Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

Τομέας: Συστημάτων Παραγωγής



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΣΥΝΕΡΓΕΙΟ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟ ΡΟΛΟ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΛΑΘΩΝ

"Συνθετική διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος"

Ηλίας Κουρτούδης

Η διατριβή του Ηλία Κουρτούδη εγκρίνεται από τους κ.κ.

Επιστημονικός Υπεύθυνος Εργασίας

Κοντογιάννης Θωμάς Αναπληρωτής Καθηγητής

Μέλη Επιτροπής

Μπιλάλης Νικόλαος Καθηγητής

Τσουρβελούδης Νικόλαος Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....**4**

1.1 Προσδιορισμός Θέματος.....4

1.2 Η σημασία της διαχείρησης της ροής εργασιών (workflow management).....5

1.3 Διάρθρωση Διατριβής.....7

2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....**9**

2.1 Μεθοδολογία SADT.....9

2.2 Μεθοδολογία IDEF0.....13

2.3 Δίκτυα Petri.....15

2.4 Πλεονεκτήματα υλοποίησης σε Δίκτυα Petri.....21

3.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΝΕΡΓΕΙΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ.....**23**

3.1 Αρχική μοντελοποίηση εξυπηρέτησης αυτοκινήτων.....23

3.2 Νέο μοντέλο εξυπηρέτησης με διαχείριση λαθών.....34

4.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....**44**

5.ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....**49**

5.1 Περιγραφή μεθοδολογίας.....49

5.2 Επίδραση του αριθμού εργαλείων – εξοπλισμού (πείραμα 1).....61

5.3 Επίδραση του διαθέσιμου ανθρώπινου δυναμικού (πείραμα 2).....63

5.4 Επίδραση των διαθέσιμων αποβαθρών εξυπηρέτησης (πείραμα 3).....65

5.5 Επίδραση του αρχικού φόρτου εργασίας (πείραμα 4).....68

5.6 Επίδραση του βαθμού εξειδίκευσης του ανθρώπινου δυναμικού (πείραμα 5).....72

5.7 Επίδραση του αριθμού των χώρων στάθμευσης (πείραμα 6).....74

5.8 Πειραματικά Συμπεράσματα.....77

6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....80

6.1 Συμπεράσματα.....80

6.2 Μελλοντική Εργασία.....82

7.ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....83

8.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....95

1.Εισαγωγή

1.1 Προσδιορισμός θέματος

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των εργασιών που γίνονται σε ένα συνεργείο συντήρησης αυτοκινήτων με τη χρήση της τεχνικής των Δικτύων Petri. Αρχικά γίνεται μοντελοποίηση των εργασιών με την τεχνική IDEF0, η οποία βασίζεται στο γενικότερο πλαίσιο της τεχνικής Structured Analysis and Design Technique (SADT) και ακολουθεί η μοντελοποίηση με Δίκτυα Petri ώστε να είναι δυνατή τόσο η προσομοίωση όσο και η ανάλυση των ιδιοτήτων του μοντέλου. Για την χρήση δομών δεδομένων, έχει επιλεχθεί η τεχνική των Εγχρώμων Δικτύων Petri (Coloured Petri Nets) που υλοποιείται με το λογισμικό CPN Tools.

Τα Δίκτυα Petri αποτελούν ένα μαθηματικό και γραφικό εργαλείο μοντελοποίησης που εφαρμόζεται σε πολλά συστήματα και τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι: η μοντελοποίηση εργασιών και πληροφοριών με γραφικά, οι δομές δεδομένων και η χρήση κάποιας γλώσσας προγραμματισμού (π.χ. Standard ML), η προσομοίωση της ροής των εργασιών και η χρήση στοχαστικών μεταβλητών, και η μαθηματική ανάλυση των ιδιοτήτων του μοντέλου με δένδρα προσεγγισιμότητας και γραμμική άλγεβρα.

Συγκεκριμένα, το μοντέλο παρέχει την δυνατότητα ανάλυσης των ουρών αναμονής αυτοκινήτων τόσο κατά την άφιξή τους όσο και στα ενδιάμεσα στάδια παροχής των υπηρεσιών συντήρησης στους διάφορους σταθμούς εργασίας. Ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης της λειτουργίας περιλαμβάνουν μεταβλητές όπως, χρόνος αναμονής, χρόνος εξυπηρέτησης, αριθμός εξυπηρετούμενων πελατών ανά ώρα κλπ. Επίσης έχει γίνει ανάλυση των δομικών ιδιοτήτων του μοντέλου με το δένδρο προσεγγισιμότητας (reachability graph).

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ασφάλεια των εργασιών του συνεργείου και τα ανθρώπινα λάθη τα οποία μπορούν να συμβούν. Συγκεκριμένα, στους σταθμούς εξυπηρέτησης αυτοκινήτων μπορούν να γίνουν λάθη σε κάθε στάδιο των εργασιών, είτε λόγω μειωμένης κατάρτισης / εμπειρίας του προσωπικού είτε λόγω απροσεξίας / κούρασης. Τα λάθη αυτά μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στη ποιότητα των εργασιών επισκευής αλλά επίσης μπορούν να προκαλέσουν και εργατικά ατυχήματα τα οποία μπορούν να αποβούν μοιραία. Στην παρούσα διατριβή ασχολούμαστε με τη μοντελοποίηση των παραγόντων που επηρεάζουν την εμφάνιση ανθρωπίνων λαθών. Αναλύουμε τις επιπτώσεις τους και προσπαθούμε να βρούμε μεθόδους για να ελαχιστοποιήσουμε τις συνέπειές τους.

Τέλος, διάφορα πειράματα έχουν γίνει για τον έλεγχο ανεξάρτητων μεταβλητών όπως ο αριθμός εργατών και εργαλείων, η εξειδίκευση των εργατών και η διαθεσιμότητά τους, καθώς και ο αριθμός ή τύπος λάθών που μπορεί να γίνουν και να έχουν κρίσιμες συνέπειες στην ασφάλεια και απόδοση των εργασιών του συνεργείου.

1.2 Η σημασία της διαχείρησης της ροής εργασιών (workflow management)

Ο παγκόσμιος ανταγωνισμός αυξάνει την ανάγκη μείωσης του κόστους υπηρεσιών και την ανάπτυξη νέων προϊόντων. Έτσι απαιτείται επανασχεδιασμός και βελτιστοποίηση των διαδικασιών, των πληροφοριακών συστημάτων και των εφαρμογών. Η τεχνολογία ροής εργασιών (Workflow technology) παρέχει μεθοδολογίες και λογισμικό για να υποστηρίξει: (ι) τη μοντελοποίηση των διεργασιών ως ροής εργασιών με συγκεκριμένες προδιαγραφές (ιι) την ανασχεδίαση των διεργασιών για τη βελτιστοποίηση (ιιι) την αυτοματοποίηση της ροής εργασιών για την δημιουργία εφαρμογών ροής εργασιών από τις προδιαγραφές [1]. Η διαχείρηση της ροής εργασιών (Workflow management)

υπόσχεται μια καινούργια λύση σε ένα παλιό πρόβλημα: τον έλεγχο, την παρακολούθηση, τη βελτιστοποίηση και την υποστήριξη των διεργασιών. Η καινοτομία της διαχείρησης της ροής εργασιών είναι η ολοκληρωμένη αναπαράσταση της λογικής των διεργασιών, κάτι που επιτρέπει την υπολογιστική υποστήριξη.

Παρά το ευρύ φάσμα εφαρμογών τους, τα συστήματα ροής εργασιών πάσχουν ακόμα από την έλλειψη μιας συμφωνηθείσας και τυποποιημένης τεχνικής μοντελοποίησης. Τα δίκτυα Petri, αποτελούν μια χρήσιμη τεχνική μοντελοποίησης για την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση συστημάτων ροής εργασιών [2]. Τα δίκτυα Petri είναι ένα καθιερωμένο εργαλείο για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση των διεργασιών. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μια γλώσσα σχεδίασης για την ανάλυση των προδιαγραφών σύνθετων ροών εργασιών. Η θεωρία πάνω στην οποία είνα βασισμένα τα δίκτυα Petri μας δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ισχυρών τεχνικών ανάλυσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου ροής των εργασιών.

Τα δίκτυα Petri συγκεντρώνουν όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για την εφαρμογή της διαχείρησης ροής εργασιών. Υπάρχουν τουλάχιστον τρεις σημαντικοί λόγοι για να επιλέξουμε τα δίκτυα Petri: (ι) Μπορούν να είναι κατανοητά, ευκολόχρηστα αλλά και να περιγράφουν με πληρότητα το σύστημα επειδή έχουν ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο. (ιι) Βασίζονται στις καταστάσεις παρά στα γεγονότα. Έτσι υπάρχει ξεκάθαρος διαχωρισμός ανάμεσα στην διαθεσιμότητα μιας κατάστασης και την εκτέλεσή της. Ακόμα μπορεί να γίνει η μοντελοποίηση ταυτόχρονα διαθέσιμων (ανταγωνιστικών) διεργασιών. (ιιι) Παρέχουν πληρότητα τεχνικών ανάλυσης. Η χρήση προσομοίωσης επιτρέπει την ανάλυση σύνθετων ροών εργασιών και την πιστοποίηση της έλλειψης αδιεξόδων ή της απουσίας μη ενεργών μερών [3].

1.3 Διάρθρωση διατριβής

Η λογική για την διάρθρωση του περιεχομένου της διατριβής ήταν η εύκολη και όσο το δυνατόν πιο περιεκτική περιγραφή της δουλειάς που έχει γίνει χωρίς περιττές επεκτάσεις σε θέματα που δεν άπτονται της θεματολογίας της αλλά και χωρίς θεωρητικά ή πειραματικά κενά που θα μείωναν την αξιοπιστία της. Έχοντας υπ'όψη τα παραπάνω η διατριβή συντάχθηκε ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο της **Εισαγωγής** περιγράφεται συνοπτικά το θέμα της διατριβής (προσδιορισμός θέματος), το γιατί άξιζε να ασχοληθούμε με το θέμα αυτό (η σημασία της διαχείρισης της ροής εργασιών) και το πώς οργανώθηκε η παρουσίασή του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της ***Θεωρητικής Περιγραφής*** παρατίθεται η θεωρητική περιγραφή της μεθοδολογίας SADT, που μοντελοποιεί τις εργασίες του συνεργείου. Επίσης αναλύεται λεπτομερώς η μεθοδολογία IDEF0 που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική μοντελοποίηση. Επίσης αναλύονται τα έγχρωμα δίκτυα Petri, που αποτέλεσαν το κύριο εργαλείο της τελικής μοντελοποίησης καθώς και τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους.

Στη συνέχεια ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο της **Περιγραφής του Μοντέλου Συνεργείου Αυτοκινήτων** όπου αρχικά αναλύεται το πως έγινε η διαδικασία αντιστοίχισης των ιδιοτήτων της SADT με τις αντίστοιχες ιδιότητες των δικτύων Petri. Με τη βοήθεια της παραπάνω αντιστοίχισης προέκυψε το πολύ-επίπεδο δίκτυο Petri, το οποίο αναλύεται λεπτομερώς στη συνέχεια του κεφαλαίου. Κατόπιν τροποποιούμε το αρχικό αυτό μοντέλο έτσι ώστε να περιλαμβάνει το σύστημα διαχείρισης ανθρωπίνων λαθών. Το σύστημα αυτό έχει άμεσο στόχο τον έγκαιρο εντοπισμό και την αντιμετώπιση ενδεχόμενων ανθρώπινων λαθών. Θα αναλυθεί η λειτουργία του προαναφερθέντος συστήματος και θα επεξηγηθεί η δράση του σε κάθε υπό-δίκτυο του συνολικού δικτύου Petri.

Το τέταρτο κεφάλαιο, με τίτλο ***Προσομοίωση/μέτρηση απόδοσης συστήματος***, ξεκινά με την αιτιολόγηση της αναγκαιότητας μέτρησης της απόδοσης ενός παραγωγικού συστήματος καθώς και με το πώς τα δίκτυα Petri μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για ένα τέτοιο σκοπό. Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της λειτουργίας του μοντέλου του συνεργείου. Αυτό έχει ως στόχο να καταστεί ακόμα πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης ανθρώπινων λαθών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, με τίτλο **Πειράματα αξιολόγησης εξυπηρέτησης σε διαφορετικές συνθήκες εργασίας**, θα ασχοληθούμε με την αναλυτική περιγραφή όλων των πειραμάτων που πραγματοποιήσαμε για να αξιολογήσουμε τη λειτουργεία του μοντέλου μας και να βγάλουμε τα όποια συμπεράσματά μας.

Στο επόμενο κεφάλαιο, το έκτο, με τίτλο **Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία**, γίνεται μία σύντομη ανακεφαλαίωση των στόχων της παρούσας συνθετικής διατριβής και αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν. Ακολουθούν κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της διατριβής.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, με τίτλο **Βιβλιογραφία** παρατίθενται όλα τα επιστημονικά άρθρα, τα βιβλία και οι υπόλοιπες πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στη συγγραφή της παρούσας συνθετικής διατριβής.

2.Θεωρητική Περιγραφή

2.1 Μεθοδολογία SADT

Η μεθοδολογία Δομημένης Ανάλυσης και Σχεδίου - Structured Analysis and Design Technique (SADT) αποτελεί μία ευρύτατα διαδεδομένη μέθοδο διαγραμματικής περιγραφής δομημένων συστημάτων. Αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του ΄60, πρώτη κύρια εφαρμογή της ήταν η αεροπορική βιομηχανία ενώ αργότερα υιοθετήθηκε σε εφαρμογές διαφόρων κλάδων και επιστημονικών πεδίων όπως στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας, στο σχεδιασμό τεχνολογιών, στις τηλεφωνικές επικοινωνίες στα δίκτυα παραγωγής κ.α [2].

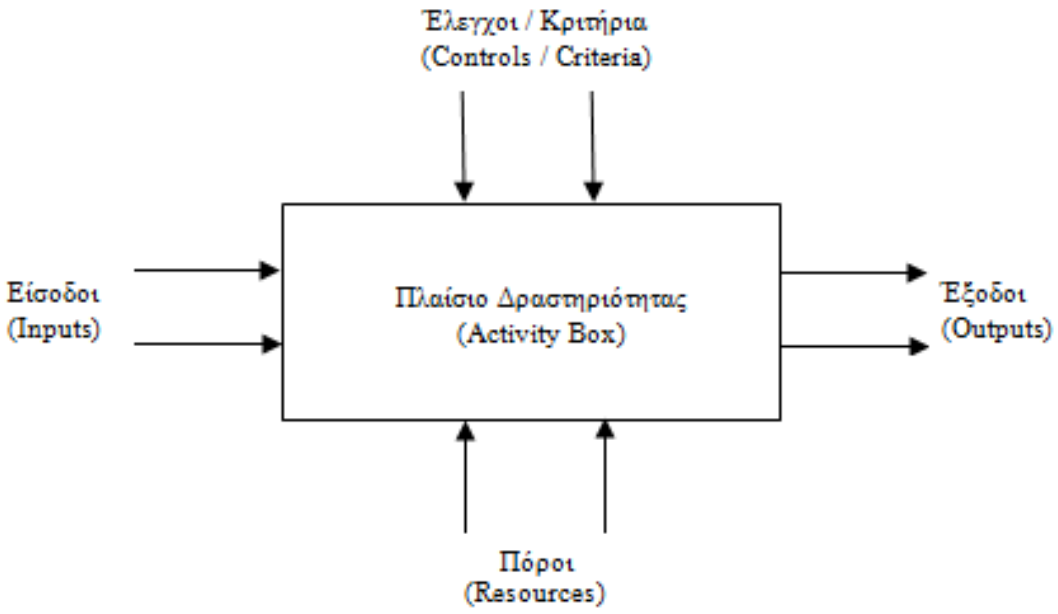
Η τεχνική SADT περιλαμβάνει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τη μοντελοποίηση των λειτουργιών ενός συστήματος. Η μοντελοποίηση αυτή αποσκοπεί στην περιγραφή των διαφόρων δραστηριοτήτων, των μεταξύ τους σχέσεων αλλά και των πληροφοριακών δεδομένων που απορρέουν από αυτές τις συσχετίσεις. Δεν αποτελεί σκοπό της η ακριβής περιγραφή του τρόπου με τον οποίο εκτελείται η κάθε διαδικασία.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της SADT συνοψίζονται παρακάτω :

- Στα μοντέλα δεν περιλαμβάνεται το χρονικό στοιχείο, δηλαδή δεν εξετάζεται η αλληλουχία των δραστηριοτήτων. Αντικείμενο της μοντελοποίησης αποτελεί η ορθή σύνδεση των δραστηριοτήτων προκειμένου να επιτευχθεί ο τελικός στόχος.
- Τα χρησιμοποιούμενα σύμβολα είναι μόνο δύο, γεγονός που καθιστά τη SADT αρκετά απλή σημασιολογικά. Τα δύο αυτά σύμβολα είναι τα *πλαίσια (activity boxes)* και τα *βέλη (arrows).* Τα πλαίσια χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των δραστηριοτήτων ενώ τα βέλη υποδηλώνουν των τρόπο αλληλεπίδρασής τους.

- Παρέχεται η δυνατότητα ανάπτυξης ιεραρχικών μοντέλων κατεύθυνσης “από πάνω προς τα κάτω” (top-down approach) με σκοπό την βαθύτερη και αναλυτικότερη περιγραφή ενός συστήματος.

Το βασικό δομικό στοιχείο της SADT φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 2.1. Αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλαίσιο ή πλαίσιο δραστηριότητας (activity box) το οποίο δέχεται εισόδους από τρείς πλευρές και βγάζει τις εξόδους του από την τέταρτη. Τα πλαίσια δραστηριότητας αναπαριστούν τις λειτουργίες του συστήματος που μοντελοποιείται. Η ονομασία τους είναι αυθαίρετη και δεν παρέχει κάποια ειδική λειτουργικότητα πέραν της περιγραφής της λειτουργίας που αναπαρίσταται.



Εικόνα 2.1: Βασικό δομικό στοιχείο της SADT.

Μέσω της σύνδεσης των διαφόρων πλαισίων δραστηριοτήτων επιτυγχάνεται η ανταλλαγή πληροφοριών καθώς και η ροή των εργασιών μέσα στο σύστημα. Τα στοιχεία εισόδου της κάθε διεργασίας προέρχονται από τα στοιχεία εξόδου άλλων

δραστηριοτήτων. Αντίστοιχα οι έξοδοι της κάθε διεργασίας χρησιμεύουν είτε σαν είσοδοι σε άλλες είτε σαν έξοδοι του συστήματος.

Τα στοιχεία εισόδου και εξόδου χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1. Αναλυτικά η κάθε κατηγορία περιγράφει τα εξής:

- *Στοιχεία Εισόδου (Inputs):* Τοποθετούνται αριστερά του πλαισίου. Τα στοιχεία αυτά τροφοδοτούν την δραστηριότητα και είτε μετασχηματίζονται είτε αναλώνονται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Μπορεί για παράδειγμα να είναι πρώτες ύλες, αναλώσιμα κ.α.
- *Πόροι (Recourses):* Τοποθετούνται στην κάτω πλευρά του πλαισίου. Αντιπροσωπεύουν τα μέσα τα οποία εκτελούν το μετασχηματισμό από τα στοιχεία εισόδου στα στοιχεία εξόδου και δεν μεταβάλλονται ή αναλώνονται κατά τη διάρκεια της δραστηριότητας. Πόροι μπορεί να είναι ο μηχανολογικός εξοπλισμός, το ανθρώπινο δυναμικό κ.α.
- *Έλεγχοι / Κριτήρια (Controls / Criteria):* Τοποθετούνται στην πάνω πλευρά του πλαισίου. Χρησιμοποιούνται ως πρότυπα για να ελεγχθεί αν η διεργασία ολοκληρώθηκε επιτυχώς ή όχι. Τέτοια πρότυπα αποτελούν νομοθετικές διατάξεις, πρότυπα ασφάλειας, πρότυπα ποιότητας κ.α.
- *Στοιχεία Εξόδου (Outputs):* Τοποθετούνται στη δεξιά πλευρά του πλαισίου. Αποτελούν το παραδοτέο της διαδικασίας που εκτελείται από ένα πλαίσιο δραστηριότητας καθώς και πληροφορία προς άλλα πλαίσια. Τέτοιου είδους πληροφορία μπορεί να είναι ανεπιθύμητα συμβάντα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ή και προβλήματα στην παραγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος.

