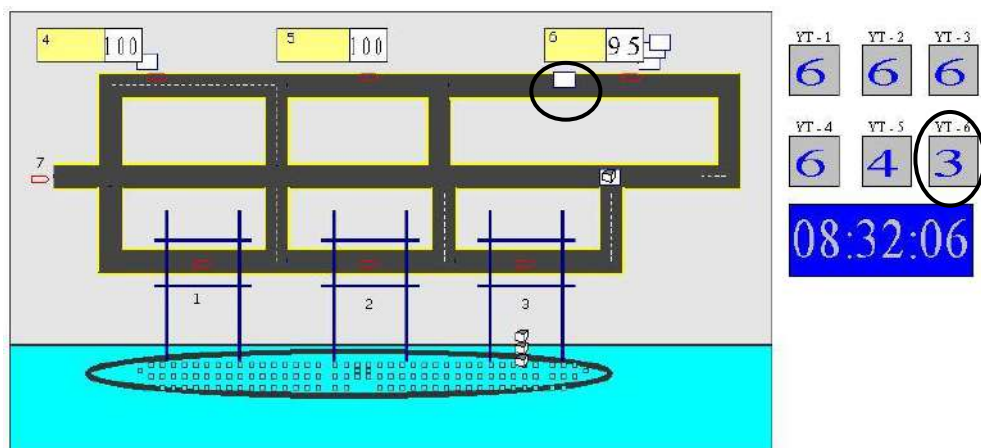


Εικόνα Δ- 36: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random)

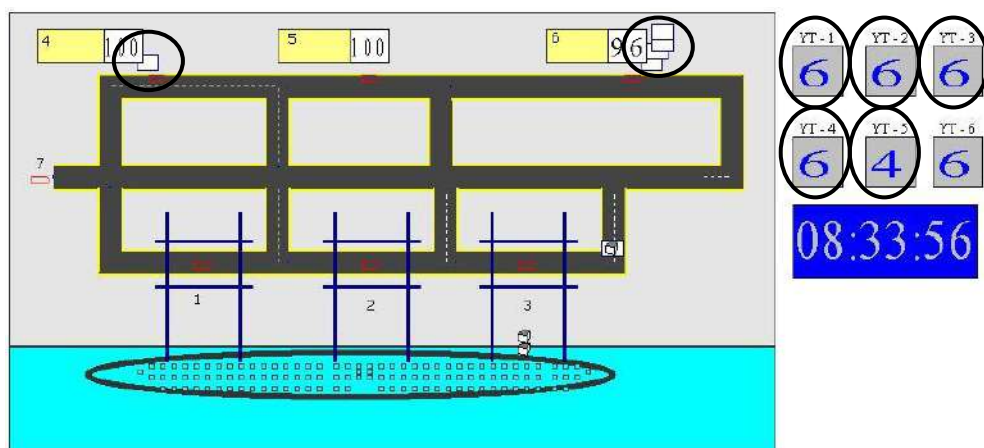


Εικόνα Δ- 37: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 28min & 56sec

Τη χρονική στιγμή 08:28:56 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-2, YT-3, YT-4, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-1 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-38 επιλέχτηκε το YT-6 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3.

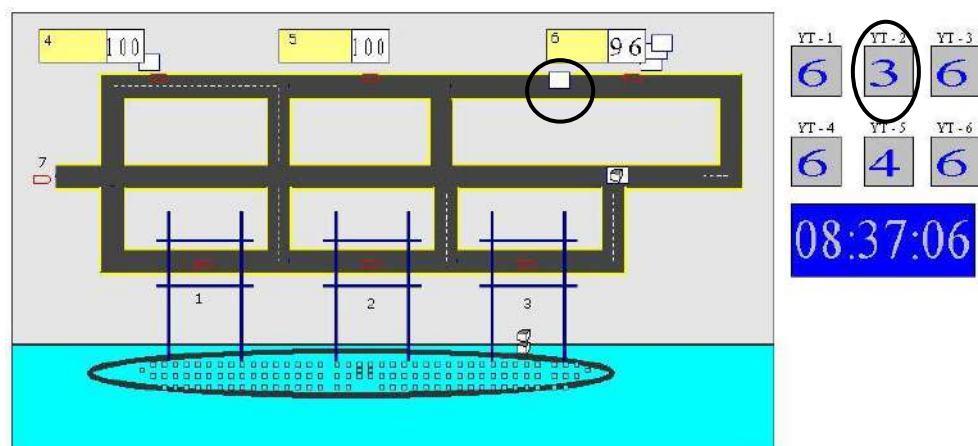


Εικόνα Δ- 38: Το YT-6 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random)

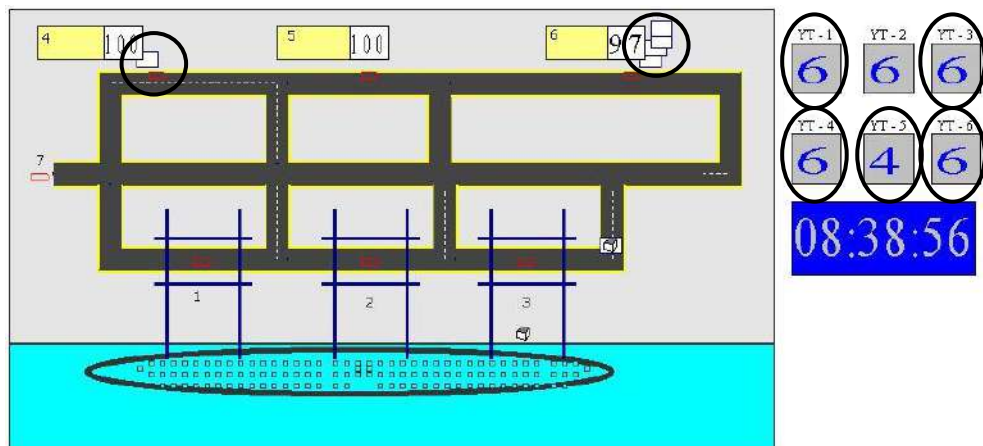


Εικόνα Δ- 39: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 33min & 56sec

Τη χρονική στιγμή 08:33:56 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-1, YT-2, YT-3, YT-4 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-6 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-40 επιλέχτηκε το YT-2 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3.

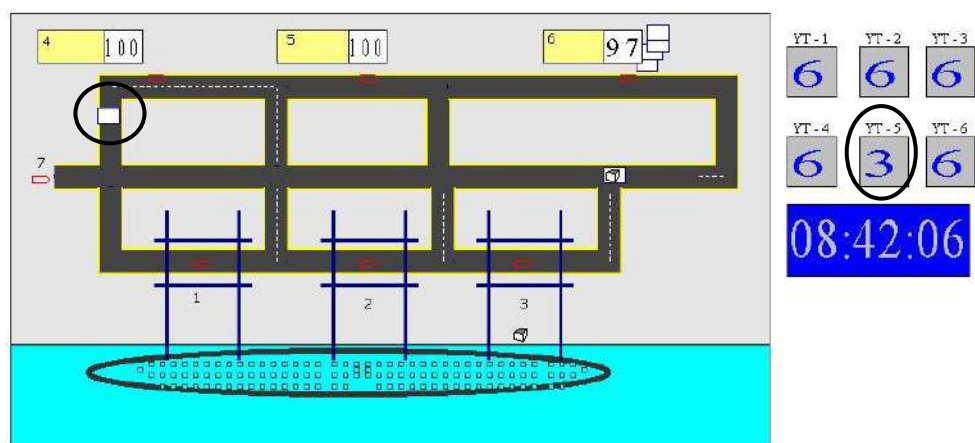


Εικόνα Δ- 40: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random)

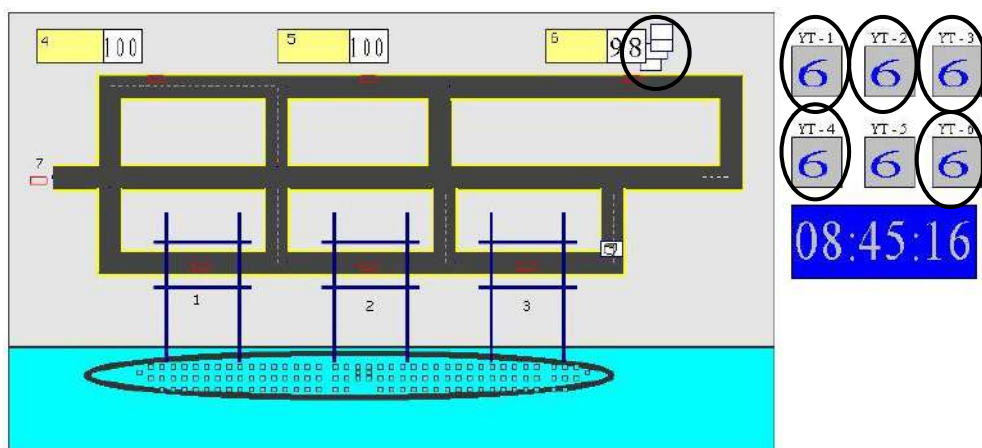


Εικόνα Δ- 41: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 38min & 56sec

Τη χρονική στιγμή 08:38:56 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-1, YT-3, YT-4, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-2 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-42 επιλέχτηκε το YT-5 από το σταθμό 4 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3.

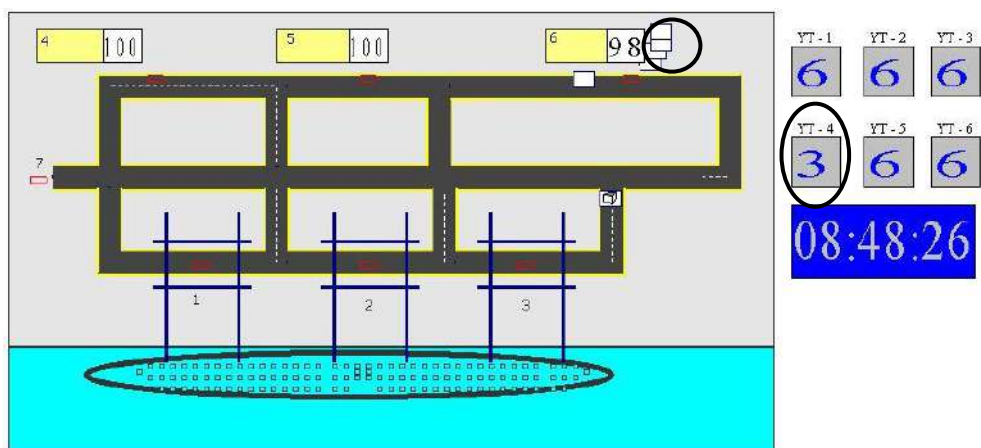


Εικόνα Δ- 42: Το YT-5 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random)



Εικόνα Δ- 43: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 45min & 16sec

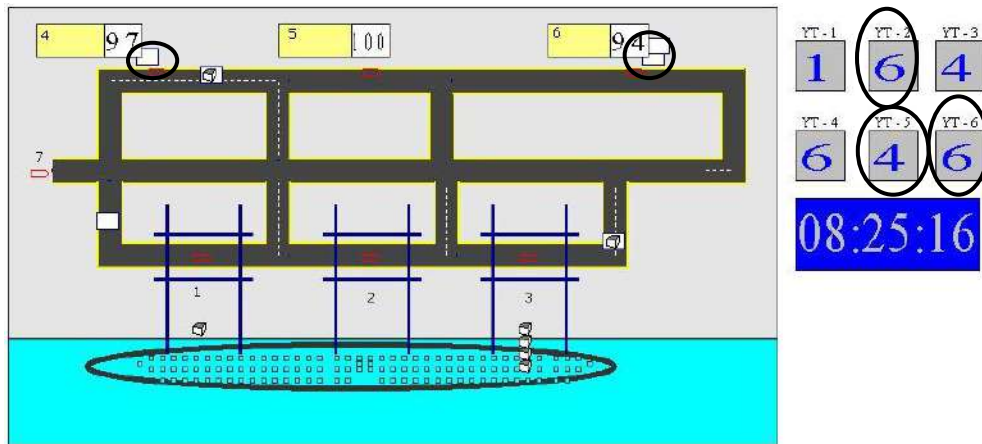
Τη χρονική στιγμή 08:45:16 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-1, YT-2, YT-3, YT-4, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-5 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-44 επιλέχτηκε το YT-4 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Οι επιλογές των φορτηγών δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη αλληλουχία, επομένως επαληθεύεται η τυχαιότητα.



Εικόνα Δ- 44: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (random)

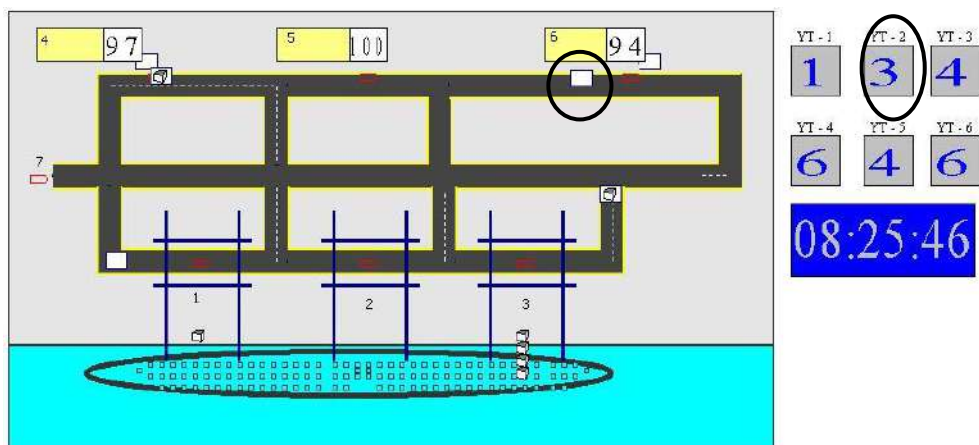
Κανόνας επιλογής: Το πρώτο διαθέσιμο (Preferred Order)

Θα επιλέγεται πάντα το πρώτο διαθέσιμο φορτηγό. Δηλαδή θα ελέγχεται πρώτα αν είναι διαθέσιμο το 1^ο φορτηγό. Αν ναι θα επιλέγεται αυτό, αλλιώς θα ελέγχεται το 2^ο φορτηγό και αν είναι διαθέσιμο θα επιλέγεται αλλιώς θα γίνεται έλεγχος στο 3^ο κτλ.