Τα παραπάνω στοιχεία χρησιμεύουν στην περιγραφή της πληροφορίας που διακινείται στο σύστημα, της ροής της καθώς και για τη σύνδεση των πλαισίων.

Υπάρχουν πέντε πιθανοί τρόποι σύνδεσης των πλαισίων:

1. Στοιχείο Εξόδου – Στοιχείο Εισόδου
2. Στοιχείο Εξόδου – Έλεγχος / Κριτήριο
3. Στοιχείο Εξόδου – Πόρος
4. Στοιχείο Εξόδου – Ανάδραση (Στοιχείο Εισόδου)
5. Στοιχείο Εξόδου – Ανάδραση (Έλεγχος / Κριτήριο)

Στα πλαίσια της εξειδίκευσης και εμβάθυνσης στην περιγραφή ενός συστήματος απαιτείται συχνά η ανάλυση κάποιων δραστηριοτήτων σε μεγαλύτερο βάθος ακόμα και η αναδόμησή τους σε επιμέρους δραστηριότητες. Με τη μέθοδο SADT υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης ιεραρχικών διαγραμμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση το πρώτο διάγραμμα αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο ενώ τα υπόλοιπα συνίσταται να αποτελούνται από τρία έως έξι. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα στον αναλυτή να διαχειριστεί καλυτέρα και αποδοτικότερα σημαντικά μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών.

Τα διαγράμματα του υψηλού επιπέδου θεωρούνται ως γονείς – γεννήτορες των διαγραμμάτων χαμηλότερου επιπέδου τα οποία ονομάζονται και απόγονοι – παιδιά. Κάθε διάγραμμα μπορεί να έχει από κανένα έως έξι διαγράμματα απογόνους. Η αρχική δραστηριότητα στο ανώτερο διάγραμμα αποκαλείται “δραστηριότητα 0” και συμβολίζεται ως A0. Σκοπός τη είναι να παρουσιάσει το γενικό θέμα του περιγραφόμενου συστήματος και την οπτική της μοντελοποίησης. Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται “διάγραμμα περιεχομένου” ή A-0 και αποτελεί γονέα όλων των παρακάτω διαγραμμάτων.

Στο σημείο αυτό να σημειώσουμε ότι κάθε δραστηριότητα σε ένα μοντέλο SADT πρέπει να αριθμείται. Το σύστημα αρίθμησης αποτελείται από το γράμμα Α και ένα αριθμητικό. Έτσι, κάθε δραστηριότητα αναγνωρίζεται με τρόπο μοναδικό. Η δραστηριότητα A0 περιλαμβάνει τις υπο-δραστηριότητες A1,A2,A3 κτλ. Αντίστοιχα, οι δραστηριότητα A1 αποτελείται από τις A11,A12,A13 κτλ. Παρατηρούμε δηλαδή

ότι σε κάθε επίπεδο της ιεραρχίας προστίθεται και ένα ακόμα ψηφίο στον κωδικό της κάθε δραστηριότητας.

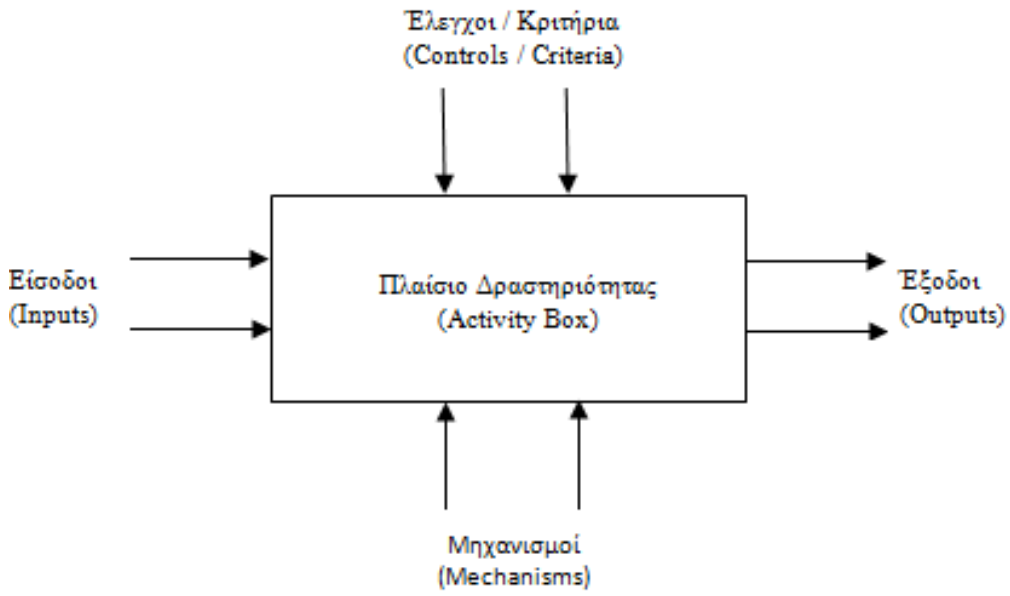
Κάθε δραστηριότητα που αναλύεται σε υποεπίπεδο μεταβιβάζει στον απόγονό της τα γενικά της χαρακτηριστικά. Οι σχέσεις οι οποίες προέρχονται από τη δραστηριότητα-γονεά ονομάζονται διασυνοριακές/εξωτερικές σχέσεις (boundary arrows) ενώ αυτές οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ δραστηριοτήτων του ίδιου διαγράμματος ονομάζονται εσωτερικές σχέσεις (internal arrows).

Σαν γενικό συμπέρασμα, η μέθοδος SADT αποτελεί ένα εύχρηστο και σχετικά απλό συστηματικό τρόπο αναπαράστασης μοντέλων διεργασιών. Αυτό γιατί χρησιμοποιεί ένα μικρό αριθμό εννοιών και συμβόλων με αποτέλεσμα να είναι εύκολα κατανοητή. Αντιθέτως, αποτελεί μια στατική μέθοδο καθότι παρουσιάζει μόνο τις δραστηριότητες και τις αλληλεπιδράσεις τους χωρίς να λαμβάνει υπόψη λεπτομέρειες όπως ο χρόνος που απαιτείται για την περαίωση κάθε εργασίας ή το κόστος της κάθε δραστηριότητας.

2.2 Μεθοδολογία IDEF0

Η μεθοδολογία ενσωμάτωσης προσδιορισμού για μοντελοποίηση λειτουργιών - Integration Definition for Function Modeling (IDEF0) αποτελεί μια μεθοδολογία μοντελοποίησης ενεργειών και δραστηριοτήτων ενός συστήματος, προέρχεται από τη μέθοδο SADT και ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια μεθόδων IDEF [3].

Το μοντέλο IDEF0 επιτρέπει στο χρήστη να απεικονίσει μια διαδικασία ως ένα σύνολο εισόδων (inputs), ελέγχων (controls), μηχανισμών (mechanisms) και (outputs) τα οποία αναφέρονται εν συντομία ως (ICOM). Βασική οντότητα λειτουργίας είναι και εδώ (όπως και στη SADT) το πλαίσιο δραστηριότητας το οποίο και φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Βασική δομική μονάδα της μεθόδου IDEF0

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου IDEF0 είναι τα παρακάτω:

- Τα μοντέλα της μεθόδου δεν περιλαμβάνουν τη συνισταμένη του χρόνου, δηλαδή δεν μελετάται η αλληλουχία των δραστηριοτήτων. Αντικείμενο της μοντελοποίησης είναι ο τρόπος επικοινωνίας των δραστηριοτήτων καθώς και η ροή της πληροφορίας μέσα στο σύστημα.
- Η γλώσσα IDEF0 χαρακτηρίζεται από την απλότητα και την λιτότητά της. Για την ακρίβεια χρησιμοποιούνται δύο μόνο γραφικά στοιχεία που είναι τα πλαίσια και τα βέλη.
- Τα μοντέλα που αναπτύσσονται με χρήση της IDEF0 μπορούν να ακολουθήσουν μια ιεραρχική δομή η οποία αναπτύσσεται από πάνω προς τα κάτω (top-down approach).
- Παρέχεται η δυνατότητα λεκτικής τεκμηρίωσης των περιγραφόμενων από το μοντέλο λειτουργιών.

Οι κανόνες που διέπουν την ιεραρχία σε ένα σύστημα που περιγράφεται μέσω της IDEF0 είναι οι ίδιοι οι οποίοι ισχύουν και στην περίπτωση της SADT πράγμα που οφείλεται στη στενή συγγένεια των δύο μεθόδων.

2.3 Δίκτυα Petri

Τα δίκτυα Petri είναι μια γραφική γλώσσα μοντελοποίησης η οποία χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό, την περιγραφή και την ανάλυση κατανεμημένων συστημάτων. Η πιο διαδεδομένη παραλλαγή της μεθόδου είναι τα έγχρωμα Δίκτυα Petri (Colored Petri Nets - CPN) και με αυτήν θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Βασικό χαρακτηριστικό της αποτελεί ο συνδυασμός της γραφικής μεθόδου μοντελοποίησης των δικτύων Petri μαζί με τη γλώσσα προγραμματισμού CPN-ML η οποία βασίζεται στην γλώσσα μοντελοποίησης SML (Standard Modeling Language). Στον επιστημονικό τομέα, τα δίκτυα Petri χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών στους τομείς του σχεδιασμού υλικού, του λογισμικού ηλεκτρονικών υπολογιστών, των τηλεπικοινωνιών, των συστημάτων παραγωγής κ.α [4].

Η ανάπτυξη των έγχρωμων δικτύων Petri προέκυψε από την επιθυμία να αναπτυχθεί μια γλώσσα μοντελοποίησης ώστε να χρησιμοποιηθεί για τα συστήματα του μεγέθους και της πολυπλοκότητας που συναντώνται στη βιομηχανία.

Τα έγχρωμα δίκτυα Petri συνδυάζουν τη δύναμη αναπαράστασης των απλών δικτύων Petri με τις δυνατότητες των γλωσσών προγραμματισμού. Τα απλά δίκτυα δίνουν τη δυνατότητα της περιγραφής του συγχρονισμού ταυτόχρονων διεργασιών που παρατηρούνται στην πράξη, ενώ οι γλώσσες προγραμματισμού παρέχουν τα μέσα για να καθορίζονται οι τύποι των στοιχείων του συστήματος και να χειρίζονται οι τιμές των στοιχείων αυτών.

Κάθε έγχρωμο δίκτυο μπορεί να μεταφραστεί σε ένα ισοδύναμο (ως προς τη συμπεριφορά) απλό δίκτυο και αντίστροφα. Όμως τα έγχρωμα δίκτυα αποτελούν μια πιο συμπαγή και βολική γλώσσα αναπαράστασης. Η δυνατότητα ανάθεσης τύπων και τιμών στις μάρκες έχει ως αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση ενός σημαντικά μικρότερου αριθμού θέσεων για την αναπαράσταση ενός στοιχείου ή συστήματος.

Ένα μοντέλο έγχρωμων δικτύων Petri περιγράφει ένα σύνολο καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα σύστημα και τις μεταβάσεις μεταξύ τους. Η κατασκευή ενός τέτοιου μοντέλου μπορεί να στηριχθεί σε συσχετιζόμενες αλλά αυτοτελείς ομάδες (modules), κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε μεγάλα και πολύπλοκα

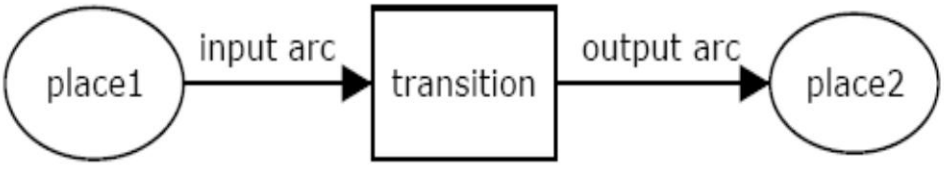
συστήματα. Η όλη λειτουργία στηρίζεται στην αρχή της ιεραρχίας καθώς οι ομάδες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε διαφορετικά επίπεδα.

Ένα μοντέλο έγχρωμων δικτύων Petri είναι εκτελέσιμο. Ο έλεγχος της συμπεριφοράς του εκάστοτε συστήματος γίνεται μέσω της προσομοίωσης του σε κατάλληλο εργαλείο λογισμικού (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού CPN Tools). Παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης της διάστασης του χρόνου στα μοντέλα, πράγμα που ενισχύει τη ρεαλιστικότητα και την ευελιξία τους. Τα μοντέλα που κάνουν χρήση αυτής της δυνατότητας ονομάζονται και *χρονισμένα*.

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός δικτύου Petri είναι τα εξής:

- Η *θέση (place),* που περιγράφει μία κατάσταση και συμβολίζεται με μια έλλειψη ή έναν κύκλο.
- Η *μετάβαση (transition),* η οποία αποτελεί μια ενέργεια και συμβολίζεται με ένα ορθογώνιο.
- Το *τόξο (arc)*, που είναι η γραμμή που ενώνει μια θέση με μια μετάβαση ή το αντίστροφο.
- Η *μάρκα (token),* η οποία αναπαριστά μια τιμή ή ένα σύνολο τιμών και μεταβαίνει από θέση σε θέση μέσω μεταβάσεων.

Ένα στοιχειώδες δίκτυο Petri φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Ένα στοιχειώδες δίκτυο Petri με δύο θέσεις και μία μετάβαση

Οι θέσεις, όπως και οι μεταβάσεις, παίρνουν ονόματα τα οποία οφείλουν να περιγράφουν κατάλληλα τη λειτουργία ή την κατάσταση την οποία αντιπροσωπεύουν. Κάθε θέση χαρακτηρίζεται από ένα τύπο που καθορίζει το είδος των δεδομένων που μπορεί να περιέχει. Ο τύπος των δεδομένων μπορεί να είναι απλός, όπως για παράδειγμα ένας ακέραιος (integer) ή μία εγγραφή (record) με παραπάνω από ένα πεδία. Σε αντιδιαστολή με τη γλωσσά προγραμματισμού C/C++, θα μπορούσαμε να περιγράψομε την εγγραφή ως μία δομή δεδομένων. Οι μάρκες για να μπορούν να βρεθούν σε μια θέση θα πρέπει να ανήκουν στον αντίστοιχο τύπο δεδομένων, ο οποίος θα χαρακτηρίζει τη θέση αυτή. Η κατάσταση ενός δικτύου καθορίζεται από την κατανομή των μαρκών στις θέσεις.

Οι αλλαγές των μαρκών ανάμεσα στις θέσεις γίνονται μέσω των μεταβάσεων και των τόξων που τις συνδέουν. Αν το τόξο από μια θέση κατευθύνεται προς μια μετάβαση ονομάζεται εισερχόμενο τόξο (input arc), ενώ αν το τόξο κατευθύνεται από μια μετάβαση σε μια θέση τότε ονομάζεται εξερχόμενο τόξο (output arc). Μία μετάβαση δέχεται τις μάρκες από τα τόξα εισόδου και τις προωθεί στα τόξα εξόδου. Επίσης, μπορεί να δεχτεί εντολές ενέργειας και ελέγχου με χρήση της γλώσσας CPN-ML σε τρία συγκεκριμένα τμήματα.

- Στο *τμήμα ελέγχου (guard)*, ορίζεται μία συνθήκη που ελέγχει την πυροδότηση ή μη της μετάβασης. Η συνθήκη αυτή πρέπει να είναι λογικής Boolean με χρήση των μεταβλητών των τόξων εισόδου.
- Στο *τμήμα κώδικα (code segment)*, μπορεί να γίνει επεξεργασία των δεδομένων εισόδου και να προωθηθούν στην έξοδο διαφορετικής μορφής δεδομένα εξόδου.
- Στο *τμήμα χρόνου (timer)*, μπορεί να οριστεί μία χρονική καθυστέρηση στην ενεργοποίηση και περάτωση της εργασίας της μετάβασης προσθέτοντας περισσότερο το στοιχείο του ρεαλισμού μέσα στο σύστημα.

Τα τόξα πρέπει να έχουν ως επιγραφές, εκφράσεις (arc expressions) που καθορίζουν τον τύπο των μαρκών που μπορούν να μεταφέρουν. Επιπλέον υπάρχει πιθανότητα να έχουν εντολές, οι οποίες θα ελέγχουν πότε το τόξο θα μεταφέρει δεδομένα και τι είδους θα είναι αυτά. Αυτό είναι εφικτό είτε με χρήση

συναρτήσεων (*functions*), οι οποίες θα έχουν οριστεί στις δηλώσεις (*declarations*), είτε με απευθείας χρήση εντολών πάνω στα τόξα. Ανάμεσα σε μια θέση και μια μετάβαση μπορούν να υπάρχουν μέχρι δύο τόξα διαφορετικής κατεύθυνσης. Όταν αυτού του είδους τα τόξα έχουν ίδιες εκφράσεις, μπορούν να θεωρηθούν ως ένα που αντιμετωπίζεται ως διπλό τόξο (double arc).

Οι μάρκες τοποθετούνται αρχικά σε συγκριμένες θέσεις δίνοντας έτσι ένα αρχικό μαρκάρισμα (initial marking). Στη συνέχεια μεταφέρονται μέσα στο δίκτυο παρέχοντας έτσι διαφορετικές καταστάσεις του δικτύου.

Όπως προαναφέραμε, τα δίκτυα Petri υποστηρίζουν την λειτουργία της ιεραρχίας. Η ιδιότητα αυτή τους δίνει τη δυνατότητα να περιγράφουν με ακρίβεια αρκετά πολύπλοκα μοντέλα, αναλύοντας σε υποεπίπεδα διαφορετικές λειτουργίες του συστήματος. Τα υποεπίπεδα αυτά ονομάζονται σελίδες (pages).

Στα ιεραρχικά έγχρωμα *δίκτυα Petri* μία μετάβαση μπορεί να αναλυθεί σε ένα ξεχωριστό υποδίκτυο, παρέχοντας έτσι μια πιο ακριβή περιγραφή για το ποια ακριβώς λειτουργία εκτελεί. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση μιας πιο απλής και γενική μορφής του μοντέλου σε ανώτερα επίπεδα, χωρίς να μας απασχολεί το πώς λαμβάνουμε τα κατάλληλα αποτελέσματα. Αντίθετα, σε κάποιο άλλο κατώτερο επίπεδο περιγράφεται αναλυτικά και με λεπτομέρειες η λειτουργικότητα συγκεκριμένων στοιχείων του δικτύου.

Η ιεραρχία στα δίκτυα Petri επιτυγχάνεται με χρήση των παρακάτω δομικών στοιχείων.

- *Μεταβάσεις Αντικατάστασης (Substitution Transitions)* και *Υποσελίδες (Subpages)*: Η μετάβαση αντικατάστασης ή μακρο-μετάβαση είναι μία γενική περιγραφή ενός μικρότερου δικτύου, και αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου δικτύου. Ξεχωρίζει από τις απλές μεταβάσεις λόγω της ετικέτας αντικατάστασης που διακρίνεται στο κάτω μέρος μίας μετάβασης (εικόνα 2.4). Κάθε μακρο-μετάβαση κρύβει μια υποσελίδα η οποία είναι ένα άλλο χρωματισμένο δίκτυο Petri και περιέχει την ακριβή λειτουργία της αντίστοιχης μακρο-μετάβασης.



Εικόνα 2.4: Μετάβαση Αντικατάστασης

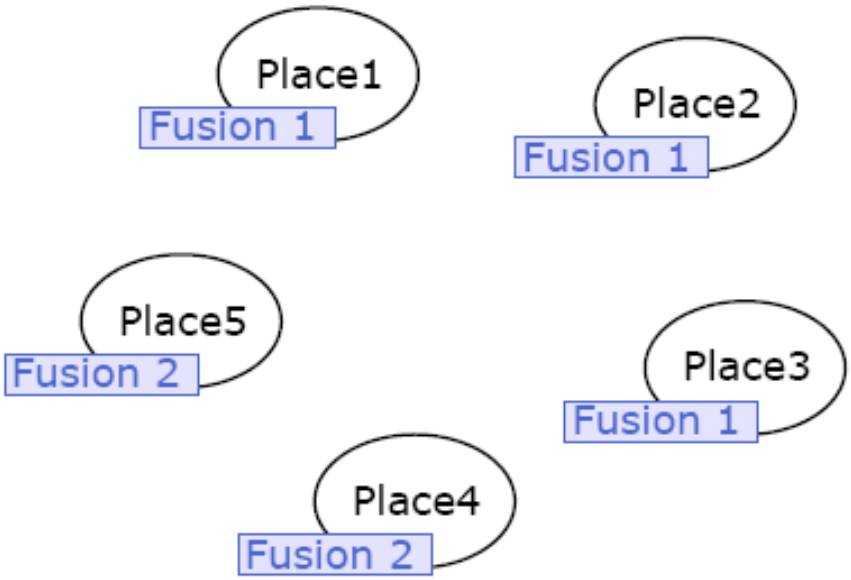
- *Θέσεις Πύλης (Ports) και Υποδοχής(Sockets):* Για να επικοινωνεί η κάθε υποσελίδα με το υπόλοιπο σύστημα, διαθέτει ένα αριθμό εξειδικευμένων θέσεων. Οι θέσεις αυτές μπορεί να είναι εισόδου (*In-tags*), εξόδου (*Out-tags*), ή εισόδου και εξόδου (*I/O tags*) όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 2.5. Αυτές οι θέσεις ονομάζονται θέσεις πύλης. Μια θέση πύλης εισόδου σε μια υποσελίδα μπορεί να δεχτεί μάρκες, μια θέση πύλης εξόδου μπορεί να παραδώσει μάρκες, ενώ μια θέση εισόδου/εξόδου μπορεί να κάνει και τα δύο.

  Οι θέσεις πύλης που βρίσκονται σε υποσελίδες έχουν κάποιες αντίστοιχες θέσεις σε άλλες σελίδες στο σύστημα με τις οποίες συνδέονται και ανταλλάσουν μάρκες. Αυτές οι θέσεις ονομάζονται θέσεις υποδοχής και μπορούν να είναι επίσης εισόδου, εξόδου και εισόδου/εξόδου. Η διαδικασία κατά την οποία συνδέεται μια θέση πύλης με μια υποδοχής ονομάζεται ανάθεση πύλης (port assignment). Όταν γίνεται αυτή η ανάθεση οι θέσεις γίνονται στην ουσία μία και οι μάρκες τους είναι πάντα οι ίδιες. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η παραλαβή και αποστολή μαρκών από και προς μια υποσελίδα.



Εικόνα 2.5: Μορφή των θέσεων πύλης και υποδοχής

- *Θέσεις Συγχώνευσης (Fusion Places):* Είναι μία ομάδα από θέσεις (εικόνα 2.6) που λειτουργούν ως μία παρόλο που είναι ξεχωριστές. Όταν μία μάρκα προστεθεί ή αφαιρεθεί σε μία από αυτές τις θέσεις η ίδια μάρκα θα προστεθεί ή θα αφαιρεθεί αντίστοιχα από όλες τις υπόλοιπες θέσεις που ανήκουν στην ίδια ομάδα συγχώνευσης. Θέσεις συγχώνευσης μπορούν να υπάρχουν όχι μόνο στην ίδια σελίδα αλλά και σε πολλές σελίδες διαφορετικού επιπέδου.



Εικόνα 2.6: Θέσεις Συγχώνευσης. Οι θέσεις 1,2,3 ανήκουν σε μία ομάδα και συμπεριφέρονται στην ουσία σαν μία θέση, ενώ οι θέσεις 4 και 5 ανήκουν σε μία άλλη ομάδα

Όσον αφορά τα χρονισμένα *δίκτυα Petri,* η ιδέα τους βασίζεται στην ύπαρξη ενός καθολικού ρολογιού οι τιμές του οποίου μπορεί να είναι ακέραιες ή πραγματικές και αντιπροσωπεύουν τον χρόνο μοντελοποίησης. Το ρολόι αυτό δεν έχει καμία έννοια εκτός του μοντέλου, είναι εικονικό και δεν γίνεται να συγκριθούν οι τιμές του με τιμές πραγματικού χρόνου. Τώρα οι μάρκες εκτός από τις τιμές τους, μπορούν να έχουν και τιμές χρόνου τις οποίες αποκαλούμε χρονικές σφραγίδες (time stamps). Οι χρονικές σφραγίδες εκφράζουν τον ελάχιστο χρόνο προσομοίωσης μετά την παρέλευσή του οποίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μάρκα. Επίσης, μέσα

στο δίκτυο μπορεί να γίνει χρήση της χρονικής επιγραφής (time inscription), η οποία προσδιορίζεται με το σύμβολο “@”. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, πάνω στο αντίστοιχο τμήμα μιας μετάβασης μπορεί να δοθεί εντολή χρονικής καθυστέρησης της πυροδότησης ή ολοκλήρωσής της.

.

2.4 Πλεονεκτήματα υλοποίησης σε Δίκτυα Petri

Τα δίκτυα Petri και η μέθοδος SADT αποτελούν δύο ευρύτατα διαδεδομένες μεθοδολογίες μοντελοποίησης και περιγραφής συστημάτων. Διαθέτουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά αλλά διαφέρουν σε αρκετούς τομείς πράγμα που καθιστά διακριτούς τους ρόλους τους.

Αμφότερες οι μέθοδοι δίνουν γραφικές αναπαραστάσεις του υπό μοντελοποίηση συστήματος. Σε αυτές περιέχονται τα κυριότερα δομικά στοιχεία του συστήματος καθώς και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Παράλληλα, και οι δύο μέθοδοι υποστηρίζουν ιεραρχικά μοντέλα τα οποία χρησιμεύουν στην περιγραφή πολυσύνθετων εφαρμογών.

Η μεγαλύτερη τους διαφορά έγκειται στην ικανότητα των δικτύων Petri να προσθέτουν εξεζητημένη λειτουργικότητα και πολυπλοκότητα στο σύστημα με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού SML. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να προσδώσει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στο μοντέλο του καθώς και να το προσομοιώσει πάνω σε πληθώρα σεναρίων επαληθεύοντας έτσι την σωστή λειτουργία του.

Στην παρούσα μελέτη, αποφασίστηκε η υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου σε δίκτυα Petri για τους παρακάτω κυρίως λόγους:

- Το μοντέλο που περιγράφεται με τη χρήση της SADT είναι στατικό και δεν προσδίδει τη δυνατότητα κάποιου είδους αλληλεπίδρασης με το χρήστη. Η λειτουργικότητά του περιορίζεται στην περιγραφή των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα καθώς και των παραγόντων μέσω των οποίων

επικοινωνούν. Δεν υπάρχει δηλαδή κάποιου είδους πρόνοια για την εισαγωγή ποσοτικών στοιχείων στο σύστημα. Σε αντίθεση, στα δίκτυα Petri είναι δυνατή η εισαγωγή πραγματικών δεδομένων όπως για παράδειγμα η πιθανότητα αστοχίας κάποιου παράγοντα ή η λογική λειτουργίας κάποιου κόμβου, πράγμα που ενισχύει τη ρεαλιστικότητα του τελικού συστήματος.

- Η παραπάνω έλλειψη αλληλεπίδρασης και η μη εισαγωγή ποσοτικών δεδομένων έχει ως συνέπεια το σύστημα να είναι αρκετά θεωρητικό. Με τα δίκτυα Petri, το σύστημα αποκτάει τη δυνατότητα άμεσης εφαρμογής πάνω σε πραγματικά σενάρια.
- Με τη βοήθεια των δικτύων Petri μπορούν να εξαχθούν στατιστικά στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος αφού υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων που προκύπτουν από την προσομοίωση του. Στην περίπτωση δε, που οι προσομοιώσεις γίνονται με την εισαγωγή πραγματικών δεδομένων τότε μπορούμε να έχουμε μία αρκετά καλή εικόνα για το ποια στοιχεία του μοντέλου παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη λειτουργία του αλλά και για τις επιπτώσεις τυχών αστοχιών. Συγκεκριμένα, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τους βρόχους που ενεργοποιούνται κατά την ομαλή λειτουργία του συστήματος ή κατά τη διάρκεια επίλυσης ενός προβλήματος, όπως επίσης και για το χρόνο που απαιτείται για την επίλυση μιας αστοχίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ελέγχουμε πιο άμεσα την ικανοποίηση ή μη των κριτηρίων αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας των βρόχων.

Γενικά, το δίκτυο που προκύπτει με χρήση των δικτύων Petri αποτελεί ένα ευέλικτο εργαλείο μηχανικού το οποίο μπορεί να δώσει μια πιο απτή και ρεαλιστική εικόνα της λειτουργίας του συνεργείου, βοηθώντας έτσι στη λήψη των αποφάσεων.

3. Περιγραφή Μοντέλου Συνεργείου Αυτοκινήτων

3.1 Αρχική μοντελοποίηση εξυπηρέτησης αυτοκινήτων

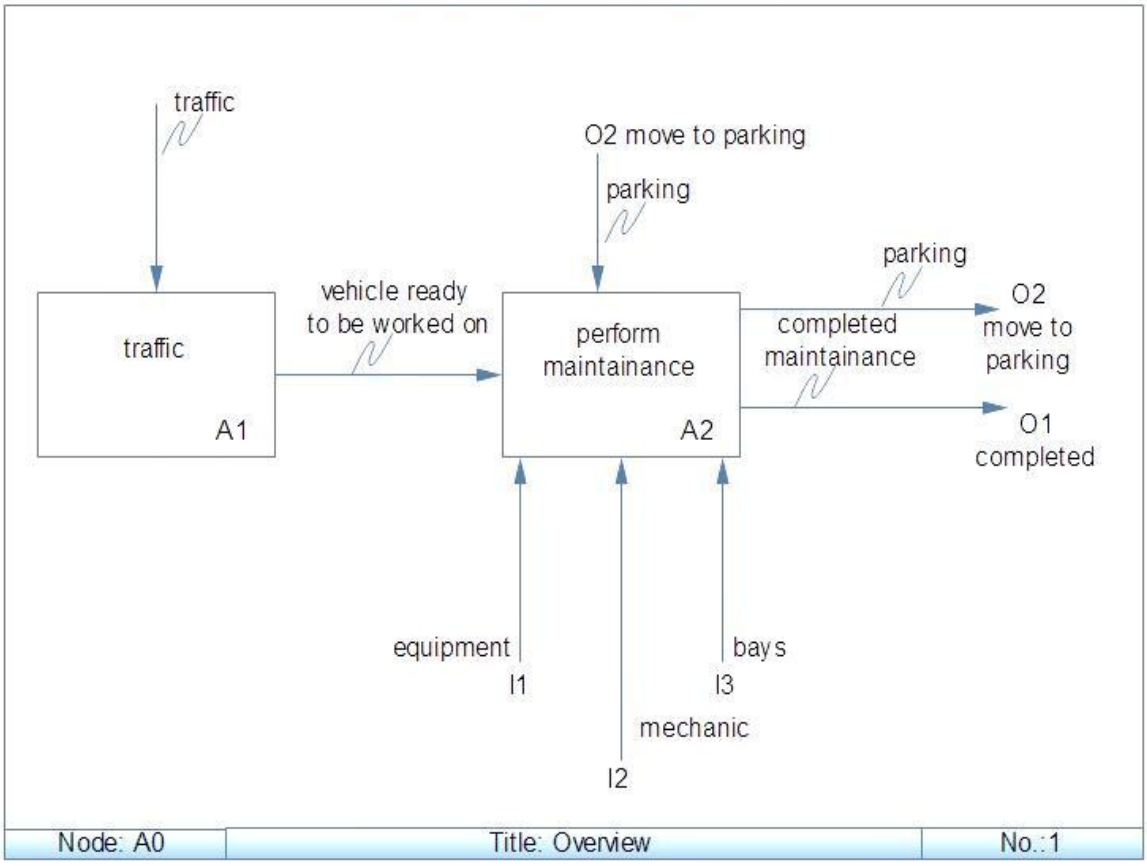
Για την αρχική μοντελοποίηση του προτεινόμενου συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία μοντελοποίησης Integrated Definition for Function Modeling – IDEF0. Η IDEF0 βασίζεται στο γενικότερο πλαίσιο της τεχνικής Structured Analysis and Design Technique (SADT), η οποία παρέχει ένα συστηματικό τρόπο περιγραφής και αναπαράστασης.

Αρχικά, η περιγραφή των εργασιών θα μετατραπεί σε ένα διάγραμμα IDEF0 για να μελετήσουμε τις ροές των εργασιών που απαιτούνται και τις επιδράσεις των συνθηκών εργασίας στις εργασίες ενός συνεργείου. Αυτό θα αποτελέσει την βάση για την περαιτέρω μοντελοποίηση με χρήση των δικτύων Petri ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση και η ανάλυση ιδιοτήτων των λειτουργιών του συνεργείου.

Η IDEF0 είναι μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους περιγραφής επιχειρησιακών διαδικασιών, που ανήκει στην οικογένεια μεθόδων IDEF. Αποτελείται από μια σειρά διαγραμμάτων ροής πληροφοριών με ιεραρχική ανάλυση. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι το μοντέλο που προκύπτει, ξεκινάει από ένα γενικό διάγραμμα πρώτου επιπέδου, που περιέχει τις εισόδους, εξόδους και διεργασίες του μοντέλου και σταδιακά αναλύεται λεπτομερώς σε άλλα υπό-επίπεδα.

Η μεθοδολογία μοντελοποίησης IDEF0, βασίζεται στη μεθοδολογία SADT (Structured Analysis and Design Technique) που αναπτύχθηκε από τον Douglas T. Ross και την SofTech Inc. Η μεθοδολογία SADT αναπτύχθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1960 (ξεκίνησε το 1969 και η πρώτη της μεγάλη εφαρμογή έγινε το 1973), κατά τη διάρκεια της επανάστασης του δομημένου προγραμματισμού. Η IDEF0 στην αυθεντική της μορφή, συμπεριλαμβάνει και ορισμούς της γραφικής γλώσσας μοντελοποίησης και περιγραφή της μεθοδολογίας για τα αναπτυσσόμενα μοντέλα [3].

Το μοντέλο που σχεδιάσαμε περιγράφει τη λειτουργία συντήρησης ενός συνεργείου αυτοκινήτων (το συνεργείο αυτό έχει σχεδιαστεί σε SADT με όνομα Automobile Service Station). Το αρχικό μοντέλο σε SADT περιλαμβάνει τις δραστηριότητες που εκτελούνται από τη στιγμή που ένας πελάτης εισέρχεται στο σύστημα και ζητά την επισκευή του οχήματος μέχρι την απομάκρυνση του από το σύστημα. Αποτελείται από τρεις κύριες διαδικασίες: την παραλαβή και προετοιμασία του οχήματος (Vehicle Ready to be Worked on), την πραγματοποίηση της συντήρησης (Perform Maintenance) και την επιστροφή του οχήματος στον πελάτη (Completed Maintenance). Παρακάτω (εικόνα 3.1) παρατίθεται ενδεικτικά το γενικό διάγραμμα IDEF0 του πρώτου επιπέδου.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα IDEF0 πρώτου επιπέδου

Η υλοποίηση του δικτύου Petri πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε στα διαγράμματα IDEF0 και περιγράφηκε

παραπάνω. Για την μετατροπή των διαγραμμάτων σε δίκτυα Petri χρησιμοποιήθηκαν οι εξής γενικοί κανόνες:

1. Τα κουτιά των διαγραμμάτων της SADT γίνονται μεταβάσεις (ορθογώνια παραλληλόγραμμα) που διαβάζουν εντολές και εκτελούν εργασίες.
2. Τα βέλη της SADT μετατρέπονται σε τόξα που καταλήγουν σε θέσεις (κύκλοι) οι οποίες περιγράφουν πληροφορίες, εντολές και θέσεις αναμονής.
3. Οι οντότητες της SADT (π.χ. προσωπικό, προϊόντα, πληροφορίες), αναπαρίστανται ως μάρκες στο δίκτυο Petri.

Το μοντέλο που αναπτύξαμε με δίκτυα Petri περιγράφει. την πραγματοποίηση της συντήρησης (Perform Maintenance). Το συνεργείο πραγματοποιεί τέσσερα είδη εργασιών συντήρησης (maintenance jobs):

1. Γενικούς Ελέγχους (Inspections)
2. Συντήρηση Μηχανής (Engine Maintenance)
3. Ευθυγράμμιση (Alignment)
4. Επιδιόρθωση/Εγκατάσταση Σιλανσιέ ή Αμορτισέρ (Muffler or Shock Repair/Installation)

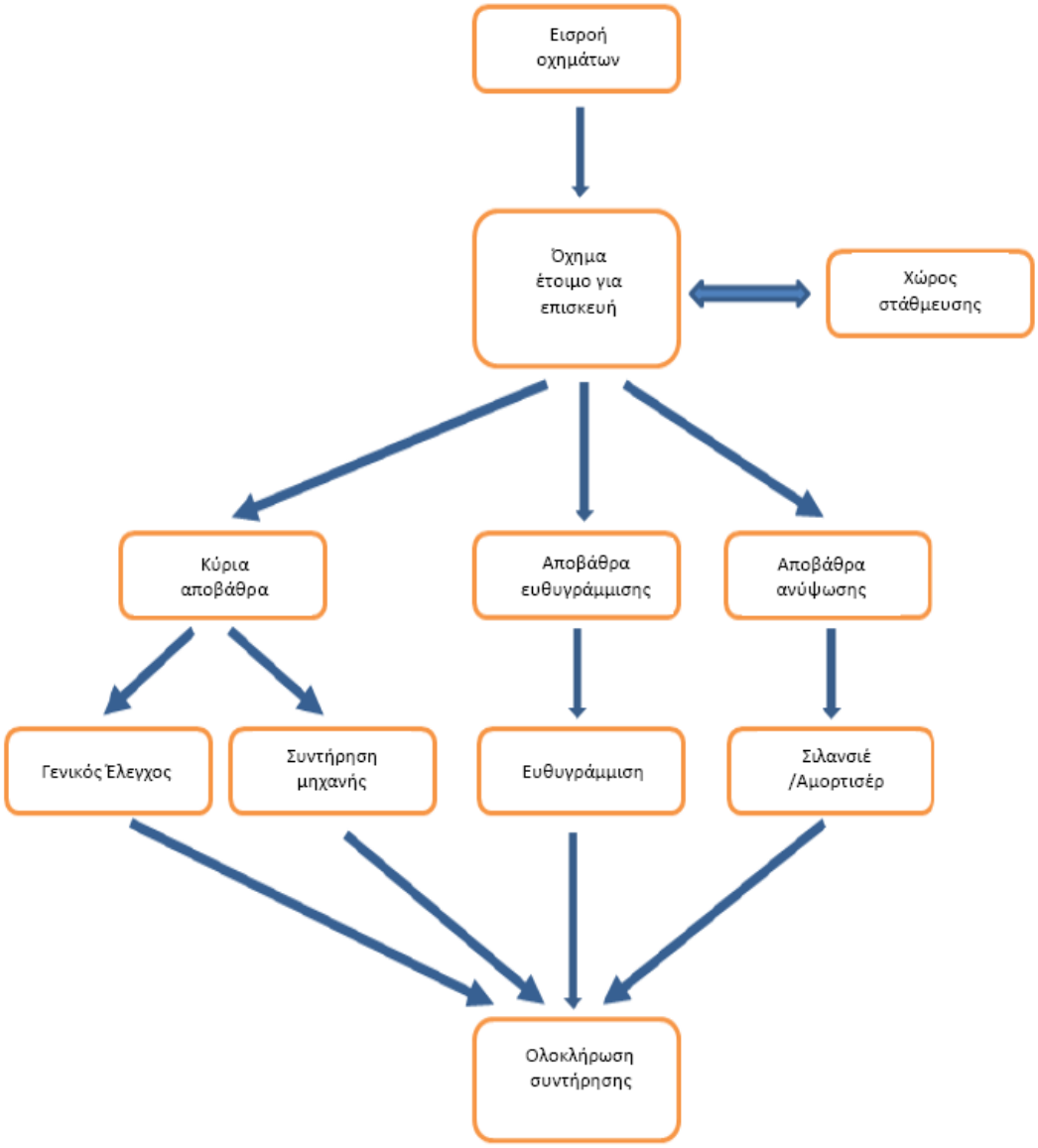
Οι πόροι που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι οι εξής:

Το συνεργείο διαθέτει τρεις διαφορετικούς τύπους αποβάθρων συντήρησης (service bays) στις οποίες πραγματοποιείται η συντήρηση των οχημάτων:

- Regular Bay (Κύρια Αποβάθρα)
- Alignment Bay (Αποβάθρα Ευθυγράμμισης) και
- Lift Bay (Αποβάθρα Ανύψωσης)

Για τους ελέγχους και τη συντήρηση της μηχανής χρειάζονται ειδικά εργαλεία (Equipment) και η κύρια αποβάθρα (Regular Bay). Για την ευθυγράμμιση χρειάζεται η ειδική αποβάθρα (Alignment Bay). Για την Επιδιόρθωση/Εγκατάσταση Σιλανσιέ ή Αμορτισέρ χρειάζεται η ανάλογη αποβάθρα (Lift Bay). Επίσης ως πόρους μπορούμε

να θεωρήσουμε τους μηχανικούς που εκτελούν τις εργασίες. Στην εικόνα 3.2 μπορούμε να δούμε μια διαγραμματική περιγραφή του αρχικού μοντέλου μας. Παρατηρούμε ότι αποτελείται από μια σειρά πυλών OR και AND και έναν αποσβεστήρα διακυμάνσεων (π.χ. την θέση στάθμευσης). Η δομή αυτή μας επιτρέπει να προβλέψουμε ότι δεν υπάρχουν νεκρές μεταβάσεις και ότι το δέντρο προσεγγισιμότητας (reachability graph) θα δείξει πλήρη ζωτικότητα, όπως και έγινε.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα ροής αρχικού δικτύου Petri

Το μοντέλο σχεδιάστηκε με χρήση ιεραρχικών δικτύων Petri. Η ιεραρχία των επιπέδων έχει ως εξής (φθίνουσα σειρά):

-0- Top (Ανώτερο)

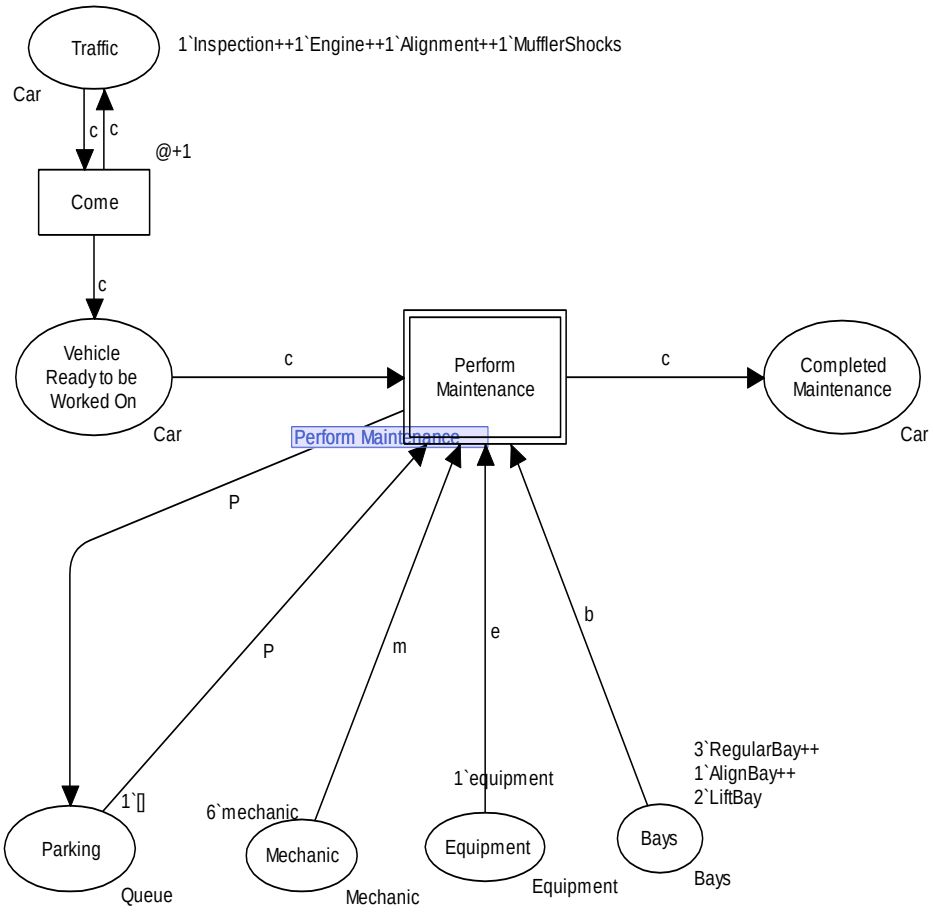
-1- Perform Maintenance (πραγματοποίηση συντήρησης)

-2- Move Vehicle to Bay (μετακίνηση οχήματος στην αποβάθρα)

-3- Parking (χώρος στάθμευσης)

Τα επίπεδα Perform Maintenance (πραγματοποίηση συντήρησης) και Move Vehicle to Bay (μετακίνηση οχήματος στην αποβάθρα) αντικαθιστούν τις αντίστοιχες μεταβάσεις των ανώτερών τους ιεραρχικά επιπέδων ενώ το επίπεδο του χώρου στάθμευσης λειτουργεί ως αποσβεστήρας όπου δημιουργούνται ουρές αναμονής. Το ανώτερο επίπεδο (Top) μας δίνει μια συνοπτική εικόνα των διεργασιών και των πόρων που χρησιμοποιούνται κάθε χρονική στιγμή. Από εδώ επίσης ελέγχουμε των ρυθμό άφιξης νέων πελατών καθώς και βλέπουμε τον αριθμό των επισκευασμένων οχημάτων.

Παρακάτω (εικόνα 3.3) ακολουθεί το διάγραμμα του συνοπτικού δικτύου Petri (ανώτερο επίπεδο 0) όπως αυτό προέκυψε από το αρχικό διάγραμμα IDEF0 πρώτου επιπέδου (εικόνα 3.1):



Εικόνα 3.3: Εποπτικό διάγραμμα αρχικού δικτύου Petri (επίπεδο 0)

Η μετάβαση αντικατάστασης Perform Maintenance (πραγματοποίηση συντήρησης) αντικαθίσταται από το δίκτυο που περιγράφει τη διαδικασία συντήρησης. Το όχημα αναπαρίσταται με το colset Car και η μάρκα μπορεί να πάρει τις τιμές Inspection (Γενικός Έλεγχος), Engine (Συντήρηση μηχανής), Alignment (Ευθυγράμμιση), MufflerShocks (Επιδιόρθωση/Εγκατάσταση Σιλανσιέ ή Αμορτισέρ) ανάλογα με το είδος συντήρησης που πρέπει να γίνει στο όχημα. Η ουρά των οχημάτων αναπαρίσταται με το colset Queue. Τα ειδικά εργαλεία με το colset Equipment. Ο μηχανικός με το colset Mechanic. Η αποβάθρα αναπαρίσταται με το colset Bays, όπου η μάρκα μπορεί να πάρει την τιμή RegularBay (Κύρια Αποβάθρα), AlignBay (Αποβάθρα Ευθυγράμμισης) ή LiftBay (Αποβάθρα Ανύψωσης) ανάλογα με τον τύπο της αποβάθρας. Στον παρακάτω πίνακα της εικόνας 3.4 φαίνονται πιο καθαρά οι αντιστοιχίσεις που έγιναν.

Φυσική οντότητα συνεργείου	**Colset αναπαράστασης στο δίκτυο Petri**
Όχημα	Car (Inspection,Engine,Alignment, MufflerShocks)
Ουρά οχημάτων	Queue
Ειδικά εργαλεία	Equipment
Μηχανικός	Mechanic
Αποβάθρα	Bays (RegularBay, AlignBay, LiftBay)

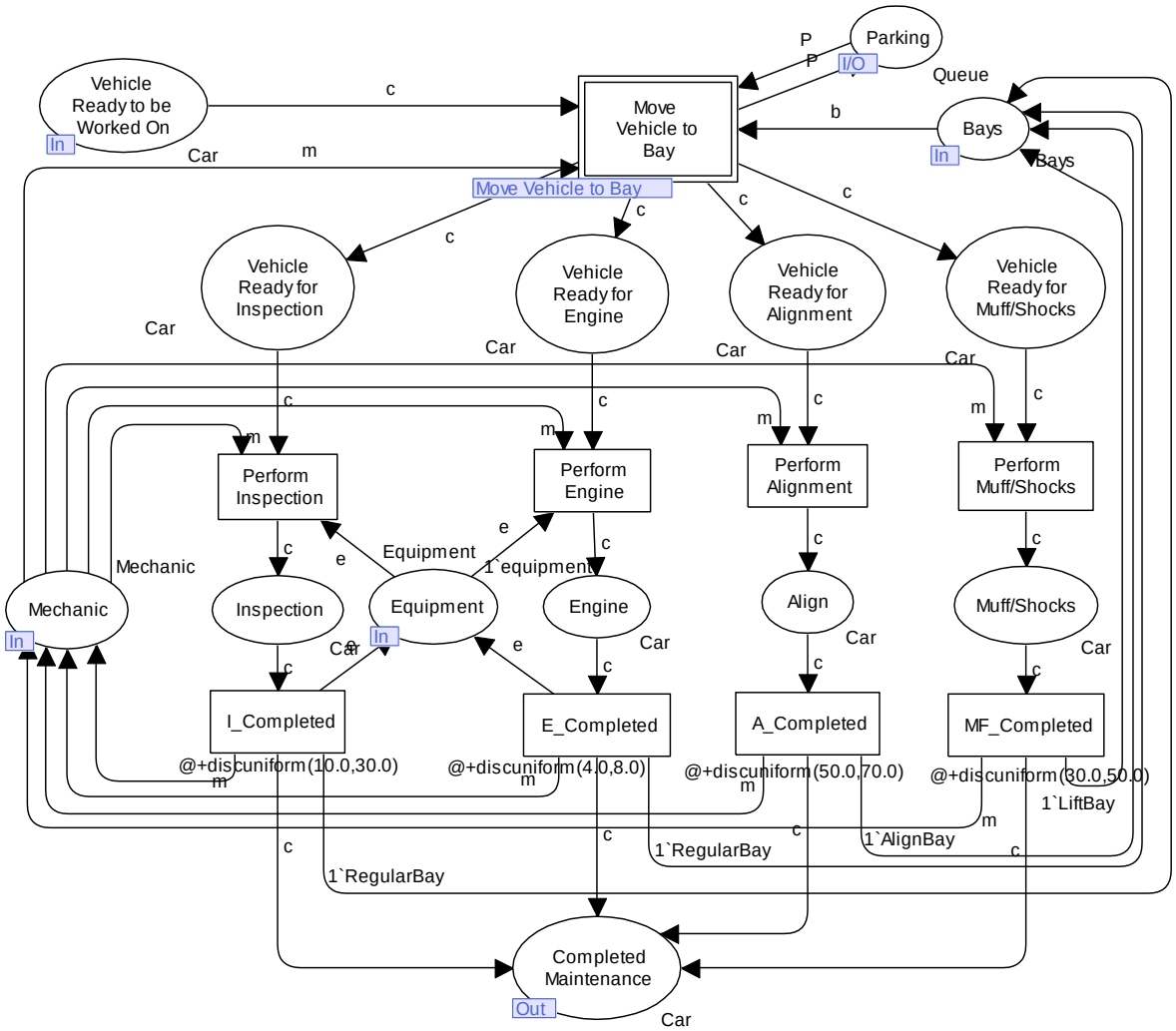
Εικόνα 3.4: Πίνακας αντιστοιχίας φυσικών οντοτήτων συνεργείου και colset που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο Petri

Δημιουργήσαμε τρεις νέες συναρτήσεις, την len(q:Queue) που υπολογίζει το μήκος μιας ουράς, την discuniform(x,y) που επιστρέφει έναν τυχαίο αριθμό στο ομοιόμορφο διάστημα (x,y) και χρησιμοποιείται για τους χρόνους των μεταβάσεων και την intTime() που μετατρέπει σε ακέραιο αριθμό την τιμή που επιστρέφει η συνάρτηση time() όταν την καλέσουμε (δηλαδή το εσωτερικό ρολόι του δικτύου). Στον παρακάτω πίνακα της εικόνας 3.5 παρουσιάζονται οι τρεις συναρτήσεις με τον κώδικά τους.

Όνομα συνάρτησης	Κώδικας συνάρτησης	Λειτουργία συνάρτησης
len	fun len(q:Queue)=if q=[] then 0 else 1+len(tl(q));	υπολογίζει το μήκος μιας ουράς
discuniform	fun discuniform(x,y)=round(uniform(x,y));	επιστρέφει έναν τυχαίο αριθμό στο ομοιόμορφο διάστημα (x,y)
intTime	fun intTime() = IntInf.toInt (time());	μετατρέπει σε ακέραιο αριθμό την τιμή που επιστρέφει η συνάρτηση time()

Εικόνα 3.5: Πίνακας νέων συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο Petri

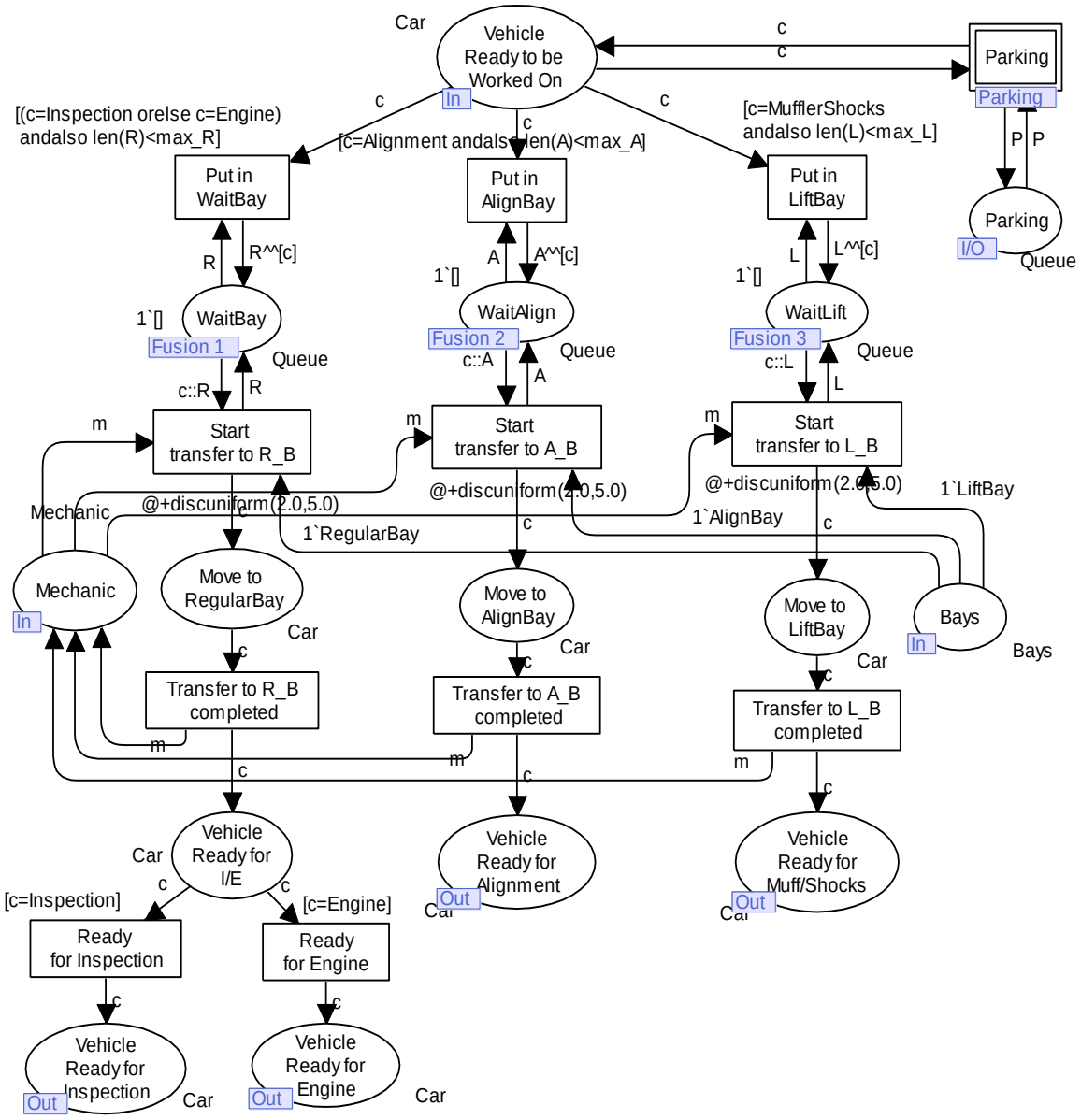
Παρακάτω (εικόνα 3.6) ακολουθεί το διάγραμμα του υποδικτύου της μακρο-μετάβασης Perform Maintenance (πραγματοποίηση συντήρησης):



Εικόνα 3.6: Δίκτυο Petri για την εκτέλεση της συντήρησης (perform maintenance) στο επίπεδο 1

Το υποδίκτυο της εικόνας 3.6 περιέχει τη μακρο-μετάβαση Move Vehicle to Bay (μετακίνηση οχήματος στην αποβάθρα) μέσω της οποίας το όχημα μεταφέρεται στην κατάλληλη αποβάθρα ή αν δεν υπάρχει διαθέσιμη αποβάθρα μεταφέρεται στο parking μέχρι να γίνει διαθέσιμη η κατάλληλη αποβάθρα.