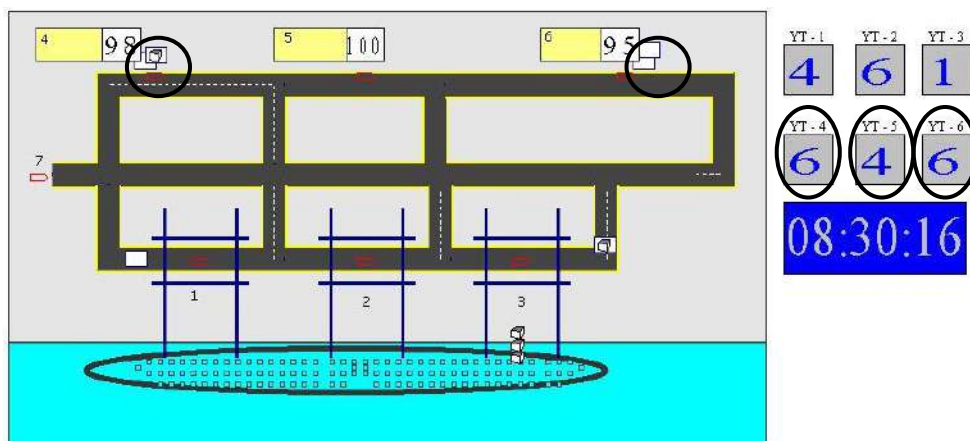


Εικόνα Δ- 45: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 25min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 08:25:16 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-2, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-4 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-46 επιλέχτηκε το YT-2 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Το YT-1 δεν ήταν διαθέσιμο γι αυτό και επιλέχτηκε το αμέσως επόμενο διαθέσιμο φορτηγό, δηλαδή το YT-2. Επαληθεύεται ο κανόνας.

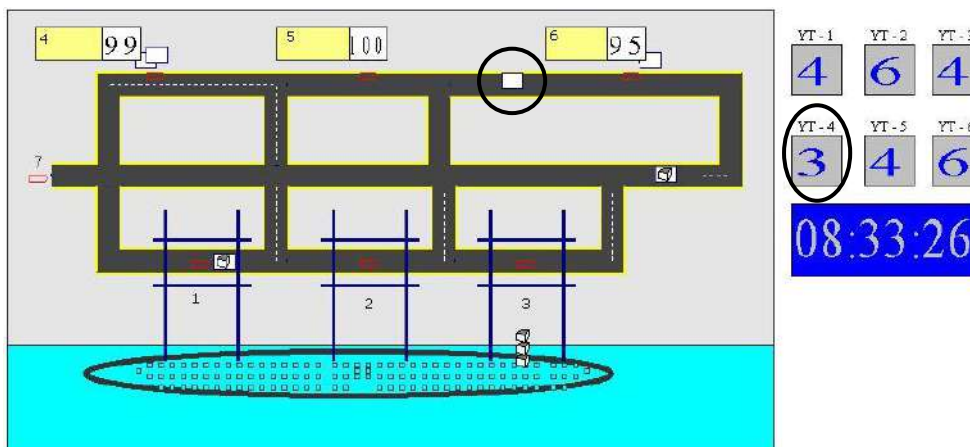


Εικόνα Δ- 46: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order)

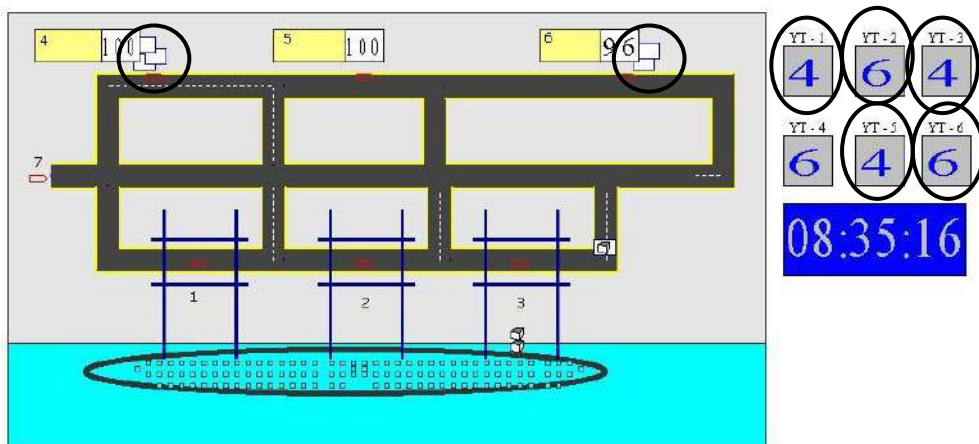


Εικόνα Δ- 47: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 30min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 08:30:16 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-4, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-2 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-48 επιλέχτηκε το YT-4 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Εφόσον τα τρία πρώτα φορτηγά (YT-1, YT-2, YT-3) δεν είναι διαθέσιμα επιλέγεται το αμέσως επόμενο φορτηγό που είναι διαθέσιμο, δηλαδή το YT-4. Επαληθεύεται ο κανόνας.

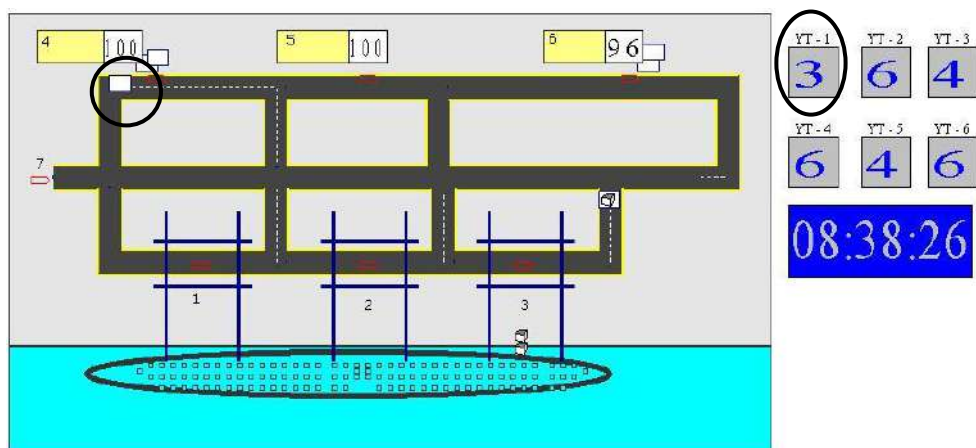


Εικόνα Δ- 48: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order)

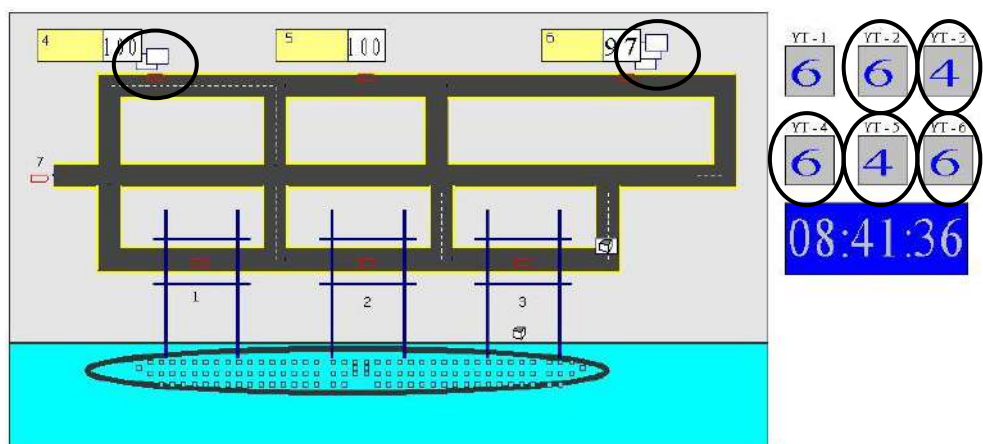


Εικόνα Δ- 49: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 35min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 08:35:16 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-1, YT-3, YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-2, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-4 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-50 επιλέχτηκε το YT-1 από το σταθμό 4 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Επιλέχτηκε δηλαδή το πρώτο διαθέσιμο φορτηγό, το YT-1. Επαληθεύεται ο κανόνας.

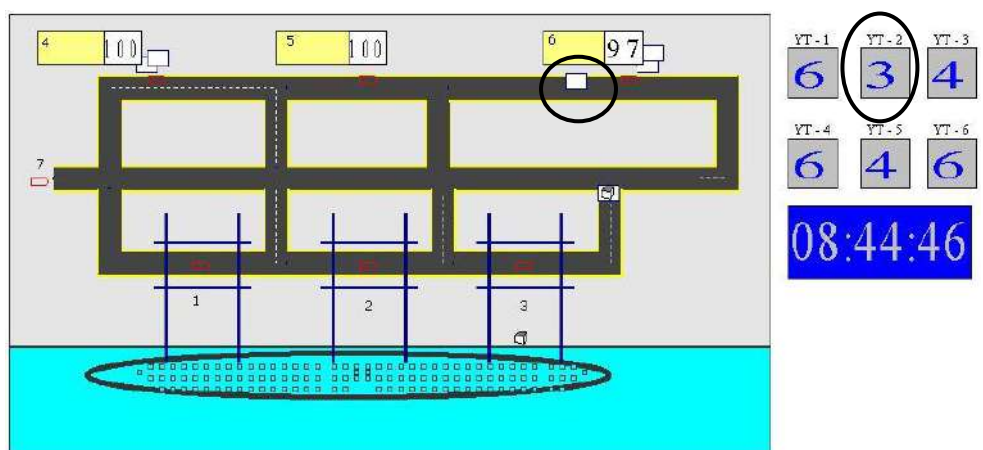


Εικόνα Δ- 50: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order)

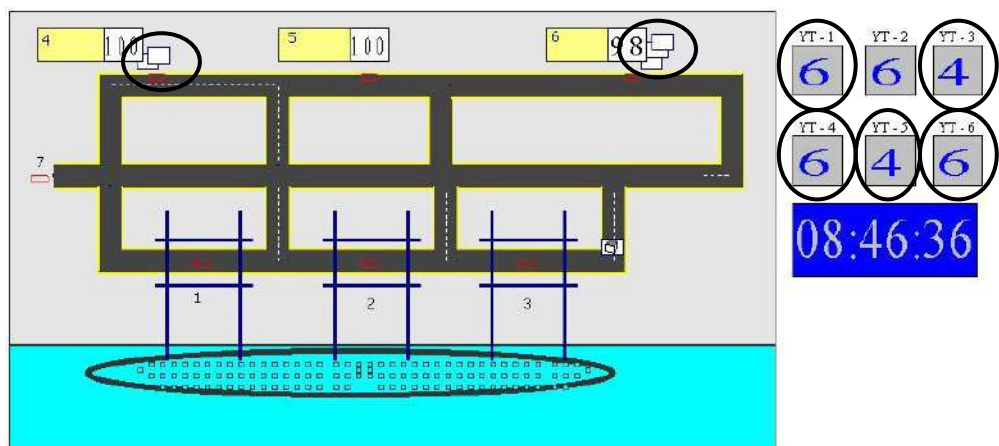


Εικόνα Δ- 51: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 41min & 36sec

Τη χρονική στιγμή 08:41:36 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-3, YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-2, YT-4, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-1 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-52 επιλέχτηκε το YT-2 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Εφόσον δεν ήταν διαθέσιμο το πρώτο φορτηγό (YT-1) επιλέχτηκε το αμέσως επόμενο φορτηγό, δηλαδή το YT-2. Επαληθεύεται ο κανόνας.

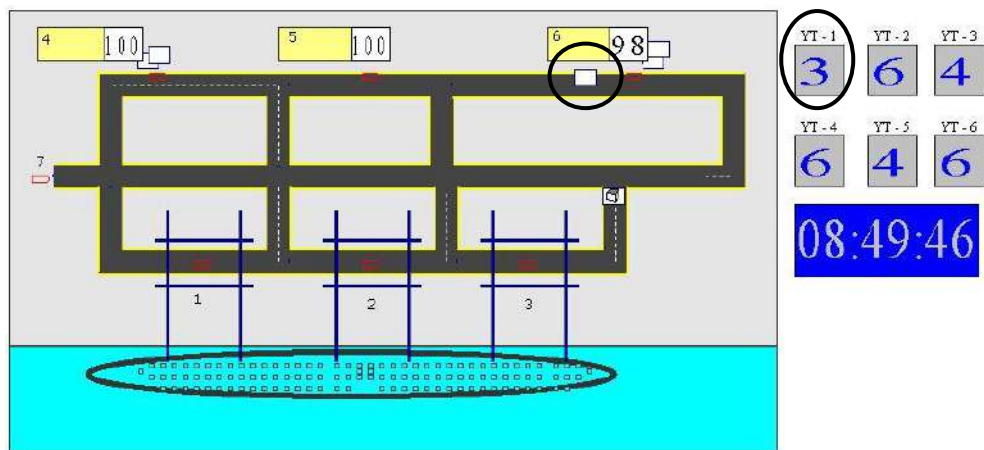


Εικόνα Δ- 52: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order)



Εικόνα Δ- 53: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 46min & 36sec

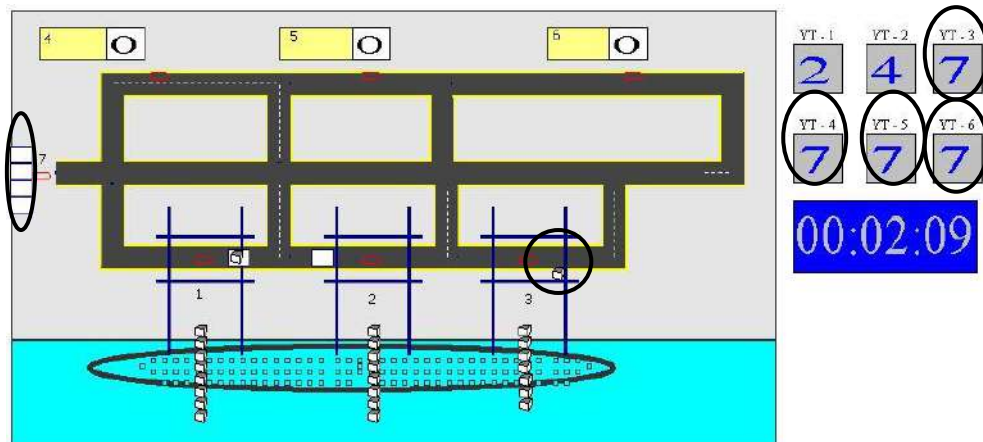
Τη χρονική στιγμή 08:46:36 γίνεται αίτημα από το σταθμό 3 για φορτηγό, για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-3, YT-5 στο σταθμό 4 και τα YT-1, YT-4, YT-6 στο σταθμό 6. Το φορτηγό που χρησιμοποιήθηκε τελευταίο στο σταθμό 3 είναι το YT-2 το οποίο έχει παραλάβει εμπορευματοκιβώτιο και κατευθύνεται προς το σταθμό 6 για να εκφορτωθεί. Τελικά όπως δείχνει και η Εικόνα Δ-54 επιλέχτηκε το YT-1 από το σταθμό 6 να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Επιλέχτηκε το πρώτο διαθέσιμο φορτηγό, το YT-1. Επαληθεύεται ο κανόνας.



Εικόνα Δ- 54: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (preferred order)

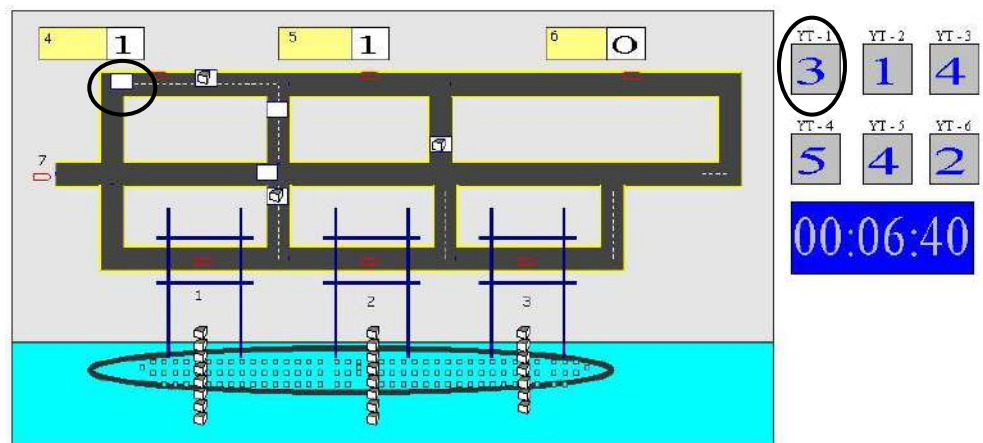
Κανόνας επιλογής: Συγκεκριμένο μέλος (Specific member)

Με τον κανόνα αυτό η κάθε γερανογέφυρα μπορεί να επιλέγει κάποιο συγκεκριμένο φορτηγό για να την εξυπηρετήσει.

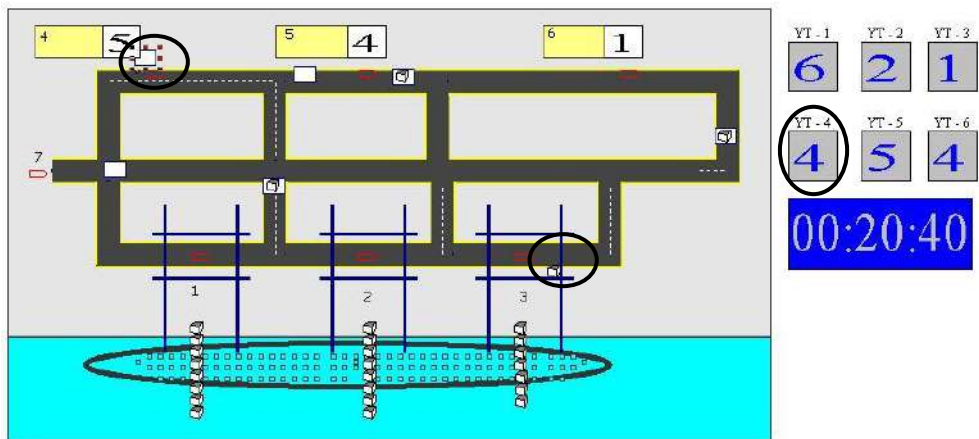


Εικόνα Δ- 55: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 2min & 9sec

Τη χρονική στιγμή 00:02:09 έχει γίνει αίτημα για φορτηγό, από το σταθμό 3 για να παραληφθεί το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο. Ο σταθμός 3 όμως μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο από το φορτηγό 1 (YT-1), το οποίο είναι απασχολημένο από το σταθμό 1. Παρόλο λοιπόν που υπάρχουν διαθέσιμα φορτηγά και συγκεκριμένα υπάρχουν τα YT-3, YT-4, YT-5, YT-6 στο σταθμό 7, δεν εκχωρείται κανένα στο σταθμό 3. Μόλις το YT-1 γίνει διαθέσιμο τότε θα μπορέσει να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ-56, το YT-1 εκφόρτωσε ένα εμπορευματοκιβώτιο στο σταθμό 4, έγινε διαθέσιμο και αμέσως εκχωρήθηκε στο σταθμό 3. Επομένως επαληθεύεται ο κανόνας.

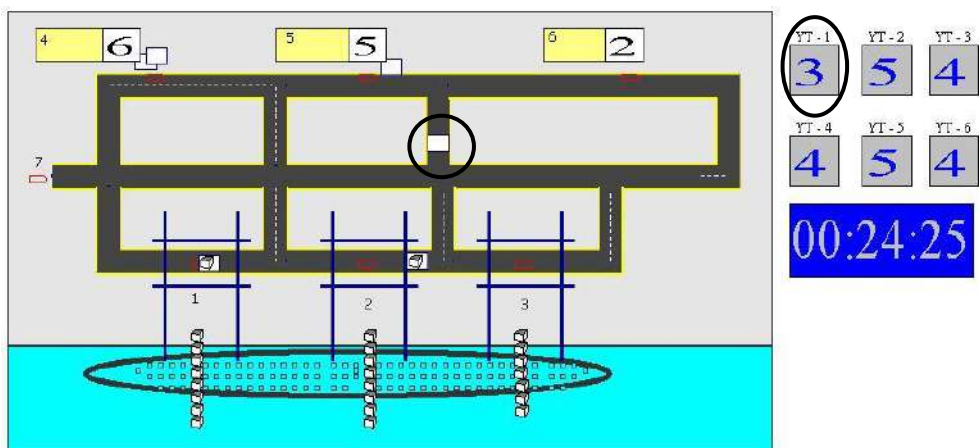


Εικόνα Δ- 56: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (specific member)



Εικόνα Δ- 57: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 20min & 40sec

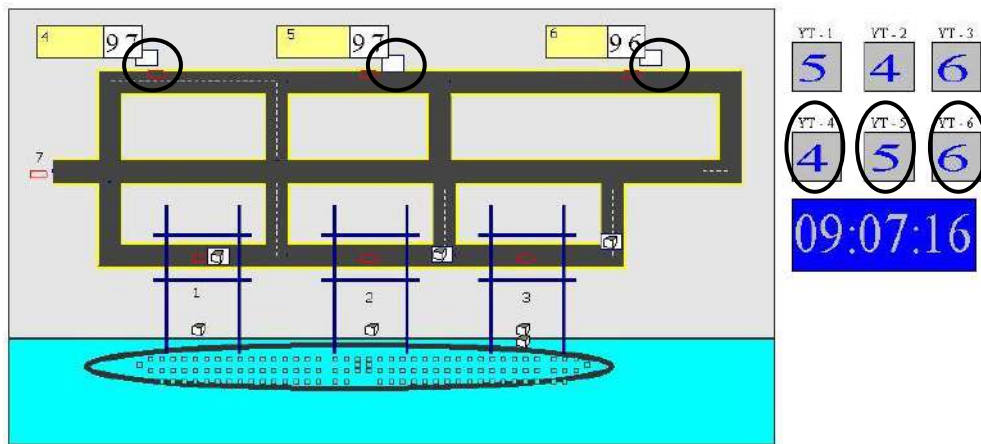
Τη χρονική στιγμή 00:20:40 έχει γίνει αίτημα για φορτηγό, από το σταθμό 3 για να παραληφθεί επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Ο σταθμός 3 όμως μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο από το φορτηγό 1 (YT-1), το οποίο είναι απασχολημένο. Παρόλο λοιπόν που υπάρχει διαθέσιμο φορτηγό και συγκεκριμένα υπάρχει το YT-4 στο σταθμό 4, δεν εκχωρείται στο σταθμό 3. Μόλις το YT-1 γίνει διαθέσιμο τότε θα μπορέσει να εξυπηρετήσει το σταθμό 3. Όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ-58, το YT-1 εκφόρτωσε ένα εμπορευματοκιβώτιο στο σταθμό 6, έγινε διαθέσιμο και αμέσως εκχωρήθηκε στο σταθμό 3. Επομένως επαληθεύεται ο κανόνας.



Εικόνα Δ- 58: Το YT-1 κατευθύνεται πάλι στο σταθμό 3 (specific order)

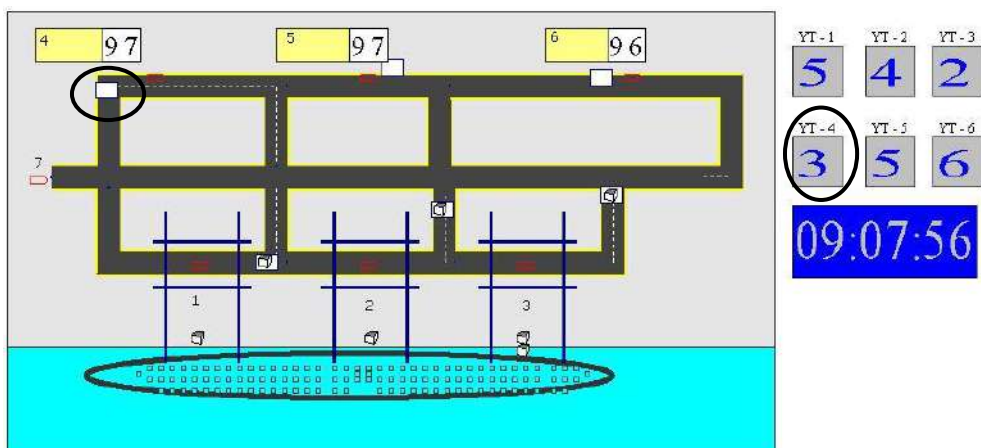
Κανόνας επιλογής: Μεγαλύτερη απόσταση (Largest distance)

Με τον κανόνα αυτό, όταν υπάρχει ένας αριθμός φορτηγών που είναι διαθέσιμα τότε θα επιλέγεται το φορτηγό που βρίσκεται πιο μακριά. Το φορτηγό δηλαδή που έχει να διανύσει τη μεγαλύτερη απόσταση.

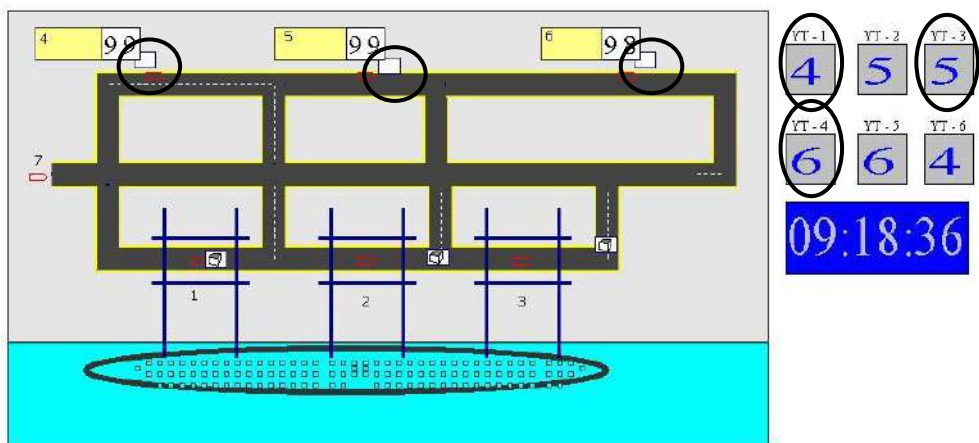


Εικόνα Δ- 59: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 9hr & 7min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 09:07:16 γίνεται αίτημα για φορτηγό, από το σταθμό 3 για να παραληφθεί επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-4 στο σταθμό 4, YT-5 στο σταθμό 5 και YT-6 στο σταθμό 6. Έχει οριστεί στο πρόγραμμα να επιλέγεται το φορτηγό που θα έχει να διανύσει τη μεγαλύτερη απόσταση. Το YT-4 απέχει 80m από το σταθμό 3, το YT-5 απέχει 60m από το σταθμό 3 και το YT-6 απέχει 60m από το σταθμό 3. Όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ-60, επιλέχτηκε τελικά το YT-4 που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση. Επομένως επαληθεύεται ο κανόνας.