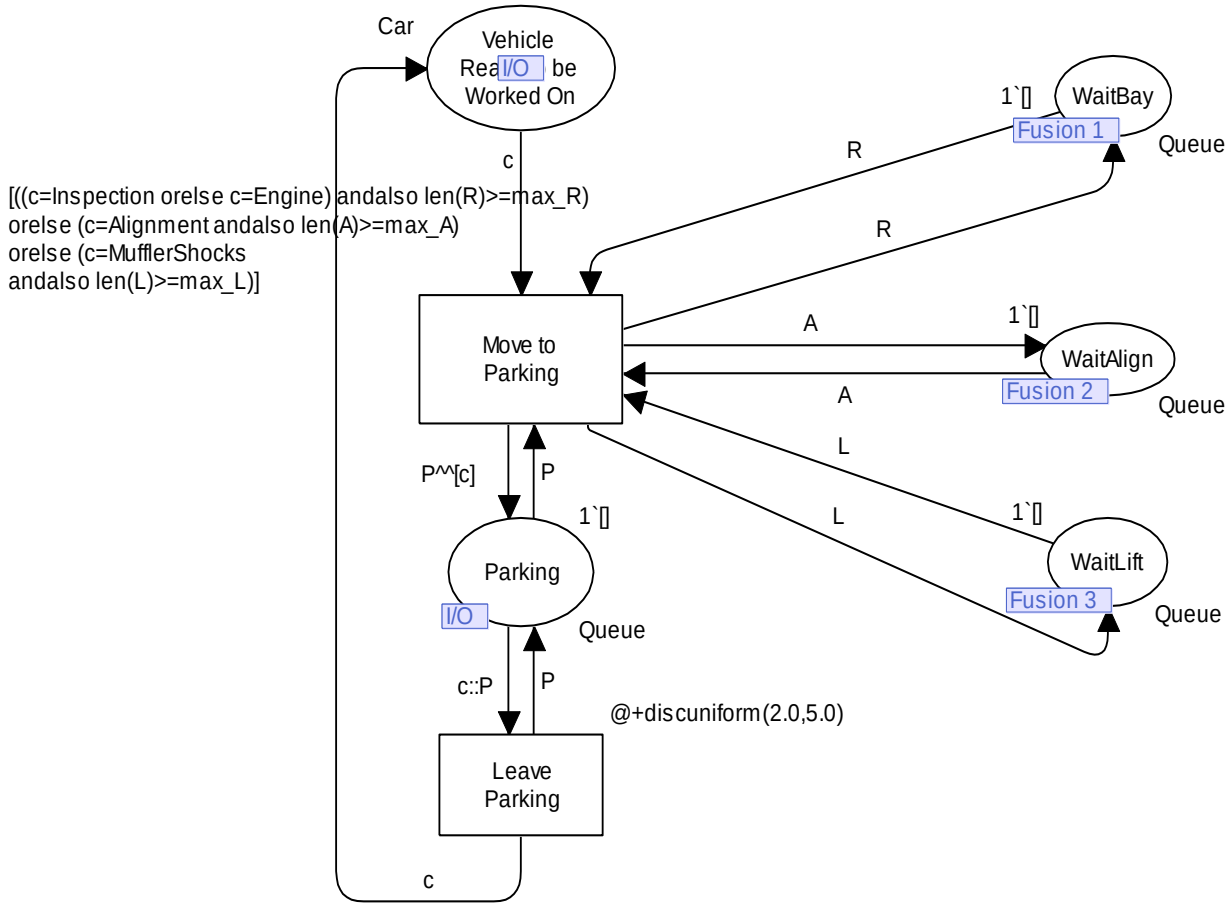
Παρακάτω (εικόνα 3.7) ακολουθεί το διάγραμμα του επιπέδου Move Vehicle to Bay (μετακίνηση οχήματος στην αποβάθρα):



Εικόνα 3.7: Δίκτυο Petri για την κατανομή οχημάτων σε θέσεις εξυπηρέτησης (Move Vehicle to Bay) σε επίπεδο 2

Εδώ τα οχήματα τοποθετούνται στις κατάλληλες αποβάθρες ανάλογα με τη βλάβη που έχουν και το είδος της επισκευής που απαιτούν. Στην περίπτωση που στη θέση vehicle ready to be worked on (όχημα έτοιμο να επισκευαστεί) δημιουργηθεί ουρά μεγαλύτερη από ένα όριο (το οποίο τίθεται από τον διαχειριστή του δικτύου και έχει σχέση με τον αριθμό των διαθέσιμων αποβαθρών) το όχημα μεταφέρεται στη θέση parking (χώρος στάθμευσης).

Παρακάτω (εικόνα 3.8) ακολουθεί το δίκτυο Petri για τον χώρο στάθμευσης των οχημάτων μετά την εξυπηρέτησή τους.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα Petri για στάθμευση οχημάτων μετά τη συντήρηση (parking) στο επίπεδο 3

Περιγραφή λειτουργίας συστήματος:

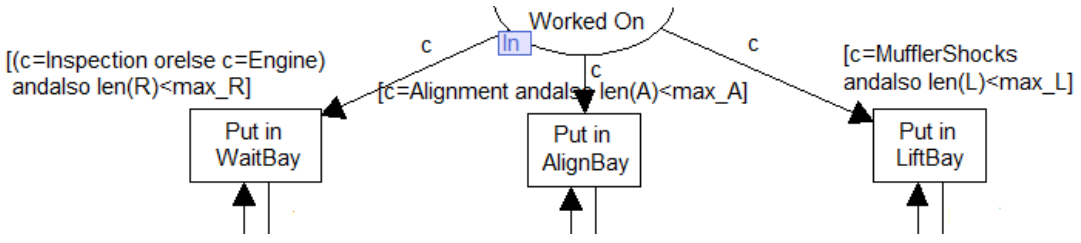
Θεωρούμε μια ροή άφιξης πελατών στο σύστημα μέσω της θέσης Traffic (κίνηση οχημάτων) και της μετάβασης Come (εισροή οχημάτων) με την οποία εισέρχονται τα οχήματα στο σύστημα. Αρχικά το όχημα μεταφέρεται στην

κατάλληλη αποβάθρα ανάλογα με το είδος της συντήρησης που χρειάζεται. Για τη μεταφορά στην αποβάθρα θα πρέπει να είναι διαθέσιμες διάφορες θέσεις εργασίας (μηχανικοί) και πόροι (αποβάθρες).

Συγκεκριμένα, η κατάλληλη αποβάθρα για Inspection (Γενικός Έλεγχος), Engine (Συντήρηση μηχανής) είναι η Regular/Wait Bay (Κύρια Αποβάθρα), για Alignment (Ευθυγράμμιση) η Align Bay (Αποβάθρα Ευθυγράμμισης) και για Muffler/Shocks (Επιδιόρθωση/ Εγκατάσταση Σιλανσιέ ή Αμορτισέρ) η Lift Bay (Αποβάθρα Ανύψωσης)). Για να πραγματοποιηθεί η μεταφορά του οχήματος στην κατάλληλη αποβάθρα απαιτείται σε κάθε περίπτωση και ένας διαθέσιμος μηχανικός (Mechanic). Σε περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμη αποβάθρα, το όχημα οδηγείται στο Parking (χώρος στάθμευσης) μέχρι να ελευθερωθεί αποβάθρα. Ο παρακάτω πίνακας 3.9 δείχνει την αντιστοιχία εργασιών/αποβαθρών και η εικόνα 3.10 που τον ακολουθεί την περιοχή του επιπέδου 2 του δικτύου Petri όπου γίνεται ο διαχωρισμός των οχημάτων.

είδος της συντήρησης που απαιτεί το όχημα	**κατάλληλη αποβάθρα για την πραγματοποίηση της συντήρησης**
Inspection (Γενικός Έλεγχος) ή Engine (Συντήρηση μηχανής)	Regular/Wait Bay (Κύρια Αποβάθρα),
Alignment (Ευθυγράμμιση)	Align Bay (Αποβάθρα Ευθυγράμμισης)
Muffler/Shocks (Επιδιόρθωση/ Εγκατάσταση Σιλανσιέ ή Αμορτισέρ)	Lift Bay (Αποβάθρα Ανύψωσης)

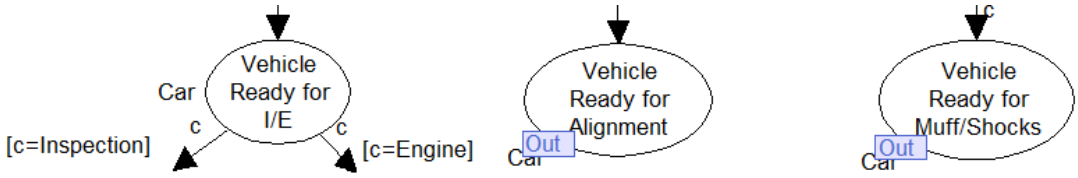
Εικόνα 3.9: πίνακας αντιστοιχίας εργασιών/αποβαθρών



Εικόνα 3.10: Περιοχή του επιπέδου 2 του δικτύου Petri όπου γίνεται ο διαχωρισμός των οχημάτων

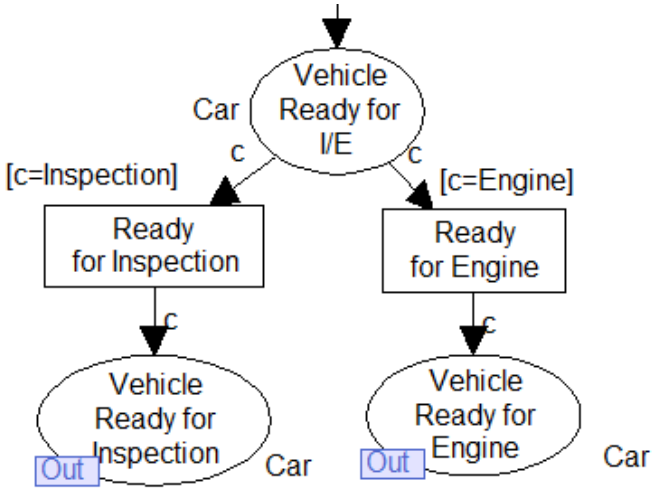
Από τη στιγμή που οι απαραίτητοι πόροι και θέσεις είναι διαθέσιμοι, ενεργοποιείται η κατάλληλη κάθε φορά μετάβαση της εικόνας 3.10 (π.χ. Put to WaitBay (μετακίνηση στην κύρια αποβάθρα αν πρόκειται για Inspection (Γενικός Έλεγχος) ή Engine (Συντήρηση μηχανής))) και το όχημα οδηγείται στην αποβάθρα (ενεργοποιείται δηλαδή η μετάβαση Transfer to R_B completed του δικτύου της εικόνας 3.7).

Αφού τελειώσει η μεταφορά του οχήματος στην κατάλληλη αποβάθρα, ελευθερώνεται ο μηχανικός και το όχημά μας βρίσκεται σε μια από τις τρεις θέσεις που φαίνονται στην εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Περιοχή του επιπέδου 2 του δικτύου Petri

Το όχημα του παραδείγματός μας είναι στη θέση Vehicle Ready for I/E (όχημα έτοιμο για γενικό έλεγχο ή συντήρηση μηχανής) (εικόνα 3.11) και στη συνέχεια ανάλογα για το αν απαιτεί εργασίες Inspection (Γενικός Έλεγχος) ή Engine (Συντήρηση μηχανής) η πηγαίνει στις θέσεις Vehicle Ready for Inspection (όχημα έτοιμο για γενικό έλεγχο) ή Vehicle Ready for Engine (όχημα έτοιμο για συντήρηση μηχανής) (εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12: Περιοχή του επιπέδου 2 του δικτύου Petri

Στη συνέχεια τα οχήματα είναι έτοιμα για τη συντήρηση και ανάλογα ενεργοποιείται η κατάλληλη μετάβαση που πραγματοποιεί τη συντήρηση (π.χ. Perform Inspection (πραγματοποίηση γενικού ελέγχου)). Αφού ολοκληρωθεί η συντήρηση, ελευθερώνονται η αποβάθρα, ο μηχανικός και τα εργαλεία (όπου ήταν απαραίτητα) και τα οχήματα μεταβαίνουν στη θέση Completed Maintenance (ολοκλήρωση συντήρησης).

3.2 Νέο μοντέλο εξυπηρέτησης με διαχείριση λαθών

Το αρχικό δίκτυο μοντελοποιούσε κανονικά τη διαδικασία επισκευής ενός αυτοκινήτου χωρίς προβλήματα στο εργασιακό χώρο. Όμως σε ένα πραγματικό και δυναμικό περιβάλλον, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η αλληλεπίδραση των ανθρώπων που συμμετέχουν στη διαδικασία παραγωγής.

Σε ένα τέτοιο σύνθετο περιβάλλον είναι αναπόφευκτη η εμφάνιση διάφορων λαθών που οφείλονται σε εσφαλμένους ανθρώπινους χειρισμούς και παραλήψεις. Τέτοια λάθη μπορούν αφενός να καθυστερήσουν την παραγωγή, αφετέρου να οδηγήσουν σε ελαττωματικά τελικά εξαρτήματα. Αυτό συνεπάγεται επιπλέον σπατάλη πολύτιμων πόρων και χρόνου.

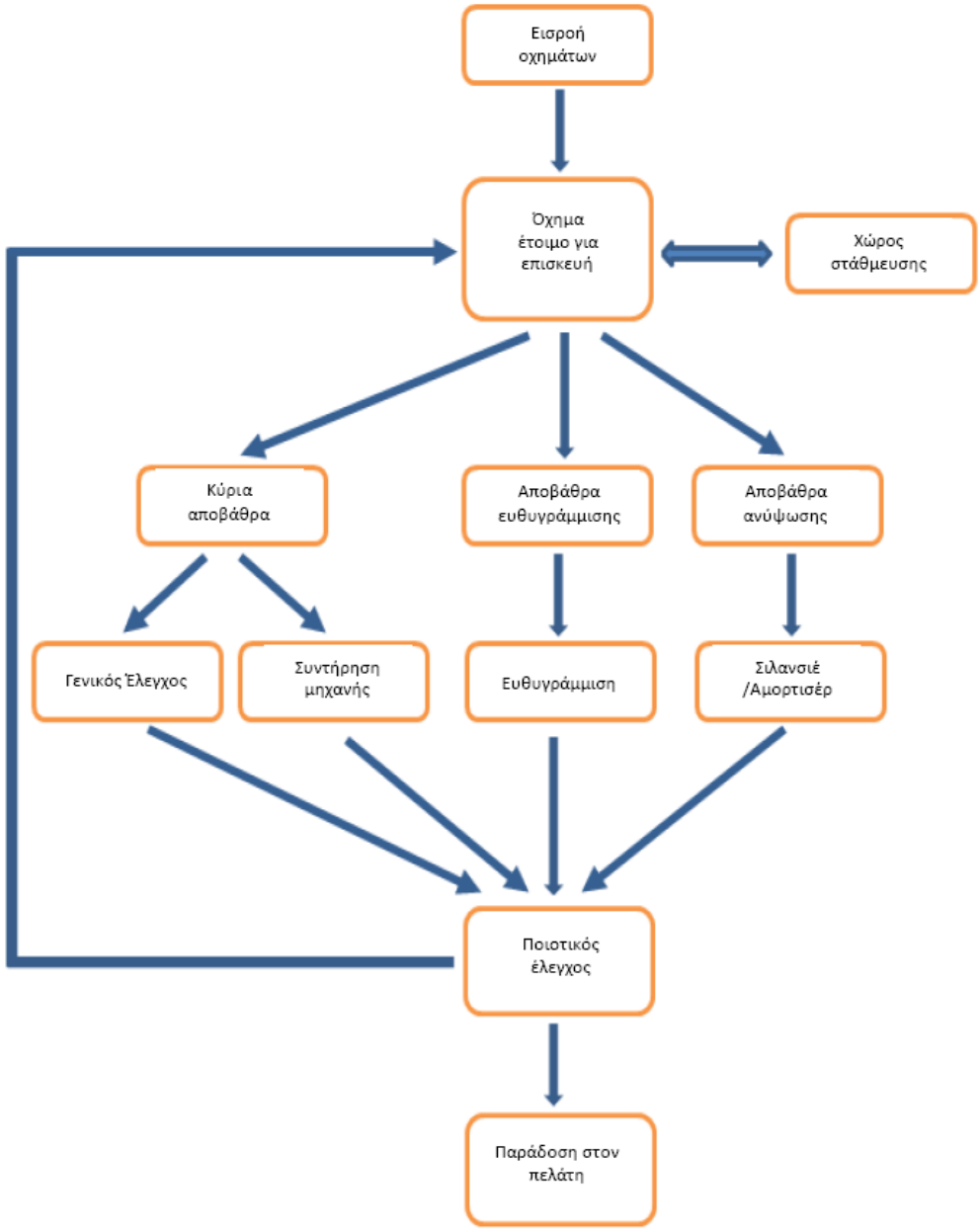
Στόχος μας δεν είναι η εξάλειψη αυτών των σφαλμάτων γιατί κάτι τέτοιο είναι πρακτικά αδύνατο να εφαρμοστεί στην πράξη αποτελεσματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ανθρώπινα λάθη μπορούν να οφείλονται σε ένα πλήθος αστάθμητων παραγόντων που δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν και να εξαλειφθούν απόλυτα. Τέτοιοι παράγοντες είναι: η ιδιαιτερότητα του κάθε εργαζόμενου, οι γνώσεις του, η πιθανή εσφαλμένη χρήση μηχανών ή εργαλείων, η ανθρώπινη απροσεξία και «επιπολαιότητα» καθώς και η κούραση. Προσπαθήσαμε όμως να τα μοντελοποιήσουμε όσο είναι δυνατόν, εισάγοντας στο μοντέλο πολλές παραμέτρους και λαμβάνοντας υπ'όψη τις επιδράσεις τους ώστε να επιτύχουμε καλύτερη πρόληψη λαθών.

Εφόσον δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν και να ελεγχθούν όλοι οι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε λάθη, κύριο μέλημα αποτελεί ο έγκαιρος εντοπισμός και η άμεση αντιμετώπιση των σφαλμάτων όταν αυτά λάβουν χώρα. Έτσι αυτό που θα επιχειρήσουμε, είναι να γίνονται πολλαπλοί έλεγχοι σε διάφορα καίρια σημεία της διαδικασίας παραγωγής ώστε να εντοπίζονται εγκαίρως τα ανθρώπινα σφάλματα πριν προχωρήσει η διαδικασία περισσότερο και υπάρξουν σοβαρές επιπτώσεις στη διαδικασία παραγωγής.

Στην εικόνα 3.13 μπορούμε να δούμε μια διαγραμματική περιγραφή του βελτιωμένου μοντέλου μας. Παρατηρούμε ότι σε ότι αφορά τη διαδρομή των οχημάτων δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές πέρα από την εισαγωγή μιας ανάδρασης ελέγχου η οποία επιστρέφει το όχημα στο αρχικό στάδιο. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η μοντελοποίηση των λαθών δεν θα πρέπει να μας οδηγήσει σε ριζικές αλλαγές στη διαχείρηση των οχημάτων και να βελτιώσει παρόλ'αυτά την αποτελεσματικότητά των διεργασιών. Αυτή η δομή μας επιτρέπει να προβλέψουμε ότι δεν υπάρχουν νεκρές μεταβάσεις και ότι το δέντρο προσεγγισιμότητας (reachability graph) θα δείξει πλήρη ζωτικότητα. Να σημειώσουμε ότι η επιστροφή γίνεται στην περίπτωση που η επισκευή δεν έγινε μέσα στα αποδεκτά ποιοτικά πρότυπα.

Εισάγουμε λοιπόν την έννοια της ποιότητας επισκευής, η οποία δεν υπήρχε στο προηγούμενο δίκτυό μας. Ανάλογα με την ικανότητα/εμπειρία του εργάτη, το φόρτο εργασίας που έχει τη συγκεκριμένη μέρα εργασίας και το είδος της βλάβης που καλείται να διορθώσει, ο κάθε εργαζόμενος παράγει αποτελέσματα διαφορετικής ποιότητας. Στη συνέχεια, ο επιβλέπων κρίνει την ποιότητα της επισκευής και, αν βρίσκεται σε επίπεδο χαμηλότερο από αυτό που ο ίδιος θέτει ως αποδεκτό, επιστρέφει το όχημα για νέα επισκευή. Το ρόλο του διαχειριστή/επιβλέποντα μπορεί να πάρει είτε ένας έμπειρος μηχανικός είτε μια συσκευή ελέγχου της λειτουργίας του οχήματος (π.χ. δυναμόμετρο) η οποία μπορεί να είναι αρκετά αξιόπιστη.