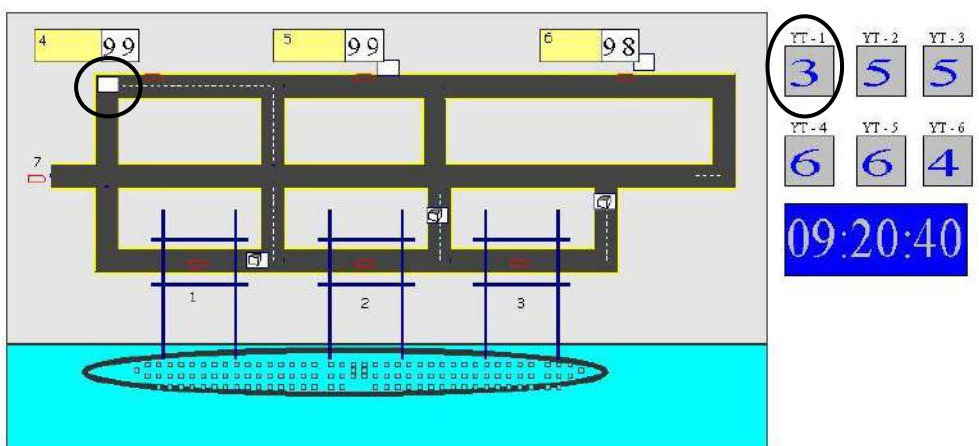


Εικόνα Δ- 60: Το YT-4 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (largest distance)



Εικόνα Δ- 61: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 9hr & 18min & 36sec

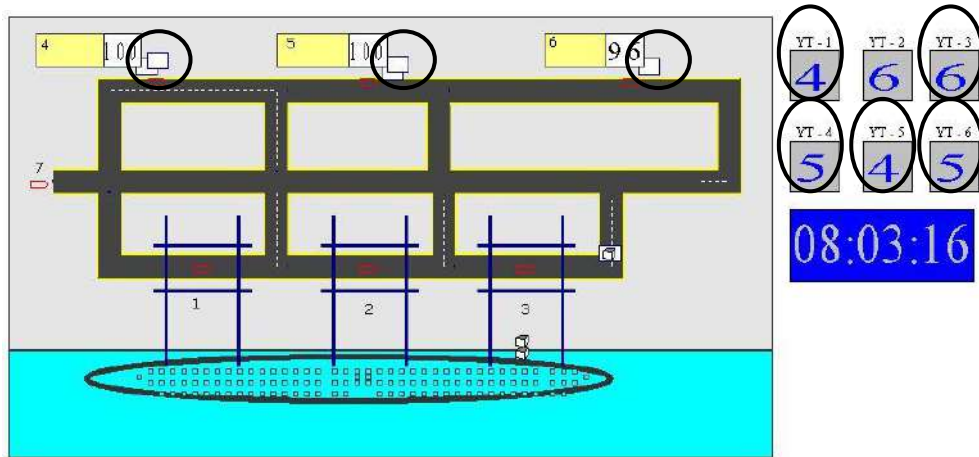
Τη χρονική στιγμή 09:18:36 γίνεται αίτημα για φορτηγό, από το σταθμό 3 για να παραληφθεί επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-1 στο σταθμό 4, YT-3 στο σταθμό 5 και YT-4 στο σταθμό 6. Έχει οριστεί στο πρόγραμμα να επιλέγεται το φορτηγό που θα έχει να διανύσει τη μεγαλύτερη απόσταση. Το YT-1 απέχει 80m από το σταθμό 3, το YT-3 απέχει 60m από το σταθμό 3 και το YT-4 απέχει 60m από το σταθμό 3. Όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ-62, επιλέχτηκε τελικά το YT-1 που απέχει τη μεγαλύτερη απόσταση. Επομένως επαληθεύεται ο κανόνας.



Εικόνα Δ- 62: Το YT-1 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (largest distance)

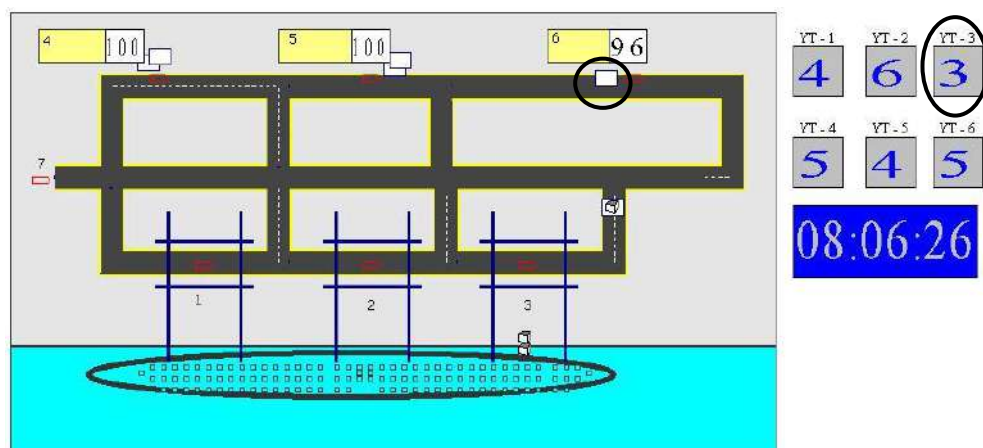
Κανόνας επιλογής: Μικρότερη απόσταση (Smallest distance)

Με τον κανόνα αυτό, όταν υπάρχει ένας αριθμός φορτηγών που είναι διαθέσιμα τότε θα επιλέγεται το φορτηγό που βρίσκεται πιο κοντά. Δηλαδή το φορτηγό που έχει να διανύσει τη μικρότερη απόσταση.

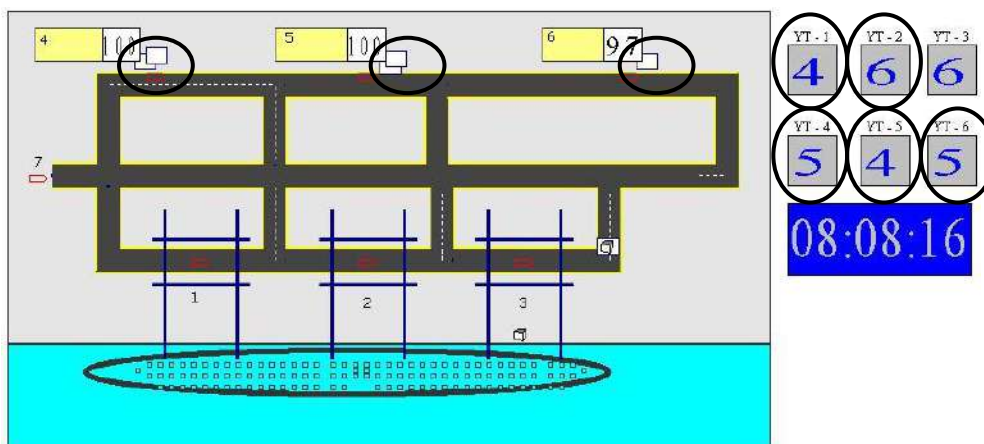


Εικόνα Δ- 63: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 3min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 08:03:16 γίνεται αίτημα για φορτηγό, από το σταθμό 3 για να παραληφθεί επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-1 και YT-5 στο σταθμό 4, YT-4 και YT-6 στο σταθμό 5 και YT-3 στο σταθμό 6. Έχει οριστεί στο πρόγραμμα να επιλέγεται το φορτηγό που θα έχει να διανύσει τη μικρότερη απόσταση. Τα YT-1 και YT-5 απέχουν 80m από το σταθμό 3, τα YT-4 και YT-6 απέχουν 60m από το σταθμό 3 και το YT-3 απέχει 60m από το σταθμό 3. Όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ-64, επιλέχτηκε τελικά το YT-3 που απέχει τη μικρότερη απόσταση. Επομένως επαληθεύεται ο κανόνας.

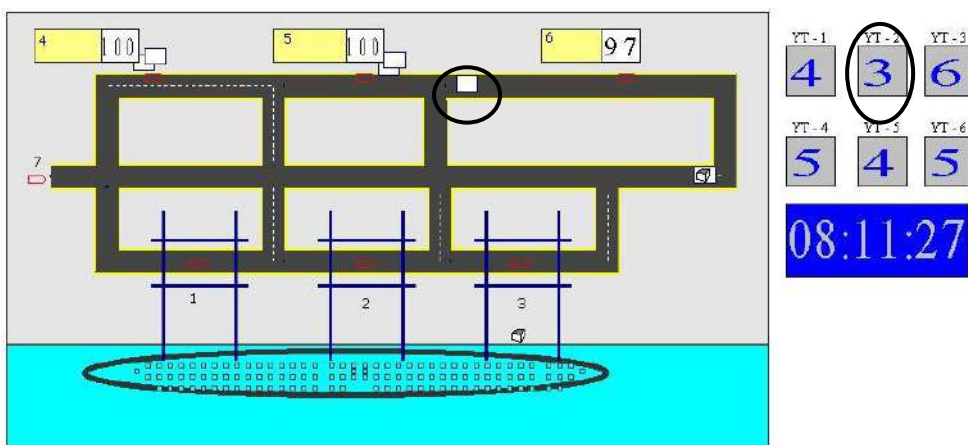


Εικόνα Δ- 64: Το YT-3 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (smallest distance)



Εικόνα Δ- 65: Αίτημα για YT τη χρονική στιγμή 8hr & 8min & 16sec

Τη χρονική στιγμή 08:08:16 γίνεται αίτημα για φορτηγό, από το σταθμό 3 για να παραληφθεί επόμενο εμπορευματοκιβώτιο. Τα φορτηγά που είναι διαθέσιμα είναι τα εξής: YT-1 και YT-5 στο σταθμό 4, YT-4 και YT-6 στο σταθμό 5 και YT-2 στο σταθμό 6. Έχει οριστεί στο πρόγραμμα να επιλέγεται το φορτηγό που θα έχει να διανύσει τη μικρότερη απόσταση. Τα YT-1 και YT-5 απέχουν 80m από το σταθμό 3, τα YT-4 και YT-6 απέχουν 60m από το σταθμό 3 και το YT-2 απέχει 60m από το σταθμό 3. Όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ-66, επιλέχτηκε τελικά το YT-1 που απέχει τη μικρότερη απόσταση. Επομένως επαληθεύεται ο κανόνας.



Εικόνα Δ- 66: Το YT-2 κατευθύνεται στο σταθμό 3 (smallest distance)

Τα πρόγραμμα εκτελέστηκε πέντε φορές για πέντε διαφορετικούς κανόνες επιλογής εξοπλισμού. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης είναι διαφορετικά για την κάθε περίπτωση. Η επιλογή κανόνα, όπως φαίνεται στον Πίνακα Δ-1, έχει επιπτώσεις στο χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών καθώς και στον φόρτο εργασίας του εξοπλισμού.

Πίνακας Δ- 1: Αποτελέσματα ελέγχων 3 και 4 με μοντέλα προσομοίωσης Arena

Κανόνας Επιλογής	Χρόνος	Βαθμός χρησιμοποίησης			
		QC1	QC2	QC3	YTs
Κυκλικός (Cyclical)	08:51:03	94,99%	92,64%	99,16%	73,97%
Τυχαίος (Random)	08:53:43	90,77%	85,81%	99,20%	72%
Πρώτο διαθέσιμο (Preferred Order)	09:00:23	95,57%	88,45%	99,21%	72,92%
Μεγαλύτερη απόσταση (Largest Distance)	09:28:23	98,25%	98,17%	99,25%	73,73%
Μικρότερη απόσταση (Smallest Distance)	08:21:43	85,79%	74,14%	99,15%	70,88%

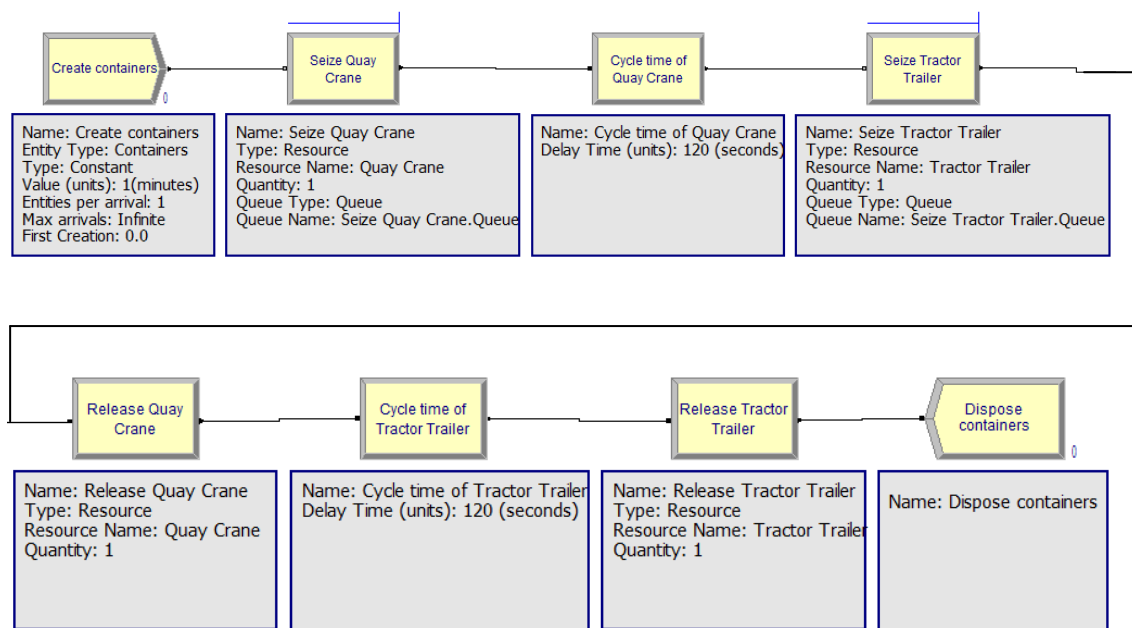
Ο κανόνας που δίνει το μικρότερο χρόνο εκτέλεσης και το μικρότερο βαθμό χρησιμοποίησης εξοπλισμού είναι ο κανόνα επιλογής με τη μικρότερη απόσταση. Αυτό είναι λογικό διότι, εφόσον πραγματοποιούνται, για τις ίδιες λειτουργίες, οι μικρότερες αποστάσεις θα υπάρχει οικονομία στο χρόνο. Αντιθέτως ο κανόνας που δίνει το μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης και τους μεγαλύτερους βαθμούς χρησιμοποίησης είναι ο κανόνας επιλογής με τη μεγαλύτερη απόσταση. Οι υπόλοιποι κανόνες δίνουν ενδιάμεσες τιμές χρόνου και βαθμού χρησιμοποίησης. Ωστόσο σε περιπτώσεις με διαφορετικά δεδομένα τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν ελαφρώς και κάποιος άλλος κανόνας επιλογής να υπερέχει. Γενικά όμως αναμένεται πως ο κανόνας επιλογής με τη μικρότερη απόσταση θα είναι βέλτιστος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε – Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλων προσομοίωσης Arena μέσω σύγκρισης με αντίστοιχο παράδειγμα στη δημοσιευμένη εργασία του Frankel^[42]