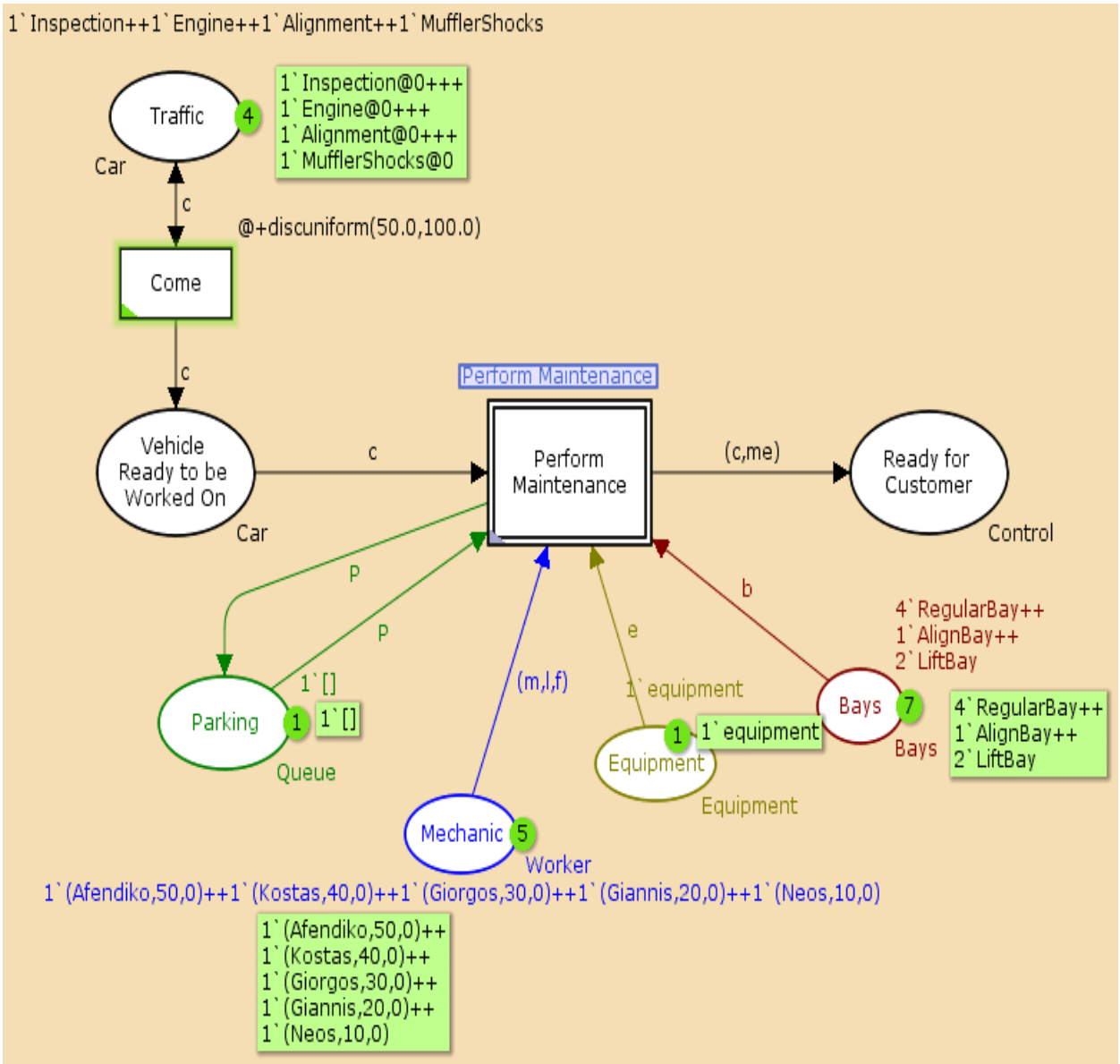
Εκτός όμως από τον ποιοτικό έλεγχο, το σύστημα διαχείρησης λαθών δρα προληπτικά με σκοπό να ελαχιστοποιήσει τα ενδεχόμενα σφάλματα. Όπως θα διαπιστώσουμε στη συνέχεια έχουν μπει συγκεκριμένα όρια ικανότητας εκτέλεσης επισκευών από το διαχειριστή/κριτή σε περιπτώσεις μηχανικών με περιορισμένες ικανότητες/εμπειρία ή μηχανικών με υψηλό φόρτο εργασίας σε συγκεκριμένες απαιτητικές εργασίες.



Εικόνα 3.13: Διάγραμα ροής τελικού δικτύου Petri + quality control

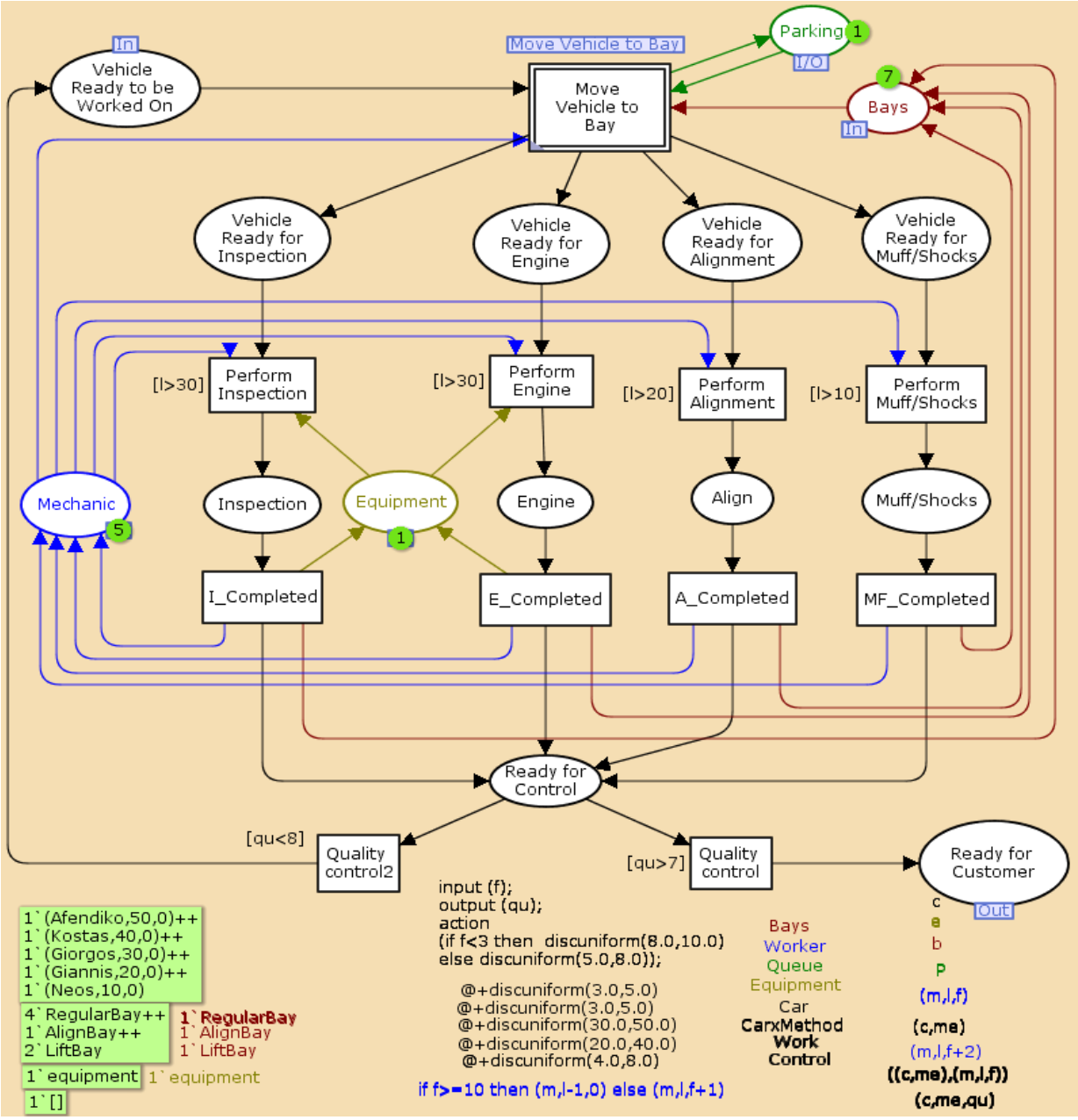
Παρακάτω (εικόνα 3.14) ακολουθεί το διάγραμμα του τελικού δικτύου Petri (Ανώτερο επίπεδο 0). Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η βασική ροή των οχημάτων ενώ με τα άλλα χρώματα απεικονίζονται οι πόροι που χρησιμοποιούνται.

Παρατηρούμε ότι η περιγραφή των μηχανικών είναι πιο λεπτομερής αφού εκτός από το όνομα έχει προστεθεί ένα πεδίο που αντιπροσωπεύει το επίπεδο γνώσεων του καθενός και άρα της ικανοτητας επισκευής που έχει για κάθε εργασία. Τέλος, έχει προστεθεί και το πεδίο του φόρτου εργασίας του κάθε μηχανικού το οποίο αυξάνεται όσο περισσότερο εργάζεται.



Εικόνα 3.14: Διάγραμα επιπέδου 0 του τελικού δικτύου Petri

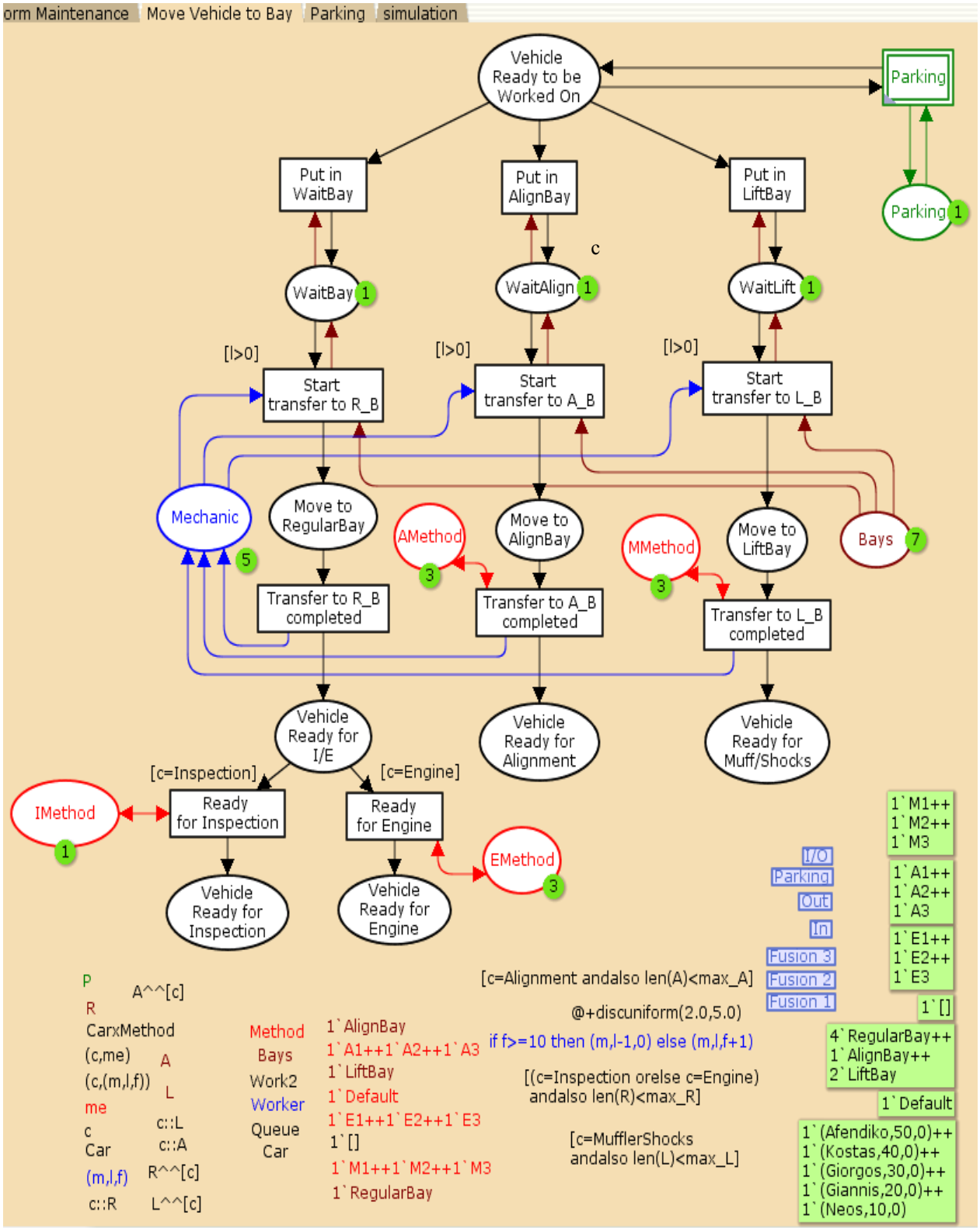
Παρακάτω (εικόνα 3.15) ακολουθεί το διάγραμμα του τελικού απλοποιημένου υποδικτύου της μακρο-μετάβασης Perform Maintenance (πραγματοποίηση συντήρησης). Έχει διατηρηθεί ο χρωματικός κώδικας της προηγούμενης εικόνας αλλά έχουν αφαιρεθεί ο κώδικας, η σήμανση, ο χρονισμός και οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να γίνει πιο εμφανής η δομή του δικτύου και η αντιστοιχία του με τις εικόνες 3.12 και 3.13.



Εικόνα 3.15: Διάγραμμα επιπέδου 1 Perform Maintenance απλοποιημένου τελικού δικτύου Petri

Οι αλλαγές που παρατηρούμε εδώ είναι ότι κάθε εργασία (inspection,engine,align,muff/shock) απαιτεί διαφορετικό βαθμό ικανότητας (l>10 έως l>30) για να εκτελεστεί και επιφέρει διαφορετικό βαθμό κόπωσης στους μηχανικούς (f – f+1). Η κόπωση αυτή επηρεάζει την ικανότητα εκτέλεσης εργασιών του κάθε μηχανικού και μάλιστα όσο μικρότερη είναι η ικανότητα αυτή τόσο πιο εύκολα επηρεάζεται. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η κόπωση τόσο χαμηλότερη είναι η ποιότητα της επισκευής, ακόμα και αν ο μηχανικός έχει τη θεωρητική ικανότητα να εκτελέσει σωστά την εργασία (if f<3 then discuniform(8.0,10.0) else discuniform(5.0,8.0)). Τέλος, έχει προστεθεί ο ποιοτικός έλεγχος (quality control) των επισκευών που έχουν γίνει. Στην περίπτωση που η ποιότητα της επισκευής δεν ξεπερνά το όριο που έχει τεθεί (8 με άριστα το 10) το όχημα επιστρέφει στην αρχή και επαναλαμβάνονται οι εργασίες για την επισκευή του οχήματος.

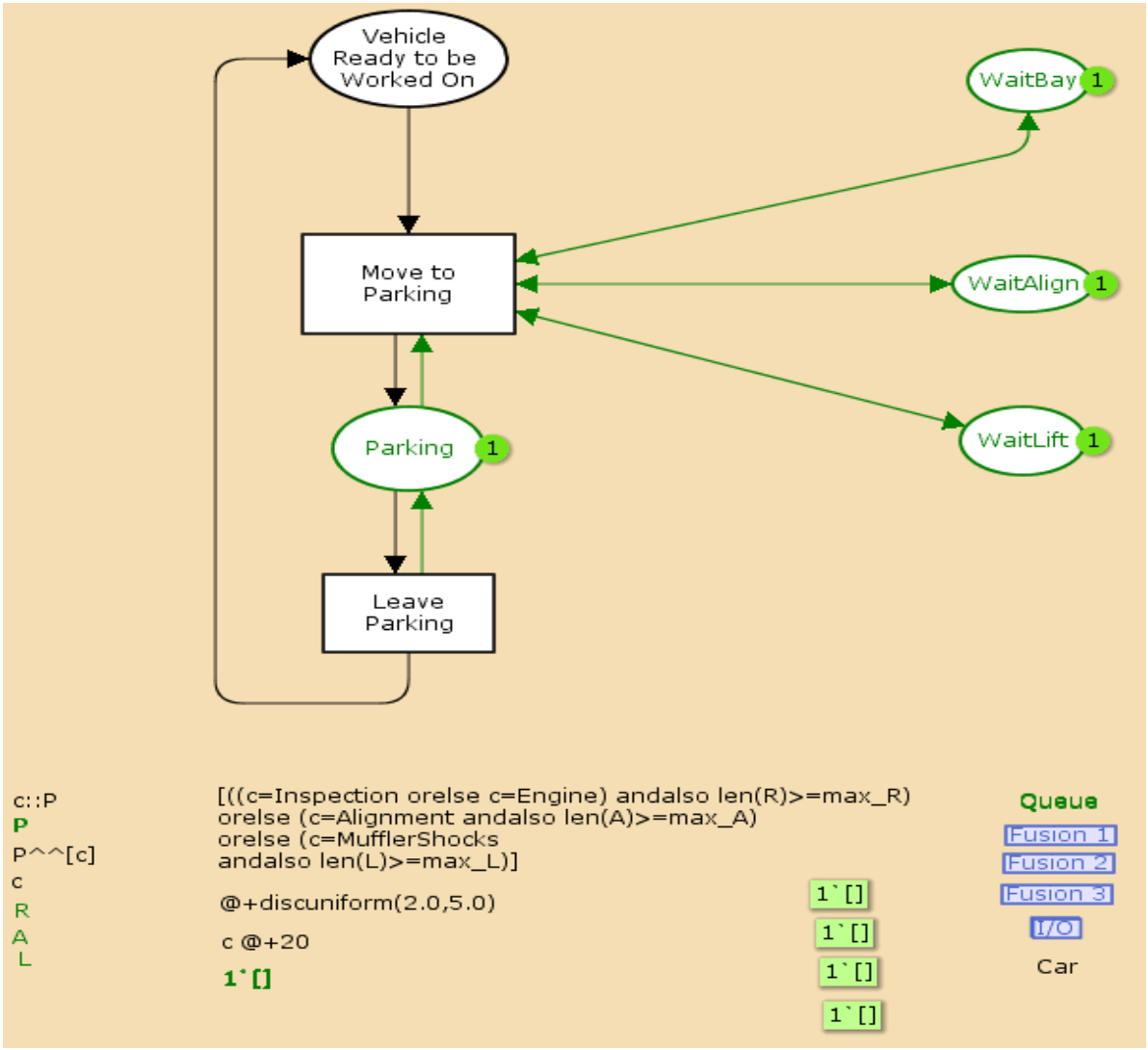
Παρακάτω (εικόνα 3.16) ακολουθεί το διάγραμμα του επιπέδου 2 Move Vehicle to Bay (μετακίνηση οχήματος στην αποβάθρα) στην απλοποιημένη του τελική μορφή (έχουν αφαιρεθεί ο κώδικας, το μαρκάρισμα, ο χρονισμός και οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να γίνει πιο εμφανής η δομή του δικτύου και η αντιστοιχία του με την εικόνα 3.12)



Εικόνα 3.16: Διάγραμμα επιπέδου 2 Move Vehicle to Bay του τελικού δικτύου Petri

Οι αλλαγές που παρατηρούμε εδώ είναι οι εναλλακτικές μέθοδοι επισκευής. Για κάθε εργασία (inspection, engine, align, muff/shock) έχουν προστεθεί τρεις μέθοδοι επισκευής εκτός του inspection που εξακολουθεί να γίνεται με μία μέθοδο. Συγκεκριμένα, έχουν προστεθεί οι μέθοδοι E1, E2, E3 για την εργασία επισκευής μηχανής (engine), οι μέθοδοι A1, A2, A3 για την εργασία ευθυγράμμισης (align) και τέλος οι μέθοδοι M1, M2, M3 για την εργασία επισκευής σιλανσιέ/αμορτισέρ (muff/shock). Τέλος, και για τις εργασίες μεταφοράς στις κατάλληλες αποβάθρες έχουν προστεθεί κανόνες για την ικανότητα του μηχανικού που μπορεί να τις εκτελέσει και την κόπωση που επιφέρει η εκτέλεσή τους.

Παρακάτω (εικόνα 3.17) ακολουθεί το απλοποιημένο διάγραμμα του επιπέδου χώρου στάθμευσης (Parking) το οποίο δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά:



Εικόνα 3.17: Διάγραμα επιπέδου 3 (Parking) του τελικού δικτύου Petri

Σε όλο το δίκτυο έχει προστεθεί χρονισμός των εργασιών και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις η καθυστέρηση που επιφέρει η κάθε μετάβαση δίνεται από τη συνάρτηση discuniform() η οποία μας επιστρέφει έναν τυχαίο αριθμό στο διάστημα που ορίζουμε με ομοιόμορφη κατανομή.

Η μοντελοποίηση των λαθών στο τελικό μας δίκτυο γίνεται με 3 τρόπους:

1) Με την επιλογή της μεθόδου, η οποία γίνεται τυχαία.

   Δεν γνωρίζουμε ποια μέθοδος είναι κατάλληλη για κάθε βλάβη ούτε πόσο καλά γνωρίζει ο μηχανικός την κάθε μέθοδο οπότε δημιουργούνται λάθη.

2) Με την επιλογή της ποιότητας επισκευής (qu), η οποία γίνεται τυχαία με περιορισμούς. Ως λάθος λαμβάνουμε την περίπτωση κακής ποιότητας επισκευής. Αναγνωρίζουμε ότι ένας μηχανικός με υψηλό φόρτο εργασίας είναι πιθανότερο να κάνει λάθη (δηλαδή να κάνει μια επισκευή χαμηλής ποιότητας) από κάποιον που είναι ξεκούραστος:

   ```
   input (f);output (qu);action
      (if f<3 then  discuniform(8.0,10.0)
       else discuniform(5.0,8.0));
   ```

3) Με τη σύνδεση της εξειδίκευσης του μηχανικού με το φόρτο εργασίας του (if f=5 then (m,l-1,0) else (m,l,f+1)). Έτσι ακόμα και ο πιο εξειδικευμένος μηχανικός, όταν αντιμετωπίσει μεγάλο φόρτο, ίσως δεν είναι ικανός να εκτελέσει πολύπλοκες εργασίες.

Ουσιαστικά προσπαθούμε να προβλέψουμε τα λάθη ώστε να μη συμβούν. Αναπόφευφκτα, η κούραση επηρεάζει την απόδοση των μηχανικών και άρα τον αριθμό των λαθών που θα γίνουν. Αντί να προσδιορίσουμε την πιθανότητα εμφάνισης ενός ανθρωπίνου σφάλματος, έχουμε αφήσει το μοντέλο μας να τα εμφανίσει μέσω της μοντελοποίησης των παραγόντων που τα προκαλούν. Έτσι τα σφάλματα εμφανίζονται με ένα πιο φυσικό ρυθμό, αυξάνονται όταν αυξάνεται η πίεση και ο φόρτος εργασίας και μειώνονται όταν συμβαίνει το αντίθετο. Θα μπορούσαμε να επιλέξουμε μια κυμαινόμενη πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος η οποία θα λειτουργούσε ανάλογα, αλλά επιλέξαμε τη μοντελοποίηση των παραγόντων που προκαλούν τα σφάλματα ως μια πιο απλή, φυσική και αποτελεσματική μέθοδο.

Ο ρόλος του επιβλέποντα/διαχειριστή (supervisor) συνεχίζει να υπάρχει στις επιλογές που έχουμε κάνει. Παραδείγματα τέτοιων επιλογών που έχουν γίνει είναι: το συγκεκριμένο επίπεδο ειδίκευσης, το αποδεκτό επίπεδο ποιότητας για να θεωρηθεί η επισκευή επιτυχημένη και η σχέση εξειδίκευσης του μηχανικού με το φόρτο της εργασίας του. Ακόμη και αν είχαμε μια πλήρη μοντελοποίηση του συστήματος, θα χρειαζόταν κάποιος που θα έπαιζε το ρόλο του κριτή, κάποιος του οποίου η εκτίμηση δεν μπορεί να αμφισβητηθεί. Έτσι λοιπόν ο ορισμός των αναγκαίων επιπέδων ειδίκευσης για την εκτέλεση των εργασιών μπορεί να φαίνεται αυθαίρετος αλλά δεν είναι. Είναι μια απόφαση/κρίση του απαραίτητου επιβλέποντα/διαχειριστή (supervisor).

Παρακάτω (εικόνα 3.18) παραθέτονται οι δηλώσεις των μεταβλητών του τελικού δικτύου Petri.

```
Declarations
val max_A=1;
val max_L=2;
val max_R=4;
colset Car=with Inspection|Engine|Alignment|MufflerShocks timed;
colset Queue=list Car;
colset Equipment=with equipment;
colset Mechanic=with Afendiko|Kostas|Giorgos|Giannis|Neos;
colset Level= int;
colset Quality= int;
colset Fortos = int;
colset Worker=  product  Mechanic * Level* Fortos;
colset Method=with E1|E2|E3|A1|A2|A3|M1|M2|M3|Default;
colset CarxMethod = product Car * Method timed;
colset Control = product Car * Method * Quality timed;
colset Work = product CarxMethod * Worker timed;
colset Work2 = product Car * Worker timed;
colset Bays=with RegularBay|AlignBay|LiftBay;
var c:Car;
var q:Queue;
var e:Equipment;
var m:Mechanic;
var me:Method;
var l:Level;
var f:Fortos;
var qu:Quality;
var b:Bays;
var R:Queue;
var L:Queue;
var A:Queue;
var P:Queue;
fun intTime() = IntInf.toInt (time());
fun len(q:Queue)=if q=[] then 0 else 1+len(tl(q));
fun discuniform(x,y)=round(uniform(x,y));
```

Εικόνα 3.18: Οι δηλώσεις των μεταβλητών του τελικού δικτύου Petri

4. Προσομοίωση και μέτρηση απόδοσης συστήματος

Η απόδοση ενός παραγωγικού συστήματος είναι συχνά το κεντρικό ζήτημα στη σχεδίαση, την ανάπτυξη και τη διαμόρφωση του συστήματος. Πολλές φορές δεν είναι αρκετό να ξέρουμε ότι ένα σύστημα λειτουργεί χωρίς προβλήματα αλλά θα πρέπει επίσης να δουλεύει και αποτελεσματικά. Προκειμένου να αξιολογηθούν υπάρχοντα ή σχεδιασμένα συστήματα, να συγκριθούν εναλλακτικές διαμορφώσεις τους ή να βρεθεί μια βέλτιστη διαμόρφωση ενός συστήματος είναι απαραίτητο να γίνουν μελέτες ανάλυσης της απόδοσης τους. Η ανάλυση απόδοσης ενός μοντέλου του συστήματος με χρήση προσομοίωσης περιλαμβάνει τη στατιστική εξέταση των εξερχόμενων δεδομένων, την εξερεύνηση μεγάλων ομάδων δεδομένων, την κατάλληλη γραφική αναπαράσταση των δεδομένων και την επαλήθευση και επικύρωση των πειραμάτων προσομοίωσης. Επειδή η προσομοίωση είναι συνήθως μια τυχαία διαδικασία, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες στατιστικές τεχνικές για να σχεδιαστούν και να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων προσομοίωσης [7].

Η ανάλυση απόδοσης ενός δικτύου Petri πρέπει να στηριχθεί στην προσομοίωση για να υπολογίσει αξιόπιστα μέτρα απόδοσης για το μοντέλο του υπό εξέταση συστήματος. Για την προσομοίωση ενός δικτύου Petri, απαιτείται μια αρκετά μεγάλη ποσότητα πληροφοριών για την απόδοση του συστήματος, όπως: το μήκος των σειρών αναμονής, ο χρόνος απόκρισης, η ρυθμοαπόδοση, κ.λπ. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν από το μοντέλο με την εξέταση της σήμανσης του δικτύου και των εμφανιζόμενων δεσμεύσεων των στοιχείων (binding process) κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Παραδείγματα μέτρων απόδοσης που μπορούν να υπολογιστούν με την εξαγωγή των στοιχείων από τη σήμανση του δικτύου περιλαμβάνουν:

1) Μέσο μήκος σειρών αναμονής, όπου η σειρά αναμονής μπορεί να αντιπροσωπευθεί από:

* Τον αριθμό των μαρκών/στοιχείων σε μια θέση (που στην περίπτωσή μας είναι είτε οχήματα είτε εργάτες είτε εξοπλισμός είτε αποβάθρες).

* Τον αριθμό των στοιχείων σε έναν κατάλογο τύπου λίστας. Στην περίπτωσή μας έγινε τέτοια εφαρμογή στη μοντελοποίηση των ουρών αναμονής που εμφανίζονται στο χώρο στάθμευσης.

* Τα στοιχεία σε έναν κατάλογο όπου ο κατάλογος είναι ένα μέρος ενός σύνθετου έγχρωμου συνόλου.

2) Χρησιμοποίηση των πόρων, όπου οι πολυάσχολοι και οι αχρησιμοποίητοι πόροι μπορούν να αντιπροσωπευθούν ως εξής:

* Σημεία σε διαφορετικές θέσεις, π.χ. μια πολυάσχολη θέση και μια αργόσχολη θέση.

* Σημεία σε μια θέση, όπου η κατάσταση ενός πόρου αντιπροσωπεύεται ως ένα πεδίο σε ένα έγχρωμο σύνθετο σύνολο (τύπου product,που παράγεται δηλαδή από το γινόμενο άλλων συνόλων). Παράδειγμα τέτοιας χρήσης στο μοντέλο μας είναι το πεδίο του φόρτου εργασίας των μηχανικών.

Παραδείγματα μέτρων απόδοσης που μπορούν να υπολογιστούν με την εξαγωγή δεδομένων από τη δέσμευση στοιχείων και πληξροφοριών του δικτύου περιλαμβάνουν:

1) Τη χρονική διάρκεια της διαδρομής ενός προϊόντος στο δίκτυο, όπου μια από τις μεταβλητές της μετάβασης είναι συνδεδεμένη με το προϊόν (π.χ. ένα όχημα που έχει φθάσει στον τελικό προορισμό του για επισκευή). Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος επεξεργασίας ενός προϊόντος θα πρέπει πιθανώς να περιληφθεί στις πληροφορίες που συνδέονται με το προϊόν. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που χρησιμοποιήσαμε χρονισμό σε όλες τις διεργασίες του δικτύου Petri. Ένα χρονισμένο δίκτυο Petri μπορεί να μοντελοποιήσει πόσο χρόνο απαιτούν ορισμένες

δραστηριότητες, και πόσο χρόνος περνά στις διαδρομές μεταξύ των δραστηριοτήτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπαρκές να υπολογιστεί το μέσο χρονικό διάστημα που διαρκεί μια ορισμένη δραστηριότητα. Αντίθετα, είναι απαραίτητο να περιληφθεί μια ακριβέστερη αντιπροσώπευση του χρονισμού του συστήματος. Οι συναρτήσεις τυχαίας κατανομής (random distribution functions) χρησιμοποιήθηκαν για να διαμορφώσουν με την απαραίτητη ακρίβεια τις χρονικές καθυστερήσεις.

2) Την αξιοπιστία του δικτύου Petri, όπου η απώλεια προϊόντων μπορεί να αντιπροσωπευθεί με:

* Τη χρήση μιας συγκεκριμένης μετάβασης

* Μια μετάβαση που εμφανίζεται με ιδιαίτερες συνδέσεις

Ο σκοπός της δημιουργίας του δικτύου Petri της παρούσας διατριβής ήταν εξ'αρχής η μέτρηση της απόδοσής του παραγωγικού συστήματος κάτω από διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες λειτουργίας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να μετρηθεί η απόδοση ενός παραγωγικού συστήματος. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γίνεται ανάλογα με το πλαίσιο που έχουμε θέσει για τη μοντελοποίηση του συστήματος, τους σκοπούς που θέλουμε να πετύχουμε με τη μέτρηση αυτή και τους περιορισμούς που θέτει το ίδιο το παραγωγικό σύστημα.

Έκτός από την ίδια την παραγωγικότητα του συστήματος υπάρχει και πλήθος άλλων δεδομένων τα οποία μπορούν είτε να την επηρεάζουν σημαντικά είτε να δίνουν καλές ενδείξεις για την πορεία της. Τέτοια δεδομένα είναι στοιχεία για το πλήθος των ουρών που δημιουργούνται στη διαδικασία παραγωγής, η παραγωγικότητα στα ενδιάμεσα στάδια που μας βοηθά να βρούμε ενδεχόμενα σημεία καθυστερήσεων, οι μέσες τιμές καθυστέρησης, ο χρόνος επεξεργασίας κάθε προϊόντος και ο χρόνος αδράνειας των εργατών. Πολλά από αυτά τα δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί όπως θα δούμε για να αξιολογήσουμε την απόδοση του συστήματός μας.

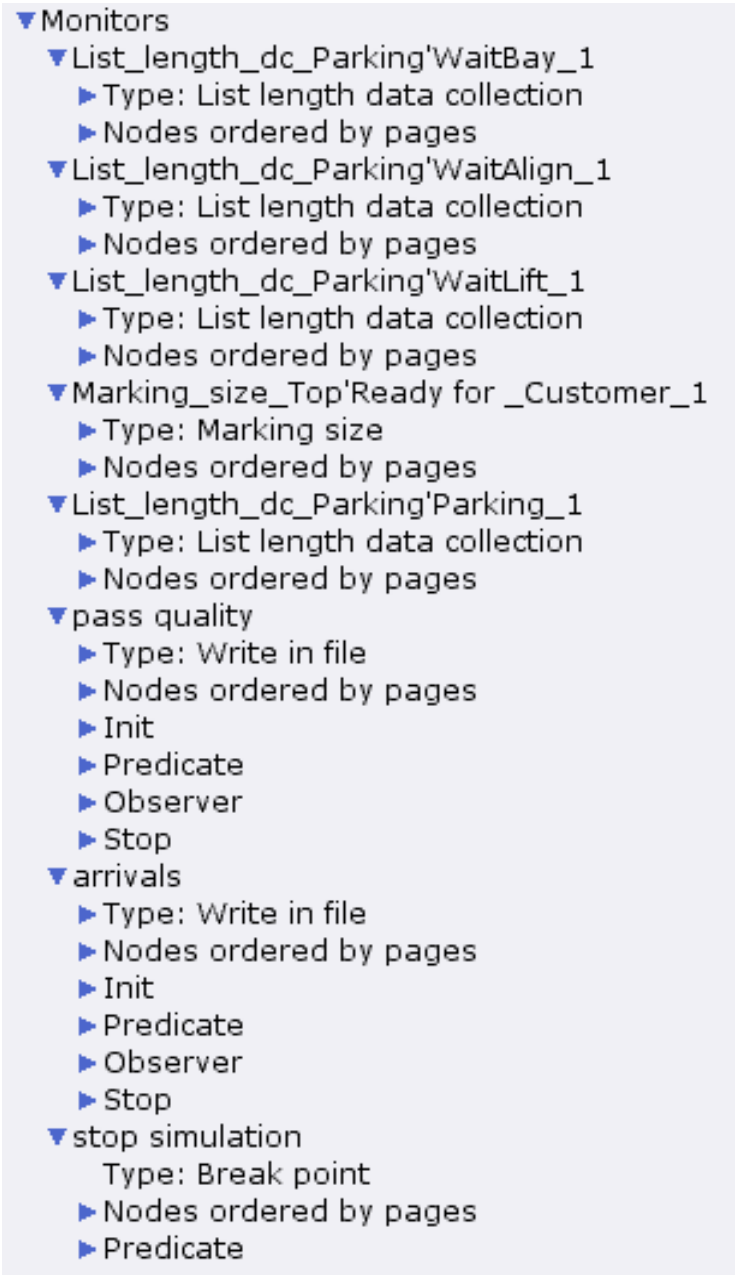
Τα μέτρα απόδοσης που υπολογίζονται μέσω της προσομοίωσης είναι γενικές εκτιμήσεις των αληθινών μέτρων απόδοσης. Είναι σημαντικό να

χρησιμοποιηθούν διαστήματα εμπιστοσύνης για να δείξουν ποιες είναι οι ακριβείς εκτιμήσεις ενός μέτρου απόδοσης. Ελεγκτικοί καταγραφείς (monitors) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαγάγουν διάφορα στοιχεία από το δίκτυο Petri κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων. Κάθε μέτρο απόδοσης υπολογίζεται από ένα καταγραφέα δεδομένων και κάθε καταγραφέας μπορεί να υπολογίσει περισσότερα από ένα μέτρα απόδοσης. Για παράδειγμα, ένας καταγραφέας που μετρά το μήκος μιας σειράς αναμονής των οχημάτων μπορεί να υπολογίσει και το μέσο μήκος της σειράς αναμονής καθώς επίσης και το μέγιστο μήκος της σειράς αναμονής. Ο καταγραφέας μπορεί επίσης να υπολογίσει το ελάχιστο μήκος της σειράς αναμονής. Αυτό όμως μπορεί να μην είναι ένα ενδιαφέρον μέτρο απόδοσης, ιδιαίτερα εάν η σειρά αναμονής είναι πάντα κενή στην έναρξη ή το τέλος μιας προσομοίωσης, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωσή μας.

Αφού έχει δημιουργηθεί και έχει επικυρωθεί το μοντέλο του υπό εξέταση συστήματος, υπάρχουν διάφορες αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν πριν να προχωρήσει μια μελέτη. Το πειραματικό σχέδιο ασχολείται με τον καθορισμό των σεναρίων που πρόκειται να προσομοιωθούν και τον τρόπο με τον οποίο κάθε σενάριο θα προσομοιωθεί στη μελέτη. Για κάθε σενάριο προσομοίωσης, ο αναλυτής πρέπει να αποφασίσει πόσες προσομοιώσεις θα γίνουν, πόσο μεγάλες σε διάρκεια θα είναι οι προσομοιώσεις και πώς θα αρχικοποιηθεί κάθε σενάριο. Τόσο η χρονική διάρκεια όσο και ο αριθμός δοκιμών της προσομοίωσης μπορούν να έχουν έναν σημαντικό αντίκτυπο στις εκτιμήσεις των μέτρων απόδοσης. Η λήψη αυθαίρετων ή ανάρμοστων αποφάσεων οδηγεί σε σπατάλη χρόνου και η μελέτη προσομοίωσης μπορεί να αποτύχει να παραγάγει χρήσιμα αποτελέσματα.

Προκειμένου να συγκεντρώσουμε τα απαραίτητα δεδομένα για τα μέτρα αξιολόγησης της εξυπηρέτησης του συνεργείου κατά την προσομοίωση έγινε καταγραφή των ουρών στο χώρο στάθμευσης, στα ενδιάμεσα στάδια παροχής υπηρεσιών καθώς και του αριθμού των εξυπηρετούμενων πελατών. Για το χρόνο αναμονής και εξυπηρέτησης υλοποιήθηκαν write in file monitors (pass quality,arrivals). Οι καταγραφείς αυτοί εξάγουν σε αρχεία τα στοιχεία που καταγράφουν. Το πρώτο (pass quality) μας δίνει τους χρόνους εξυπηρέτησης και το δεύτερο (arrivals) τους χρόνους άφιξης των υπο επισκευή οχημάτων. Έτσι

μπορούμε να υπολογίσουμε και τους χρόνους αναμονής με ένα λογιστικό φύλλο excel (waiting time.xlsx) το οποίο εισάγει και ανανεώνει αυτόματα τα δεδομένα καθώς αυτά εγγράφονται στα αρχεία των monitors. Παρακάτω (εικόνα 4.1) παραθέτονται οι καταγραφείς που χρησιμοποιήθηκαν στο τελικό δίκτυο Petri.



Εικόνα 4.1: Οι καταγραφείς που χρησιμοποιηθηκαν στο τελικό δίκτυο

5. Πειράματα αξιολόγησης της εξυπηρέτησης οχημάτων σε διαφορετικές συνθήκες εργασίας

5.1 Περιγραφή μεθοδολογίας

Για τη μέτρηση της απόδοσης του συστήματός μας και των επιπτώσεων που μπορούν να έχουν τα ανθρώπινα λάθη που μοντελοποιήσαμε στους προηγούμενους δείκτες απόδοσης, διενεργήσαμε μια σειρά από πειράματα αξιολόγησης της εξυπηρέτησης των εισερχόμενων οχημάτων στο συνεργείο. Χρησιμοποιήθηκε το τελικό μοντέλο του δικτύου Petri (με τη δομή των εικόνων 3.13 , 3.14) και τις παραλλαγές που προέκυψαν, από τις μεταβολές στον αριθμού και τις ιδιότητες των διαθέσιμων πόρων.