Ο Frankel (1980)^[42] παρουσίασε ένα τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων σαν ένα δίκτυο λειτουργιών όπου κάθε σύνδεσμος του δικτύου αναπαριστά τη λειτουργία συγκεκριμένου τύπου εξοπλισμού. Κάθε τύπος εξοπλισμού έχει ένα συγκεκριμένο χρόνο κύκλου ο οποίος όμως δεν είναι πάντα σταθερός και παρουσιάζει αποκλίσεις. Όπως αναφέρει και αποδεικνύει, οι αποκλίσεις αυτές δεν επηρεάζουν μόνο την επίδοση και την ικανότητα του συγκεκριμένου εξοπλισμού αλλά επηρεάζουν και το χρόνο κύκλου άλλων τύπων εξοπλισμού με τους οποίους αλληλεπιδρά. Για την απόδειξη αυτής της συμπεριφοράς χρησιμοποιεί το εξής παράδειγμα:

Δίνεται ότι μία γερανογέφυρα κρηπιδώματος έχει μέσο χρόνο κύκλου 120 δευτερόλεπτα και τυπική απόκλιση 10 δευτερόλεπτα. Η γερανογέφυρα εξυπηρετείται από ένα σύστημα ελκυστήρων που εκτελούν τις μεταφορές των εμπορευματοκιβωτίων από το κρηπίδωμα στους χώρους στοιβασίας. Το σύστημα των ελκυστήρων έχει μέσο χρόνο κύκλου 360 δευτερόλεπτα και εμφανίζει τυπική απόκλιση 90 δευτερόλεπτα. Θεωρώντας ότι το σύστημα αποτελείται από 3 ελκυστήρες τότε ο μέσος χρόνος κύκλου κάθε ελκυστήρα είναι 120 δευτερόλεπτα. Επομένως η ικανότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τόσο της γερανογέφυρας όσο και του ελκυστήρα είναι 30 εμπορευματοκιβώτια/ώρα. Ωστόσο κατά τη λειτουργία αυτού του συστήματος στο 38% του χρόνου, είτε η γερανογέφυρα θα περιμένει να την εξυπηρετήσει κάποιος ελκυστήρας είτε κάποιος ελκυστήρας θα περιμένει την γερανογέφυρα. Επομένως η πραγματική ικανότητα του συστήματος είναι 18,6 εμπορευματοκιβώτια/ώρα.

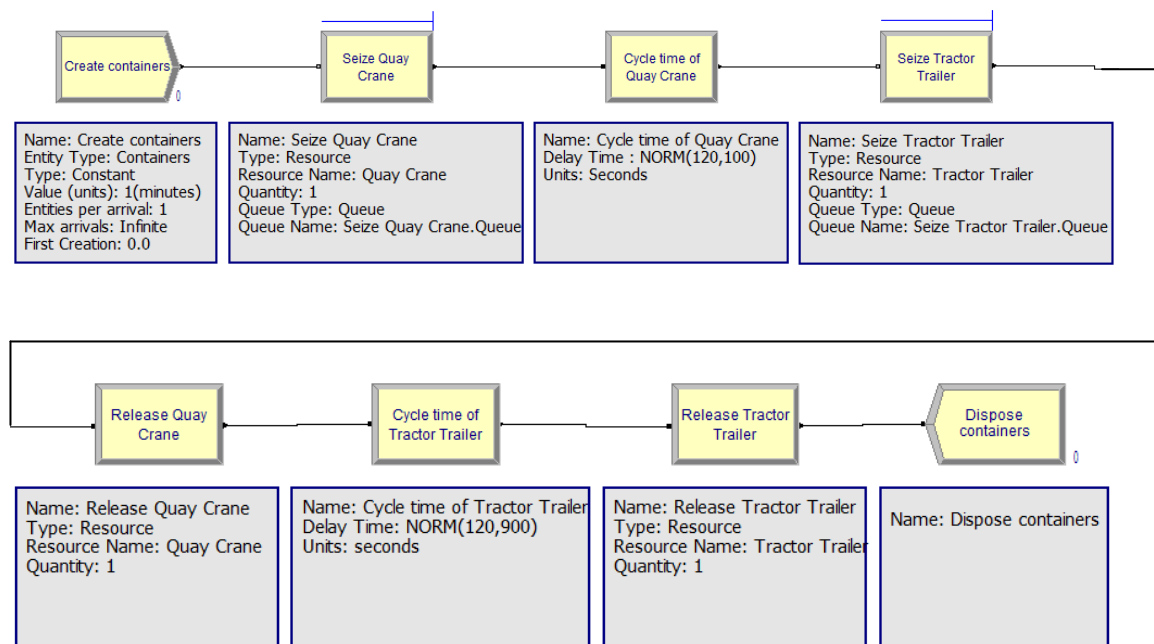
Το παράδειγμα αυτό επιλύθηκε με το λογισμικό προσομοίωσης Arena και προέκυψε συμφωνία αποτελεσμάτων. Αρχικά κατασκευάστηκε ένα μοντέλο (Εικόνα Ε-1) το οποίο αποδεικνύει πως αν οι χρόνοι κύκλου της γερανογέφυρας και των ελκυστήρων δεν παρουσίαζαν αποκλίσεις, τότε η ικανότητα του συστήματος θα ήταν 30 εμπορευματοκιβώτια/ώρα. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε επόμενο μοντέλο (Εικόνα Ε-2) το οποίο λαμβάνει υπόψη του τις τυπικές αποκλίσεις και προκύπτει ότι η ικανότητα του συστήματος είναι 18,2 εμπορευματοκιβώτια/ώρα.



Resource - Basic Process									
	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	State Set Name	Failures	Report Statistics
1	Quay Crane	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
2	Tractor Trailer	Fixed Capacity	3	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓

Εικόνα Ε- 1: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης με σταθερούς χρόνους κύκλου

Στο μοντέλο αυτό φαίνεται η άφιξη εμπορευματοκιβωτίων χωρίς περιορισμό στον αριθμό αφίξεων. Η γερανογέφυρα δεσμεύεται κάθε φορά από ένα εμπορευματοκιβώτιο και χρειάζεται 120 δευτερόλεπτα ώστε να το πάρει από το πλοίο και να το φορτώσει σε έναν ελκυστήρα. Η φόρτωση στον ελκυστήρα βέβαια θα γίνει όταν υπάρχει διαθέσιμος ελκυστήρας και βρίσκεται κάτω από την γερανογέφυρα. Ο ελκυστήρας έχει σταθερό χρόνο κύκλου ίσο με 120 δευτερόλεπτα. Το μοντέλο αυτό εκτελέστηκε για 1 ώρα και προέκυψε ότι τα εμπορευματοκιβώτια που εκφορτώθηκαν επιτυχώς ήταν 30.



Resource - Basic Process									
	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics
1	Quay Crane	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
2	Tractor Trailer	Fixed Capacity	3	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓

Εικόνα Ε- 2: Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης με χρόνους κύκλου που ακολουθούν την κανονική κατανομή

Η διαφορά στο μοντέλο αυτό είναι πως οι χρόνοι κύκλου της γερανογέφυρας και των ελκυστήρων ακολουθούν την κανονική κατανομή, παρουσιάζοντας αποκλίσεις στον χρόνο τους. Το μοντέλο αυτό εκτελέστηκε για 1 ώρα και πραγματοποιήθηκαν 1000 επαναλήψεις. Τελικά προέκυψε πως η ικανότητα του συστήματος να μεταφέρει εμπορευματοκιβώτια είναι 18,2 εμπορευματοκιβώτια/ώρα.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ – Ενδεικτικοί πίνακες των μοντέλων
υπολογισμού χρόνων κύκλου των οχημάτων μεταφοράς για
διάφορες περιπτώσεις διαμόρφωσης του χώρου στοιβασίας
για τις πρώτες 50 τιμές**

Πίνακας ΣΤ. 1: Περίπτωση 1 με μέσο ύψος στοιβασίας 1

	T	"="	Tκ	"+"	2*T1	"+"	2*T2	"+"	T3		RND 1	RND 2	RND 3
1	1,57		0,75		0,38		0,44		0		8	3	0
2	1,57		0,75		0,67		0,15		0		14	1	0
3	1,91		0,75		0,72		0,44		0		15	3	0
4	1,68		0,75		0,05		0,88		0		1	6	0
5	2,16		0,75		0,53		0,88		0		11	6	0
6	1,97		0,75		0,05		1,17		0		1	8	0
7	2,15		0,75		0,96		0,44		0		20	3	0
8	2,60		0,75		0,53		1,32		0		11	9	0
9	1,47		0,75		0,43		0,29		0		9	2	0
10	2,49		0,75		0,86		0,88		0		18	6	0
11	2,30		0,75		0,53		1,02		0		11	7	0
12	1,92		0,75		0,14		1,02		0		3	7	0
13	1,76		0,75		0,72		0,29		0		15	2	0
14	2,74		0,75		0,67		1,32		0		14	9	0
15	1,67		0,75		0,19		0,73		0		4	5	0
16	1,58		0,75		0,10		0,73		0		2	5	0
17	1,43		0,75		0,10		0,59		0		2	4	0
18	2,15		0,75		0,82		0,59		0		17	4	0
19	3,35		0,75		0,58		1,02		1		12	7	1
20	2,45		0,75		0,53		1,17		0		11	8	0
21	1,77		0,75		0,58		0,44		0		12	3	0
22	1,77		0,75		0,29		0,73		0		6	5	0
23	2,64		0,75		0,86		1,02		0		18	7	0
24	2,40		0,75		0,34		1,32		0		7	9	0
25	2,20		0,75		0,72		0,73		0		15	5	0
26	2,16		0,75		0,53		0,88		0		11	6	0
27	1,28		0,75		0,38		0,15		0		8	1	0
28	3,08		0,75		0,86		1,46		0		18	10	0
29	2,54		0,75		0,77		1,02		0		16	7	0
30	1,91		0,75		0,86		0,29		0		18	2	0
31	2,30		0,75		0,53		1,02		0		11	7	0
32	1,96		0,75		0,34		0,88		0		7	6	0
33	2,59		0,75		0,96		0,88		0		20	6	0
34	1,72		0,75		0,10		0,88		0		2	6	0
35	2,10		0,75		0,91		0,44		0		19	3	0
36	2,50		0,75		0,29		1,46		0		6	10	0
37	2,25		0,75		0,62		0,88		0		13	6	0
38	4,44		0,75		0,82		0,88		2		17	6	2
39	1,96		0,75		0,48		0,73		0		10	5	0
40	1,81		0,75		0,62		0,44		0		13	3	0
41	1,91		0,75		0,43		0,73		0		9	5	0
42	2,98		0,75		0,91		1,32		0		19	9	0
43	3,50		0,75		0,58		1,17		1		12	8	1
44	2,07		0,75		0,14		1,17		0		3	8	0
45	1,62		0,75		0,43		0,44		0		9	3	0
46	1,38		0,75		0,48		0,15		0		10	1	0
47	4,13		0,75		0,91		1,46		1		19	10	1
48	2,74		0,75		0,67		1,32		0		14	9	0
49	2,26		0,75		0,05		1,46		0		1	10	0
50	2,26		0,75		0,19		1,32		0		4	9	0

Πίνακας ΣΤ. 2: Περίπτωση 2 με μέσο ύψος στοιβάσας 1,5

	T	"="	Tκ	"+"	2*T1	"+"	2*T2	"+"	T3		RND 1	RND 2	RND 3
1	3,64		0,75		0,86		1,02		1		18	7	1
2	2,69		0,75		0,48		1,46		0		10	10	0
3	3,33		0,75		0,43		0,15		2		9	1	2
4	2,50		0,75		0,29		1,46		0		6	10	0
5	1,14		0,75		0,10		0,29		0		2	2	0
6	1,77		0,75		0,43		0,59		0		9	4	0
7	3,10		0,75		0,91		0,44		1		19	3	1
8	2,83		0,75		0,91		1,17		0		19	8	0
9	4,03		0,75		0,96		1,32		1		20	9	1
10	2,64		0,75		0,86		1,02		0		18	7	0
11	1,38		0,75		0,48		0,15		0		10	1	0
12	2,69		0,75		0,62		1,32		0		13	9	0
13	3,01		0,75		0,67		0,59		1		14	4	1
14	2,30		0,75		0,67		0,88		0		14	6	0
15	2,10		0,75		0,77		0,59		0		16	4	0
16	2,93		0,75		0,72		1,46		0		15	10	0
17	1,86		0,75		0,82		0,29		0		17	2	0
18	4,74		0,75		0,53		1,46		2		11	10	2
19	1,43		0,75		0,24		0,44		0		5	3	0
20	1,66		0,75		0,77		0,15		0		16	1	0
21	1,68		0,75		0,05		0,88		0		1	6	0
22	2,60		0,75		0,38		1,46		0		8	10	0
23	2,96		0,75		0,62		0,59		1		13	4	1
24	3,44		0,75		0,96		0,73		1		20	5	1
25	4,74		0,75		0,53		1,46		2		11	10	2
26	1,48		0,75		0,14		0,59		0		3	4	0
27	2,55		0,75		0,34		1,46		0		7	10	0
28	1,62		0,75		0,72		0,15		0		15	1	0
29	1,19		0,75		0,14		0,29		0		3	2	0
30	2,49		0,75		0,72		1,02		0		15	7	0
31	1,24		0,75		0,05		0,44		0		1	3	0
32	1,86		0,75		0,82		0,29		0		17	2	0
33	2,36		0,75		0,29		1,32		0		6	9	0
34	4,31		0,75		0,10		1,46		2		2	10	2
35	1,09		0,75		0,19		0,15		0		4	1	0
36	1,23		0,75		0,34		0,15		0		7	1	0
37	3,25		0,75		0,91		0,59		1		19	4	1
38	2,41		0,75		0,19		1,46		0		4	10	0
39	3,59		0,75		0,96		0,88		1		20	6	1
40	3,31		0,75		0,10		1,46		1		2	10	1
41	2,16		0,75		0,53		0,88		0		11	6	0
42	1,58		0,75		0,24		0,59		0		5	4	0
43	1,53		0,75		0,05		0,73		0		1	5	0
44	2,38		0,75		0,05		0,59		1		1	4	1
45	1,33		0,75		0,14		0,44		0		3	3	0
46	1,91		0,75		0,58		0,59		0		12	4	0
47	3,36		0,75		0,29		1,32		1		6	9	1
48	1,62		0,75		0,72		0,15		0		15	1	0
49	2,11		0,75		0,62		0,73		0		13	5	0
50	1,86		0,75		0,82		0,29		0		17	2	0

Πίνακας ΣΤ. 3: Περίπτωση 3 με μέσο ύψος στοιβάσας 2

	T	"="	Tκ	"+"	2*T1	"+"	2*T2	"+"	T3		RND 1	RND 2	RND 3
1	1,86		0,75		0,67		0,44		0		14	3	0
2	2,74		0,75		0,53		1,46		0		11	10	0
3	3,52		0,75		0,48		0,29		2		10	2	2
4	2,05		0,75		0,86		0,44		0		18	3	0
5	1,14		0,75		0,24		0,15		0		5	1	0
6	1,96		0,75		0,77		0,44		0		16	3	0
7	2,69		0,75		0,62		1,32		0		13	9	0
8	3,15		0,75		0,82		0,59		1		17	4	1
9	3,74		0,75		0,53		1,46		1		11	10	1
10	2,86		0,75		0,96		0,15		1		20	1	1
11	2,11		0,75		0,19		1,17		0		4	8	0
12	2,26		0,75		0,34		1,17		0		7	8	0
13	1,43		0,75		0,38		0,29		0		8	2	0
14	2,84		0,75		0,62		1,46		0		13	10	0
15	1,91		0,75		0,43		0,73		0		9	5	0
16	4,01		0,75		0,38		0,88		2		8	6	2
17	1,52		0,75		0,62		0,15		0		13	1	0
18	3,87		0,75		0,38		0,73		2		8	5	2
19	1,67		0,75		0,34		0,59		0		7	4	0
20	1,97		0,75		0,05		1,17		0		1	8	0
21	4,74		0,75		0,53		1,46		2		11	10	2
22	3,77		0,75		0,29		0,73		2		6	5	2
23	2,15		0,75		0,82		0,59		0		17	4	0
24	1,52		0,75		0,62		0,15		0		13	1	0
25	4,31		0,75		0,10		1,46		2		2	10	2
26	1,14		0,75		0,10		0,29		0		2	2	0
27	3,16		0,75		0,53		0,88		1		11	6	1
28	1,77		0,75		0,29		0,73		0		6	5	0
29	2,44		0,75		0,82		0,88		0		17	6	0
30	1,57		0,75		0,53		0,29		0		11	2	0
31	4,50		0,75		0,29		1,46		2		6	10	2
32	4,11		0,75		0,19		1,17		2		4	8	2
33	2,60		0,75		0,53		1,32		0		11	9	0
34	2,59		0,75		0,96		0,88		0		20	6	0
35	2,48		0,75		0,29		0,44		1		6	3	1
36	1,38		0,75		0,05		0,59		0		1	4	0
37	2,96		0,75		0,62		0,59		1		13	4	1
38	1,72		0,75		0,24		0,73		0		5	5	0
39	3,15		0,75		0,82		0,59		1		17	4	1
40	2,47		0,75		0,58		0,15		1		12	1	1
41	1,72		0,75		0,38		0,59		0		8	4	0
42	2,58		0,75		0,10		0,73		1		2	5	1
43	1,71		0,75		0,67		0,29		0		14	2	0
44	3,57		0,75		0,53		0,29		2		11	2	2
45	3,35		0,75		0,43		1,17		1		9	8	1
46	2,16		0,75		0,24		1,17		0		5	8	0
47	2,79		0,75		0,86		1,17		0		18	8	0
48	1,81		0,75		0,77		0,29		0		16	2	0
49	3,21		0,75		0,43		1,02		1		9	7	1
50	2,00		0,75		0,96		0,29		0		20	2	0

Πίνακας ΣΤ. 4: Περίπτωση 4 με μέσο ύψος στοιβάσις 2,5

	T	"="	Tκ	"+"	2*T1	"+"	2*T2	"+"	T3		RND	RND	RND
											1	2	3
1	2,97		0,75		0,19		1,02		1		4	7	1
2	2,12		0,75		0,05		1,32		0		1	9	0
3	4,98		0,75		0,77		1,46		2		16	10	2
4	2,21		0,75		0,14		1,32		0		3	9	0
5	2,55		0,75		0,48		1,32		0		10	9	0
6	2,49		0,75		0,86		0,88		0		18	6	0
7	2,18		0,75		0,29		0,15		1		6	1	1
8	2,30		0,75		0,82		0,73		0		17	5	0
9	1,76		0,75		0,86		0,15		0		18	1	0
10	2,68		0,75		0,05		0,88		1		1	6	1
11	1,28		0,75		0,38		0,15		0		8	1	0
12	5,03		0,75		0,96		1,32		2		20	9	2
13	3,09		0,75		0,19		0,15		2		4	1	2
14	3,41		0,75		0,19		1,46		1		4	10	1
15	2,00		0,75		0,96		0,29		0		20	2	0
16	2,96		0,75		0,48		0,73		1		10	5	1
17	4,01		0,75		0,82		0,44		2		17	3	2
18	2,30		0,75		0,67		0,88		0		14	6	0
19	2,10		0,75		0,77		0,59		0		16	4	0
20	1,67		0,75		0,62		0,29		0		13	2	0
21	3,63		0,75		0,14		0,73		2		3	5	2
22	1,09		0,75		0,05		0,29		0		1	2	0
23	3,59		0,75		0,82		1,02		1		17	7	1
24	1,96		0,75		0,77		0,44		0		16	3	0
25	3,58		0,75		0,24		0,59		2		5	4	2
26	4,88		0,75		0,82		1,32		2		17	9	2
27	4,10		0,75		0,77		0,59		2		16	4	2
28	2,29		0,75		0,10		0,44		1		2	3	1
29	2,48		0,75		0,29		0,44		1		6	3	1
30	2,86		0,75		0,82		0,29		1		17	2	1
31	3,54		0,75		0,77		1,02		1		16	7	1
32	2,71		0,75		0,82		0,15		1		17	1	1
33	2,53		0,75		0,05		0,73		1		1	5	1
34	1,86		0,75		0,67		0,44		0		14	3	0
35	1,91		0,75		0,58		0,59		0		12	4	0
36	1,42		0,75		0,53		0,15		0		11	1	0
37	4,50		0,75		0,29		1,46		2		6	10	2
38	2,31		0,75		0,10		1,46		0		2	10	0
39	2,35		0,75		0,72		0,88		0		15	6	0
40	4,59		0,75		0,96		0,88		2		20	6	2
41	3,29		0,75		0,10		0,44		2		2	3	2
42	2,55		0,75		0,62		1,17		0		13	8	0
43	2,97		0,75		0,19		1,02		1		4	7	1
44	1,28		0,75		0,38		0,15		0		8	1	0
45	1,91		0,75		0,72		0,44		0		15	3	0
46	2,93		0,75		0,86		1,32		0		18	9	0
47	3,36		0,75		0,29		1,32		1		6	9	1
48	2,35		0,75		0,86		0,73		0		18	5	0
49	2,09		0,75		0,19		0,15		1		4	1	1
50	2,20		0,75		0,72		0,73		0		15	5	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ – Αναλυτική περιγραφή των λειτουργικών μονάδων των μοντέλων για τα σενάρια 3 και 4.

Σενάριο 3°

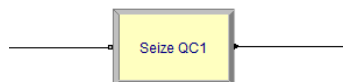
Λειτουργική μονάδα δημιουργίας



Name: Berth 1
Entity Type: Containers1
Type: Constant
Value (units): 1 (hours)
Entities per arrival: 100
Max arrivals: 1
First Creation: 0.0

Αρχικά, φθάνει ένα πλοίο στο λιμάνι και παραβάλλει στη πρώτη θέση. Με την άφιξη του πλοίου, νοείται η άφιξη των 100 εμπορευματοκιβωτίων που πρόκειται να εκφορτωθούν. Ορίζονται λοιπόν στον τύπο της οντότητας τα εμπορευματοκιβώτια τα οποία φθάνουν με την άφιξη του πλοίου “Containers1”.

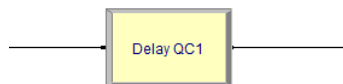
Λειτουργική μονάδα δέσμευσης



Name: Seize QC1
Type: Resource
Resource Name: QC1
Quantity: 1
Queue Type: Queue
Queue Name: Seize QC1.Queue

Μόλις φτάσουν τα εμπορευματοκιβώτια δημιουργούν ουρά για να εξυπηρετηθούν από τη γερανογέφυρα “QC1”. Αρχικά δεσμεύεται η γερανογέφυρα για να παραλάβει το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο.

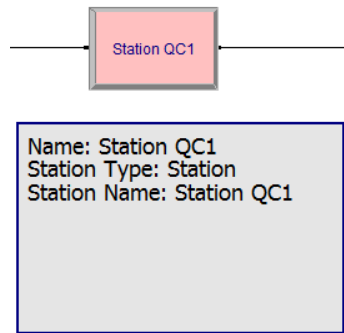
Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



Name: Delay QC1
Delay Time (units): 3 (minutes)

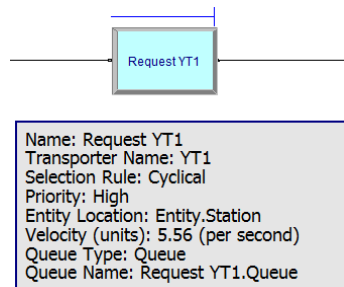
Μόλις δεσμευτεί από το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο χρειάζεται 3 λεπτά ώστε να το πάρει από το πλοίο και να το μεταφέρει στο κρηπίδωμα.

Λειτουργική μονάδα σταθμού



Ορίζεται η θέση που βρίσκεται η γερανογέφυρα με το εκφορτωμένο εμπορευματοκιβώτιο, στο κρηπίδωμα. Καλείται σταθμός και ονομάζεται “Station QC1”.

Λειτουργία μονάδα αιτήματος

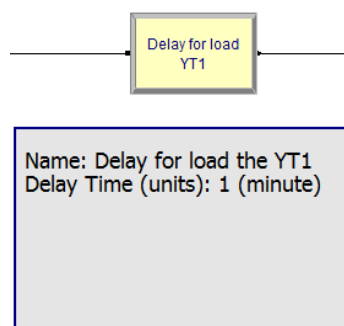


Εφόσον η γερανογέφυρα έχει εκφορτώσει το εμπορευματοκιβώτιο από το πλοίο και βρίσκεται στο “Station QC1”, κάνει αίτημα σε όχημα μεταφοράς να έρθει να παραλάβει το εμπορευματοκιβώτιο. Το όχημα μεταφοράς που καλείται ονομάζεται “YT1” και κινείται με ταχύτητα 5,56m/sec. Δηλαδή 20km/h.

Transporter - Advanced Transfer									Initial Position Status				
	Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	Report Statistics		Initial Position	Station Name	Initial Status	
1	YT1	1	Free Path	YT1.Distance	5.56	Per Second	1 rows	☒		1	Station	Depot1	Active

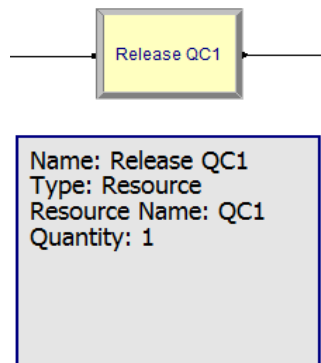
Στη λειτουργική μονάδα δεδομένων των οχημάτων μεταφοράς, ορίζεται ο αριθμός των οχημάτων που είναι 1, ο τύπος τους που είναι “Free Path”, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζονται για τις μετακινήσεις τους εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα που έχουν και την απόσταση που πρέπει να διανύσουν (και όχι από τη συμφόρηση του δικτύου, τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις). Επίσης ορίζεται η αρχική θέση που έχουν “Depot1”, από την οποία θα εκκινήσουν για να μεταφερθούν στη θέση “Station QC1” και να τους φορτώσει η γερανογέφυρα το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



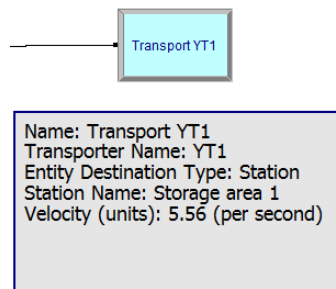
Μόλις το όχημα μεταφοράς φθάσει στη θέση “Station QC1” τότε η γερανογέφυρα φορτώνει σε αυτό το εμπορευματοκιβώτιο. Η διαδικασία της φόρτωσης απαιτεί 1 λεπτό.

Λειτουργική μονάδα απελευθέρωσης



Μόλις ολοκληρωθεί η φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο όχημα μεταφοράς, η γερανογέφυρα απελευθερώνεται και μπορεί να δεσμευτεί από επόμενο εμπορευματοκιβώτιο που περιμένει στην ουρά για να εκφορτωθεί από το πλοίο.

Λειτουργική μονάδα μεταφοράς



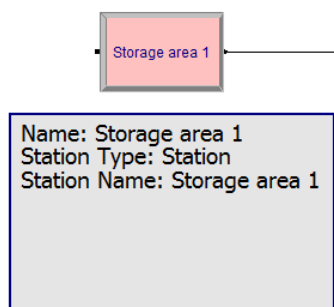
Το όχημα μεταφέρει το εμπορευματοκιβώτιο σε θέση που ορίζεται στη συνέχεια και ονομάζεται "Storage area 1". Κινείται με ταχύτητα 5,56m/sec δηλαδή με 20km/h.

Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Depot1	Station QC1	10
2	Station QC1	Storage area 1	250
3	Storage area 1	Station QC1	250

Distance - Advanced Transfer		
	Name	Stations
1	YT1.Distance	3 rows

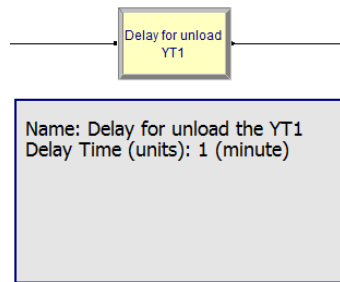
Στη λειτουργική μονάδα δεδομένων ορίζονται οι αποστάσεις των σταθμών. Ορίζεται η απόσταση του αμαξοστάσιου από το σταθμό "Station QC1" που είναι 10m, η απόσταση του "Station QC1" από το "Storage area 1" και αντίστροφα που είναι 250m.

Λειτουργική μονάδα σταθμού



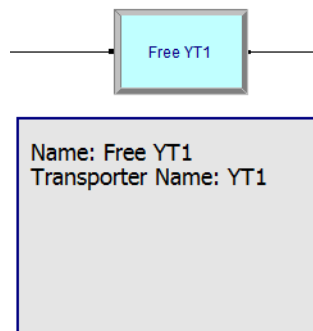
Ορίζεται η θέση που θα φτάσει το όχημα μεταφοράς με το εμπορευματοκιβώτιο στο χώρο στοιβασίας. Ονομάζεται "Storage area 1".

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



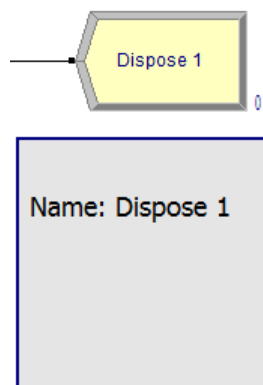
Στο σταθμό "Storage area 1" το όχημα μεταφοράς θα εκφορτώσει το εμπορευματοκιβώτιο και θα χρειαστεί 1 λεπτό για αυτή τη διαδικασία.

Λειτουργική μονάδα ελευθέρωσης



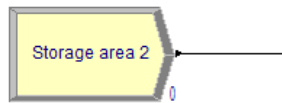
Μετά την εκφόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου το όχημα μεταφοράς ελευθερώνεται και όταν του ζητηθεί θα επιστρέψει στο κρηπίδωμα να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα διάθεσης



Η εκφόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου με την εναπόθεση του στο χώρο στοιβασίας αποτελεί τη λήξη των διαδικασιών για αυτό το εμπορευματοκιβώτιο, επομένως χρησιμοποιείται η λειτουργική μονάδα διάθεσης των οντοτήτων (στο συγκεκριμένο μοντέλο εμπορευματοκιβωτίων).

Λειτουργική μονάδα δημιουργίας



Name: Storage area2
Entity Type: Containers2
Type: Constant
Value (units): 1 (hours)
Entities per arrival: 100
Max arrivals: 1
First Creation: 0.0

Στο λιμάνι υπάρχει και ένα δεύτερο πλοίο, στο οποίο πρόκειται να φορτωθούν 100 εμπορευματοκιβώτια. Τα εμπορευματοκιβώτια αυτά βρίσκονται σε ένα χώρο στοιβάσεως που ονομάζεται "Storage area 2". Με τη λειτουργική μονάδα δημιουργίας λοιπόν, ορίζεται ότι από το χώρο αυτό θα γίνει η άφιξη των οντοτήτων, δηλαδή των εξαγόμενων εμπορευματοκιβωτίων που ονομάζονται "Containers 2".

Λειτουργική μονάδα σταθμού



Name: Storage area 2
Station Type: Station
Station Name: Storage area 2

Η λειτουργική μονάδα σταθμού ορίζει το όνομα του σταθμού στο χώρο στοιβάσεως που είναι "Storage area 2".

Λειτουργική μονάδα αιτήματος



Name: Request YT2
Transporter Name: YT2
Selection Rule: Cyclical
Priority: High
Entity Location: Entity.Station
Velocity (units): 5.56 (per second)
Queue Type: Queue
Queue Name: Request YT2.Queue

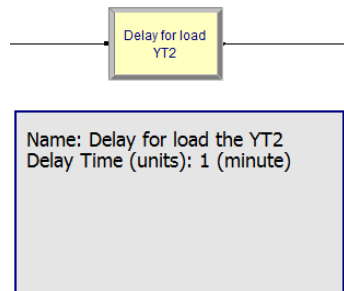
Γίνεται αίτημα λοιπόν για όχημα μεταφοράς στο σταθμό αυτό, ώστε να παραλάβει το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο. Το όχημα μεταφοράς που καλείται ονομάζεται "YT2" και κινείται με ταχύτητα 5,56m/sec. Δηλαδή 20km/h.

2	YT2	1	Free Path	YT2.Distance	5.56	Per Second	1 rows	Initial Position Status
Double-click here to add a new row.								
1	Station		Depot2					Active

Στη λειτουργική μονάδα δεδομένων των οχημάτων μεταφοράς, ορίζεται ο αριθμός των οχημάτων που είναι 1, ο τύπος τους που είναι "Free Path", δηλαδή ο χρόνος που χρειάζονται για τις μετακινήσεις τους εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα που έχουν και την απόσταση που πρέπει να διανύσουν (και όχι από τη συμφόρηση του δικτύου, τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις). Επίσης ορίζεται η αρχική θέση που έχουν "Depot2", από την οποία θα

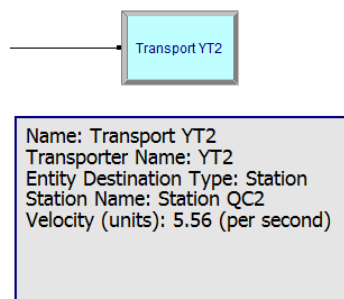
εκκινήσουν για να μεταφερθούν στη θέση “Storage area 2” για να παραλάβουν το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



Μόλις το όχημα μεταφοράς φθάσει στο χώρο στοιβασίας χρειάζεται 1 λεπτό για να παραλάβει ένα εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα μεταφοράς



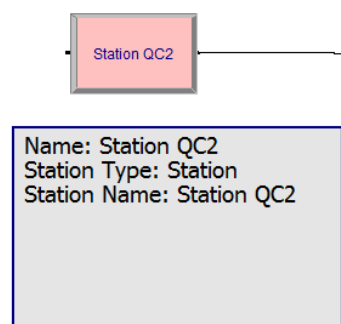
Το όχημα μεταφέρει το εμπορευματοκιβώτιο σε θέση που ορίζεται στη συνέχεια και ονομάζεται “Station QC2”. Κινείται με ταχύτητα 5,56m/sec δηλαδή με 20km/h.

2	YT2.Distance	3 rows
Double-click here to add a new row.		

Stations			
	Beginning Station	Ending Station	Distance
1	Depot2	Storage area 2	10
2	Station QC2	Storage area 2	250
3	Storage area 2	Station QC2	250

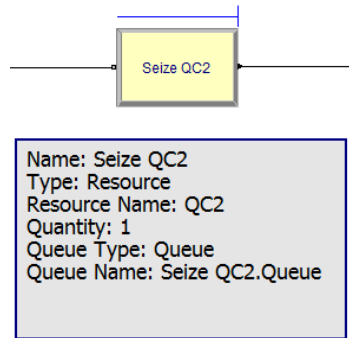
Στη λειτουργική μονάδα δεδομένων ορίζονται οι αποστάσεις των σταθμών. Ορίζεται η απόσταση του αμαξοστάσιου “Depot2” από το σταθμό “Storage area 2” που είναι 10m, και η απόσταση του “Storage area 2” από το σταθμό “Station QC2” και αντίστροφα που είναι 250m.

Λειτουργική μονάδα σταθμού



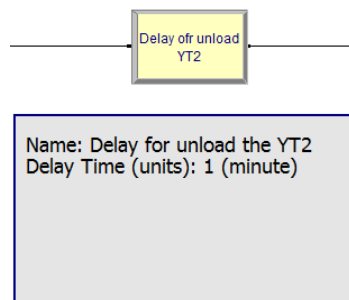
Η λειτουργική μονάδα σταθμού ορίζει το όνομα του σταθμού στο κρηπίδωμα που είναι “Station QC2”.

Λειτουργική μονάδα δέσμευσης



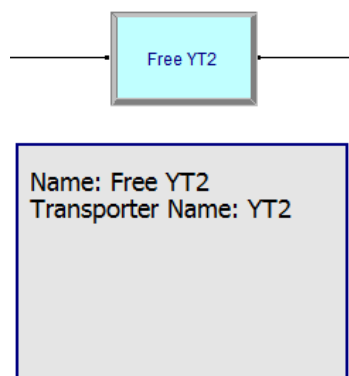
Μόλις το έμφορτο όχημα μεταφοράς φτάσει στο κρηπίδωμα, δεσμεύεται η γερανογέφυρα κρηπιδώματος "QC2" για να το εξυπηρετήσει.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



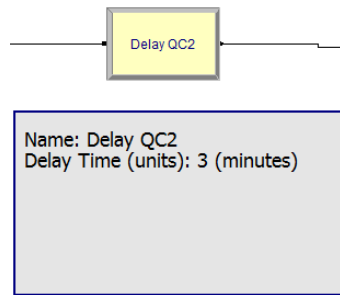
Με τη δέσμευση της γερανογέφυρας στο κρηπίδωμα απαιτείται 1 λεπτό ώστε να το παραλάβει από το όχημα μεταφοράς.

Λειτουργική μονάδα ελευθέρωσης



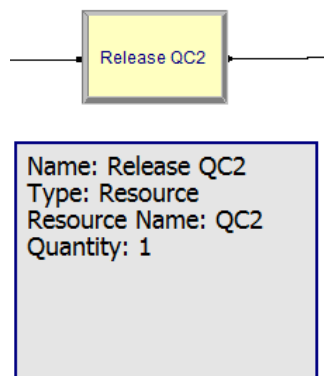
Με την ολοκλήρωση της παραλαβής του εμπορευματοκιβωτίου από την γερανογέφυρα, το όχημα μεταφοράς ελευθερώνεται και είναι διαθέσιμο να επιστρέψει στο χώρο στοίβασης και να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



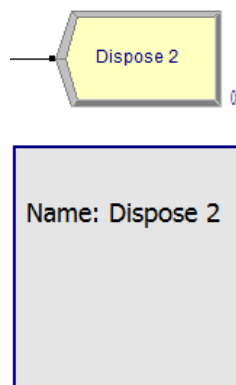
Η γερανογέφυρα στο κρηπίδωμα εφόσον παρέλαβε το εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς, χρειάζεται 3 λεπτά για να το φορτώσει στο πλοίο.

Λειτουργική μονάδας απελευθέρωσης



Μόλις το φορτώσει στο πλοίο τότε απελευθερώνεται και μπορεί να επιστρέψει στο κρηπίδωμα για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς και να το φορτώσει στο πλοίο.

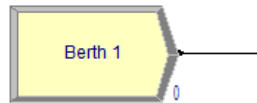
Λειτουργική μονάδα διάθεσης



Η φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο πλοίο αποτελεί τη λήξη των διαδικασιών για αυτό το εμπορευματοκιβώτιο, επομένως χρησιμοποιείται η λειτουργική μονάδα διάθεσης των οντοτήτων (στο συγκεκριμένο μοντέλο εμπορευματοκιβωτίων).

Σενάριο 4^ο

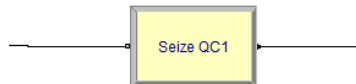
Λειτουργική μονάδα δημιουργίας



Name: Berth 1
Entity Type: Containers
Type: Constant
Value (units): 1 (hours)
Entities per arrival: 100
Max arrivals: 1
First Creation: 0.0

Αρχικά, φθάνει ένα πλοίο στο λιμάνι και παραβάλλει στη πρώτη θέση. Με την άφιξη του πλοίου, νοείται η άφιξη των 100 εμπορευματοκιβωτίων που πρόκειται να εκφορτωθούν. Ορίζονται λοιπόν στον τύπο της οντότητας τα εμπορευματοκιβώτια τα οποία φθάνουν με την άφιξη του πλοίου "Containers".

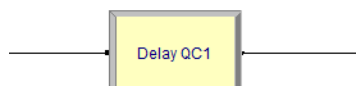
Λειτουργική μονάδα δέσμευσης



Name: Seize QC1
Type: Resource
Resource Name: QC1
Quantity: 1
Queue Type: Queue
Queue Name: Seize QC1.Queue

Μόλις φτάσουν τα εμπορευματοκιβώτια δημιουργείται ουρά προκειμένου να εξυπηρετηθούν από τη γερανογέφυρα "QC1". Αρχικά δεσμεύεται η γερανογέφυρα για να εξυπηρετήσει-εκφορτώσει το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο.

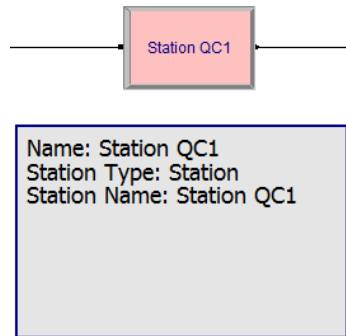
Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



Name: Delay QC1
Delay Time (units): 3 (minutes)

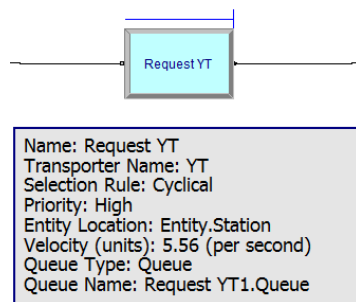
Η γερανογέφυρα κρηπιδώματος χρειάζεται 3 λεπτά ώστε να παραλάβει ένα εμπορευματοκιβώτιο και να το μεταφέρει μέχρι το κρηπίδωμα.

Λειτουργική μονάδα σταθμού



Ορίζεται η θέση στο κρηπίδωμα που η γερανογέφυρα φτάνει με το εκφορτωμένο εμπορευματοκιβώτιο. Η θέση αυτή ονομάζεται “Station QC1”.

Λειτουργική μονάδα αιτήματος

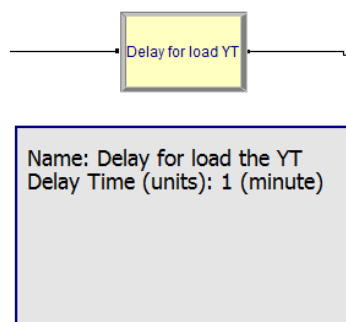


Η γερανογέφυρα λοιπόν φτάνοντας στο κρηπίδωμα με το εμπορευματοκιβώτιο κάνει αίτημα για όχημα μεταφοράς. Το όχημα μεταφοράς που καλείται ονομάζεται “YT” και κινείται με 5,56m/sec (20km/h).

Transporter - Advanced Transfer									Initial Position Status		
	Name	Number of Units	Type	Distance Set	Velocity	Units	Initial Position Status	Report Statistics	Initial Position	Station Name	Initial Status
1	YT	2	Free Path	YT.Distance	5.56	Per Second	1 rows	☒	1	Station	Depot Active

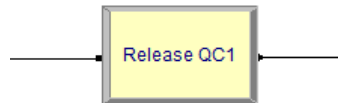
Στη λειτουργική μονάδα δεδομένων των οχημάτων μεταφοράς, ορίζεται ο αριθμός των οχημάτων που είναι 2, ο τύπος τους που είναι “Free Path”, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζονται για τις μετακινήσεις τους εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα που έχουν και την απόσταση που πρέπει να διανύσουν (και όχι από τη συμφόρηση του δικτύου, τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις). Επίσης ορίζεται η αρχική θέση που έχουν “Depot”, από την οποία θα εκκινήσουν για να μεταφερθούν στη θέση “Station QC1” και να τους φορτώσει η γερανογέφυρα το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



Μόλις το όχημα μεταφοράς φθάσει στη θέση “Station QC1” τότε η γερανογέφυρα φορτώνει σε αυτό το εμπορευματοκιβώτιο. Η διαδικασία της φόρτωσης απαιτεί 1 λεπτό.

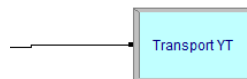
Λειτουργική μονάδα απελευθέρωσης



Name: Release QC1
Type: Resource
Resource Name: QC1
Quantity: 1

Με τη φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο όχημα μεταφοράς, η γερανογέφυρα απελευθερώνεται και είναι διαθέσιμο για να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα μεταφοράς



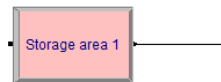
Name: Transport YT
Transporter Name: YT
Entity Destination Type: Station
Station Name: Storage area 1
Velocity (units): 5.56 (per second)

Το όχημα μεταφέρεται, έμφορτο, στη θέση "Storage area 1" και κινείται με ταχύτητα 5,56m/sec (20km/h).

Distance - Advanced Transfer			Stations			
	Name	Stations		Beginning Station	Ending Station	Distance
1	YT.Distance	5 rows	1	Depot	Station QC1	10
Double-click here to add a new row.			2	Station QC1	Storage area 1	250
			3	Storage area 1	Storage area 2	100
			4	Storage area 2	Station QC2	250
			5	Station QC2	Station QC1	100

Στη λειτουργική μονάδα δεδομένων ορίζονται οι αποστάσεις των σταθμών. Ορίζεται η απόσταση του αμαξοστάσιου "Depot" από το σταθμό "Station QC1" που είναι 10m, και η απόσταση του "Station QC1" από το σταθμό "Storage area 1" που είναι 250m. Ορίζονται επίσης και άλλες αποστάσεις που θα χρειαστούν στη συνέχεια. Η απόσταση δηλαδή των δύο χώρων στοιβάσεως που 100m, η απόσταση του "Storage area 2" από το "Station QC2" που είναι 250m καθώς και η απόσταση των γερανογεφυρών που είναι 100m.

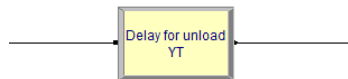
Λειτουργική μονάδα σταθμού



Name: Storage area 1
Station Type: Station
Station Name: Storage area 1

Ορίζεται η θέση που φτάνει το όχημα μεταφοράς στο χώρο στοιβασίας και ονομάζεται "Storage area 1".

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



Name: Delay for unload the YT
Delay Time (units): 1 (minute)

Φτάνοντας λοιπόν το όχημα στο χώρο στοιβασίας χρειάζεται 1 λεπτό ώστε να εκφορτώσει το εμπορευματοκιβώτιο.

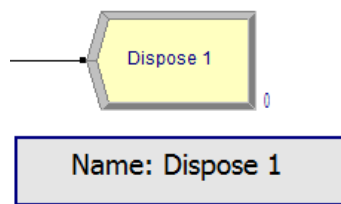
Λειτουργική μονάδα διαχωρισμού



Name: Seperate 1
Type: Duplicity Original
of Duplicities: 1

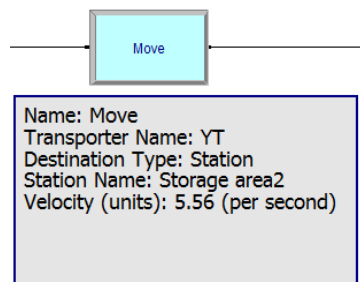
Μόλις το εμπορευματοκιβώτιο εκφορτωθεί από το όχημα μεταφοράς τότε οι διαδικασίες εκφόρτωσης αυτής της οντότητας έχουν ολοκληρωθεί. Επομένως χρησιμοποιείται η λειτουργική μονάδα διάθεσης για τη λήξη των διαδικασιών αυτού του εμπορευματοκιβωτίου. Όμως ταυτόχρονα δημιουργείται ένα αντίγραφο του, που θα αντιπροσωπεύει το εμπορευματοκιβώτιο που βρίσκεται στο δεύτερο χώρο στοιβασίας και οι διαδικασίες που το αφορούν (η φόρτωση του δηλαδή, στο δεύτερο πλοίο) δεν έχουν ολοκληρωθεί ακόμα.

Λειτουργική μονάδα διάθεσης



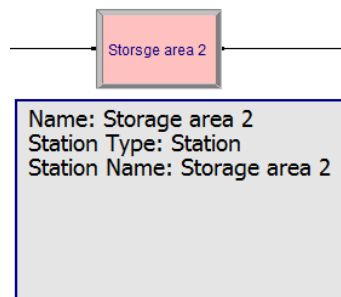
Η λειτουργική μονάδα διάθεσης δηλώνει τη λήξη των διαδικασιών του εισαγόμενου εμπορευματοκιβωτίου εφόσον αυτό διατέθηκε στο χώρο στοιβασίας του.

Λειτουργική μονάδα μετακίνησης



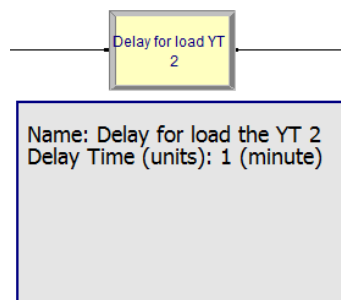
Η λειτουργική μονάδα αυτή, δίνει εντολή στο όχημα μεταφοράς που μόλις έκανε διάθεση ενός εισαγόμενου εμπορευματοκιβωτίου, να μεταφερθεί σε κενή κατάσταση στο δεύτερο χώρο στοιβασίας "Storage area 2" με ταχύτητα 5,56m/sec (20km/h).

Λειτουργική μονάδα σταθμού



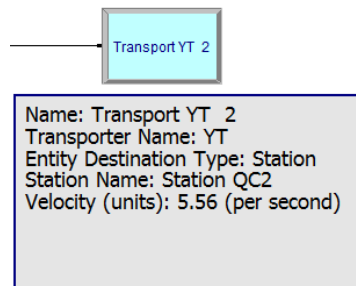
Με τη λειτουργική μονάδα σταθμού δηλώνεται η θέση που θα φτάσει το όχημα μεταφοράς στο δεύτερο χώρο στοιβασίας και ονομάζεται "Storage area 2".

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



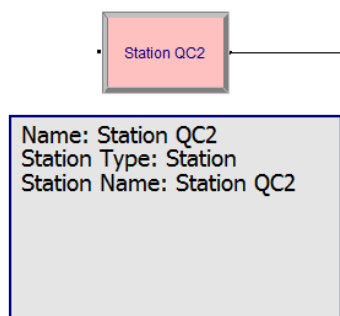
Φτάνοντας στο δεύτερο χώρο στοιβασίας, χρειάζεται 1 λεπτό για να παραλάβει ένα εξαγόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα μεταφοράς



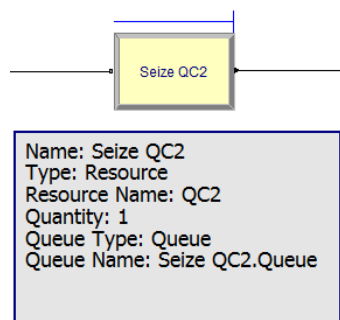
Μόλις το παραλάβει μεταφέρεται στη γερανογέφυρα του δεύτερου πλοίου σε έμφορτη κατάσταση. Κινείται με ταχύτητα 5,56m/sec.

Λειτουργική μονάδα σταθμού



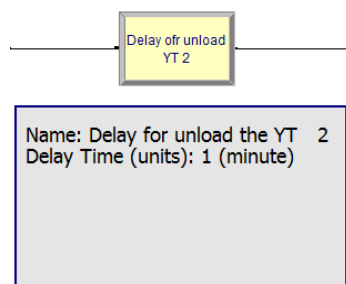
Ορίζεται η θέση που φτάνει το όχημα μεταφοράς στο κρηπίδωμα και ονομάζεται "Station QC2".

Λειτουργική μονάδα δέσμευσης



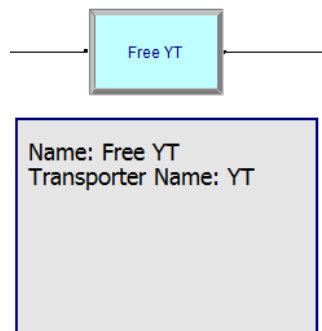
Μόλις το έμφορτο όχημα μεταφοράς φτάσει στο κρηπίδωμα, δεσμεύεται η γερανογέφυρα κρηπιδώματος "QC2" για να το εξυπηρετήσει.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



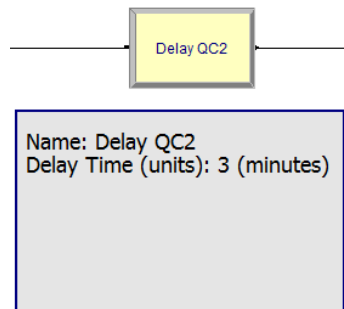
Όταν δεσμευτεί η γερανογέφυρα, χρειάζεται 1 λεπτό ώστε να εκφορτώσει το εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς.

Λειτουργική μονάδα ελευθέρωσης



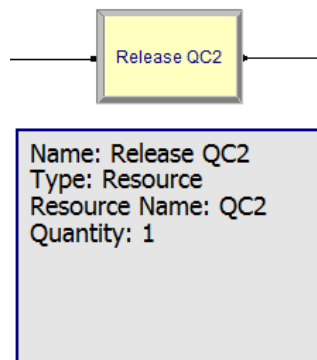
Μόλις το όχημα μεταφοράς εκφορτωθεί, ελευθερώνεται και μπορεί παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο.

Λειτουργική μονάδα καθυστέρησης



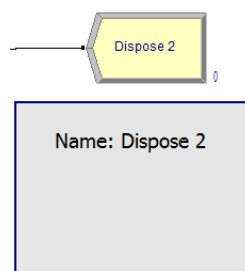
Η γερανογέφυρα η οποία εκφόρτωσε το εμπορευματοκιβώτιο από το όχημα μεταφοράς χρειάζεται 3 λεπτά για να το τοποθετήσει στο πλοίο.

Λειτουργική μονάδα απελευθέρωσης



Μόλις το τοποθετήσει στο πλοίο, απελευθερώνεται και μπορεί να παραλάβει επόμενο εμπορευματοκιβώτιο, που θα φτάσει με επόμενο όχημα μεταφοράς.

Λειτουργική μονάδα διάθεσης



Η φόρτωση του εμπορευματοκιβωτίου στο πλοίο αποτελεί τη λήξη των διαδικασιών για αυτό το εμπορευματοκιβώτιο, επομένως χρησιμοποιείται η λειτουργική μονάδα διάθεσης.