Έγιναν τα εξής πειράματα:

1) Επίδραση του αριθμού εργαλείων - εξοπλισμού (1→2)
2) Επίδραση του διαθέσιμου ανθρώπινου δυναμικού (5→2)
3) Επίδραση των διαθέσιμων αποβαθρών εξυπηρέτησης (3→7)
4) Επίδραση του αρχικού φόρτου εργασίας (μικρός→μεγάλος)
5) Επίδραση του βαθμού εξειδίκευσης των εργατών (μικρή→μεγάλη)
6) Επίδραση του αριθμού των χώρων στάθμευσης (parking) (1→4)

Τα ανθρώπινα λάθη που εξετάστηκαν ανταποκρίνονται στους τρεις τρόπους μοντελοποίησής τους που χρησιμοποιήσαμε, όπως αυτοί αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.2. Έτσι, εξετάστηκαν λάθη (κακή ποιότητα επισκευής) που προέκυψαν λόγω του αυξημένου φόρτου εργασίας, της περιορισμένης εξειδίκευσης των εργατών και της επιλογής ακατάλληλων μεθόδων επισκευής. Οι

τρεις αυτοί παράγοντες επηρεάζουν το ρυθμό εμφάνισης λαθών στο μοντέλου του συστήματός μας. Στα πειράματα που πραγματοποιήσαμε έχουμε προσπαθήσει να εκτιμήσουμε την επίδραση των παραγόντων αυτών στην παραγωγικότητα και στους δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης του παραγωγικού συστήματος.

Σε κάθε πείραμα έγιναν τρεις επαναληπτικές προσωμοιώσεις (εικόνα 5.1) με κριτήρια τον χρόνο προσωμοίωσης (2000 time units) και μέτρο σύγκρισης τις επιδόσεις του δικτύου με μέση παραγωγικότητα 100 οχημάτων στο χρονικό διάστημα αυτό. Η επιλογή των πειραμάτων έγινε με σκοπό να απαντηθούν ερωτήματα όπως: χρειάζεται το συνεργείο περισσότερο εξοπλισμό, εργάτες, χώρους στάθμευσης ή η βελτίωση της παραγωγικότητας δεν δικαιολογεί τέτοιες δαπάνες? Αξίζει τον κόπο η εκπαίδευση των εργατών ή δεν χρειάζεται? Πόσο επηρεάζει η κούραση και τα λάθη που αυτή επιφέρει την απόδοση του συνεργείου?

```
CPN'Replications.nreplications 3
```

Εικόνα 5.1: Ο κώδικας των επαναληπτικών προσωμοιώσεων

Στο φάκελο του κάθε πειράματος υπάρχουν οι αναφορές και όλα τα στοιχεία που προέκυψαν. Συκεκριμένα για κάθε πείραμα υπάρχουν οι αναφορές των αποτελεσμάτων των καταγραφέων καθώς και οι αναφορές κάθε επαναληπτικής προσομοίωσης. Ακόμα υπάρχουν οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων σε μορφή gnuplot.

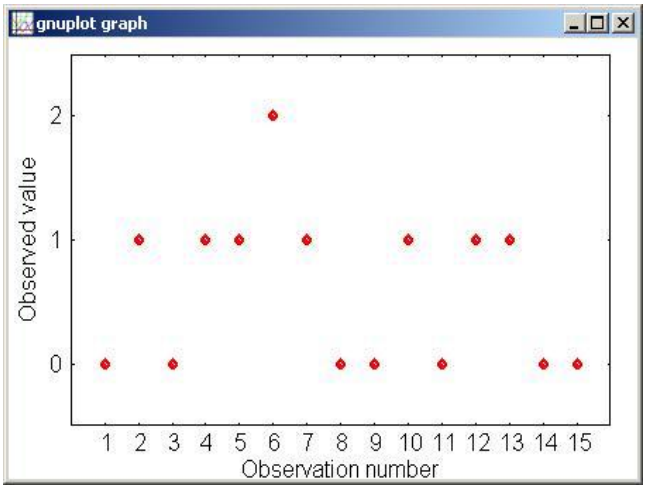
Για την επεξεργασία των δεδομένων όλων των πειραμάτων έγινε χρήση χρονισμένων στατιστικών (timed statistics). Τα χρονισμένα στατιστικά (εικόνα 5.2.β) διαφέρουν από τα μη χρονισμένα (εικόνα 5.2.α) στο ότι ένα χρονικό διάστημα χρησιμοποιείται ως συντελεστής βάρους κάθε παρατήρησης. Οι τελείες στις εικόνες 5.2.α και 5.2.β αντιστοιχούν στις παράτηρήσεις/καταγραφές που έγιναν.

Γενικά (για μη χρονισμένα στατιστικά) το άθροισμα και ο μέσος όρος n παρατηρήσεων υπολογίζεται ως εξής (όπου x_1 .... x_n οι τιμές των παρατηρήσεων):

$$Sum_n = x_1 + x_2 + \ldots + x_n$$

$$Avrg_n = Sum_n / n$$

Παρακάτω, στην εικόνα 5.2.α φαίνεται ένα παράδειγμα τιμών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστούν μη χρονισμένα στατιστικά:



Εικόνα 5.2.α.: Μη Χρονισμένη στατιστική επεξεργασία δεδομένων

Οι τιμές δεδομένων στην παραπάνω εικόνα είναι οι εξής:

i	x_i
1	0
2	1
3	0
4	1
5	1
6	2
7	1
8	0
9	0
10	1
11	0
12	1
13	1
14	0
15	0

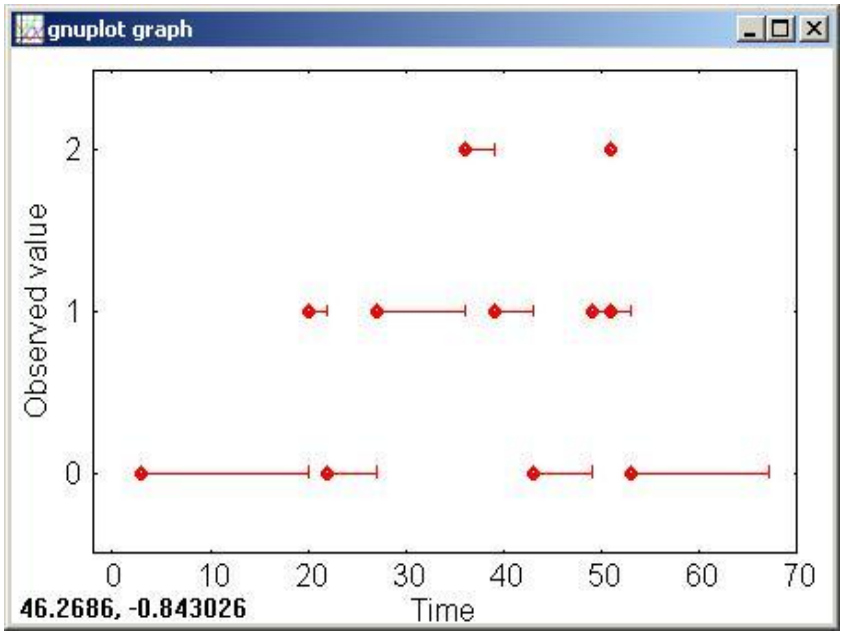
Για τις τιμές αυτές το άθροισμα είναι ίσο με: sum=9 και ο μέσος όρος τους ίσος με: avrg=0.6.

Με τη χρήση χρονισμένων στατιστικών όμως, το άθροισμα και ο μέσος όρος υπολογίζεται ως εξής (όπου t_2-t_1...t-t_n τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των παρατηρήσεων):

```
Sum_t = x_1*(t_2-t_1) + x_2*(t_3-t_2) + ... + x_n*(t-t_n)

Avrg_t = Sum_t/(t-t_1)
```

Παρακάτω, στην εικόνα 5.2.β φαίνεται ένα παράδειγμα τιμών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστούν χρονισμένα στατιστικά:



Εικόνα 5.2.β.: Χρονισμένη στατιστική επεξεργασία δεδομένων

Οι ευθείες μετά από κάθε παρατήρηση στην εικόνα 5.2.β αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα μέχρι την επόμενη παρατήρηση, χρονικό διάστημα που χρησιμοποιήθηκε ως συντελεστής βάρους για την κάθε παρατήρηση.

Αναλυτικότερα, ας υποθέσουμε ότι η τιμή x_i καταγράφεται τη χρονική στιγμή t_i, με i=1..n. Το χρονικό διάστημα [t_i,t_i+1] χρησιμοποιείται ως συντελεστής βάρους της τιμής x_i, δηλαδή ο συντελεστής βάρους της τιμής x_i είναι (t_i+1 - t_i).

Οι τιμές δεδομένων, ο χρόνος παρατήρησης και τα χρονικά διαστήματα της παραπάνω εικόνας 5.2.β είναι τα εξής:

i	x_i	t_i	t_i+1 - t_i
1	0	3	17
2	1	20	2
3	0	22	5
4	1	27	9
5	2	36	3
6	1	39	4
7	0	43	6
8	1	49	2
9	2	51	0
10	1	51	2
11	0	53	14
-	-	67	-

Για τις τιμές αυτές, τη χρονική στιγμή 67 το χρονισμένο άθροισμα είναι ίσο με: timed sum=25 και ο χρονισμένος μέσος όρος τους ίσος με: timed avrg=0.390625.

Με τη χρήση λοιπόν των χρονισμένων στατιστικών μπορούμε να έχουμε μια πιο ακριβή εικόνα της κατάστασης καθώς λαμβάνεται υπ'όψη και ο χρόνος παραμονής του συστήματος σε μια κατάσταση. Χωρίς τη χρήση χρονισμού είναι σαν να υποθέτουμε ότι το κάθε όχημα φτάνει στον προορισμό του με ομοιόμορφη κατανομή, κάτι που δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα.

Παρακάτω, στην εικόνα 5.3 βλέπουμε μια τελική αναφορά προσομοίωσης (περιλαμβάνει την πραγματοποίηση τριών επαναληπτικών προσομοιώσεων) του τελικού δικτύου, που χρησιμοποιήθηκε ως δίκτυο αναφοράς σε όλα τα πειράματα. Τα στοιχεία που υπολογίζονται είναι η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση τιμή της μεταβλητής που παρακολουθούμε καθώς και τα διαστήματα εμπιστοσύνης (90,95 και 99%) που δείχνουν την πιθανότητα να προκύψουν οι μετρήσεις μας στο συγκεκριμένο διάστημα σε επαναληπτικές προσομοιώσεις με τις ίδιες συνθήκες. Ακόμα υπολογίζεται η τυπική απόκλιση (Standard Deviation StD).

Η προσθήκη _iid σε κάθε μεταβλητή υποδηλώνει ότι αυτή είναι ανεξάρτητη και όμοια κατανεμημένη σε όλες τις επαναλήψεις των προσομοιώσεων (Independent and Identically Distributed). Η υπογραμμισμένη τιμή (100) της εικόνας 5.3 είναι η μέση μέγιστη παραγωγικότητα του δικτύου και αντιπροσωπεύει το μέσο αριθμό των οχημάτων που επισκευάστηκαν επιτυχώς κατά τη διάρκεια των 3 επαναληπτικών προσομοιώσεων.

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Διαστήματα εμπιστοσύνης**			**Τυπική απόκλιση (StD)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
		90% Half Length	**95% Half Length**	**99% Half Length**			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	2
Κ μέγιστο (max_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	110.00	8.92	13.15	30.32	5.29	104	114
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.0013	0.0013	0.0019	0.0044	0.00076	0.0005	0.002

Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	248.67	49.13	72.4	167	29.14	216	272
Κ μέγιστο (max_iid)	1.67	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	133.33	23.68	34.9	80.5	14.05	120	148
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	102.00	3.37	4.97	11.46	2.00	100	104
Κ μέγιστο (max_iid)	100.00	3.37	4.97	11.46	2.00	98	102
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	47.84	0.72	1.06	2.44	0.43	47.35	48.13

Εικόνα 5.3: Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου αναφοράς

Παρακάτω, στην εικόνα 5.4 παραθέτουμε έναν επεξηγηματικό πίνακα για όλους τους όρους που εμφανίζονται στην αναφορά κάθε προσομοίωσης (εικόνα 5.3)

αγγλικοί όροι/συντομογραφίες	επεξήγηση
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)	Ουρά αναμονής στο χώρο στάθμευσης
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)	Ουρά αναμονής στη θέση της αποβάθρας ευθυγράμμισης
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)	Ουρά αναμονής στη θέση της κύριας αποβάθρας
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)	Ουρά αναμονής στη θέση της αποβάθρας ανύψωσης
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)	Πλήθος των οχημάτων που έχουν ολοκληρώσει την επισκευή
Διαστήματα εμπιστοσύνης (90%,95% ,99% Half Length)	Διαστήματα εμπιστοσύνης (90%,95% και 99%) που δείχνουν την πιθανότητα να προκύψουν οι μετρήσεις μας στο συγκεκριμένο διάστημα σε επαναληπτικές προσομοιώσεις με τις ίδιες συνθήκες
Μέγιστη τιμή (Max)	Μέγιστη τιμή όσων καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των τριών επαναληπτικών προσομοιώσεων

Ελάχιστη τιμή (Min)	Ελάχιστη τιμή όσων καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των τριών επαναληπτικών προσομοιώσεων
Μέση τιμή (Avrg)	Μέση τιμή όσων καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των τριών επαναληπτικών προσομοιώσεων υπολογισμένη με τους τύπους των χρονισμένων στατιστικών
Τυπική απόκλιση (StD)	Τυπική απόκλιση (Standard Deviation)
Κ ενεργοποιητής (Κ ενεργοποιητής (count_iid))	Μετρητής ενεργοποιήσεων του κάθε καταγραφέα
Κ μέγιστο (Κ μέγιστο (max_iid))	Μέγιστη τιμή των παρατηρήσεων του καταγραφέα. Είναι ανεξάρτητη και όμοια κατανεμημένη σε όλες τις επαναλήψεις των προσομοιώσεων
Κ ελάχιστο (Κ ελάχιστο (min_iid))	Ελάχιστη τιμή των παρατηρήσεων του του καταγραφέα. Είναι ανεξάρτητη και όμοια κατανεμημένη σε όλες τις επαναλήψεις των προσομοιώσεων. Έχει πάντα μηδενική τιμή λόγω των αρχικών συνθηκών που επιλέξαμε
Κ μέση τιμή (Κ μέση τιμή (avrg_iid))	Μέση τιμή των παρατηρήσεων του καταγραφέα. Είναι ανεξάρτητη και όμοια κατανεμημένη σε όλες τις επαναλήψεις των προσομοιώσεων

Εικόνα 5.4: Επεξηγηματικός πίνακας αγγλικών όρων και συντομογραφιών αναφοράς προσομοίωσης

Για να γίνει πιο κατανοητός ο πίνακας της εικόνας 5.3 θα αναλύσουμε μια γραμμή, στην οποία έχουμε υπογραμμίσει ένα κελί και φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 5.5. Στη γραμμή λοιπόν αυτή βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή των δεδομένων που έχουν καταγραφεί στο οποίο αναφέρεται (καταγραφέας **Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1**) έχει τα εξής χαρακτηριστικά: μέση τιμή 100, διαστήματα εμπιστοσύνης (90%,95% και 99%) 3.37, 4.97 και 11.46 αντίστοιχα, τυπική απόκλιση 2, ελάχιστη τιμή 98 και μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε 102. Έτσι βγάλαμε το συμπέρασμα ότι η υπογραμμισμένη τιμή (100) της εικόνας 5.5 είναι η μέση μέγιστη παραγωγικότητα του δικτύου και αντιπροσωπεύει το μέσο αριθμό των οχημάτων που επισκευάστηκαν επιτυχώς κατά τη διάρκεια των 3 επαναληπτικών προσομοιώσεων, αφού πρόκειται για τη μέση τιμή των μέγιστων τιμών που καταγράφηκαν στη θέση των επισκευασμένων οχημάτων (ready for customer).

Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Κ μέγιστο (max_iid)	100.00	3.37	4.97	11.46	2.00	98	102

Εικόνα 5.5: Απόσπασμα αναφοράς προσομοίωσης τελικού δικτύου αναφοράς

Παρακάτω, στην εικόνα 5.6 βλέπουμε μια αναφορά υπολογισμού του χρόνου αναμονής των οχημάτων του τελικού δικτύου. Υπενθυμίζουμε ότι για το χρόνο αναμονής και εξυπηρέτησης υλοποιήθηκαν δύο καταγραφείς (με ονόματα pass quality και arrivals). Οι καταγραφείς αυτοί εξάγουν σε αρχεία τα στοιχεία που καταγράφουν. Ο πρώτος (pass quality) μας δίνει τους χρόνους εξυπηρέτησης και ο δεύτερος (arrivals) τους χρόνους άφιξης των οχημάτων. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε και τους χρόνους αναμονής με ένα λογιστικό φύλλο (waiting time.xlsx) το οποίο εισάγει και ανανεώνει αυτόματα τα δεδομένα καθώς αυτά εγγράφονται στα αρχεία. Λόγω των τριών επαναληπτικών δοκιμών, ο τελικός πίνακας περιέχει εννιά στήλες δεδομένων (δηλαδή τρεις για κάθε μια από τις προσομοιώσεις). Ο μέσος χρόνος αναμονής μπορεί να εξαχθεί και έμμεσα από την παραγωγικότητα, εφόσον το χρονικό

διάστημα είναι σταθερό σε όλες τις προσομοιώσεις. Για χωροταξικούς λόγους έχουν παραληφθεί οι εγγραφές 11 εως 93. Παρόλο που δεν είμαστε σίγουροι αν τα οχήματα εξέρχονται από το σύστημα με την ίδια σειρά με την οποία εισέρχονται, ο συνολικός μέσος χρόνος αναμονής είναι σωστός αφού δεν μας ενδιαφέρει ο χρόνος αναμονής κάθε οχήματος αλλά η συνολική παραγωγικότητα του συνεργείου.

	Δοκιμή 1			**Δοκιμή 2**			**Δοκιμή 3**		
μετρη-τής	Χρόνος άφιξης	Χρόνος εξυπη-ρέτησης	Χρόνος αναμονής	Χρόνος άφιξης	Χρόνος εξυπη-ρέτησης	Χρόνος αναμονής	Χρόνος άφιξης	Χρόνος εξυπη-ρέτησης	Χρόνος αναμονής
1	56	63	7	63	90	27	51	62	11
2	89	104	15	83	102	19	74	84	10
3	96	120	24	88	104	16	87	121	34
4	100	126	26	92	159	67	97	127	30
5	114	189	75	130	171	41	131	163	32
6	178	255	77	173	194	21	143	226	83
7	188	255	67	174	198	24	174	228	54
8	190	271	81	183	219	36	182	236	54
9	198	281	83	228	258	30	187	247	60
10	245	288	43	240	272	32	227	314	87
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
94	1792	1842	50	1807	1889	82	1790	1316	56
95	1816	1855	39	1823	1912	89	1832	1325	60
96	1825	1907	82	1827	1918	91	1837	1334	17
97	1842	1909	67	1845	1926	81	1877	1366	41
98	1846	1927	81	1867	1952	85	1878	1374	47
99	1898	1962	64	1897			1919	1397	36
100	1901	1966	65	1915			1925	1426	40
101	1919	1975	56	1943			1951	1457	60
102	1919	2004	85	1962			1974	1490	74
103	1975			1991			1999	1506	58
104	1981			2001			2004	1513	64
105	1999							1522	64
106	2005							1555	84

Εικόνα 5.6: Παράδειγμα αναφοράς υπολογισμού χρόνου αναμονής τελικού δικτύου αναφοράς

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τις προσομοιώσεις που έγιναν σε καθένα από τα πειράματα και θα αναφερθούμε στα μέτρα αξιολόγησης της απόδοσης του παραγωγικού συστήματος, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2 Επίδραση του αριθμού εργαλείων – εξοπλισμού (πείραμα 1)

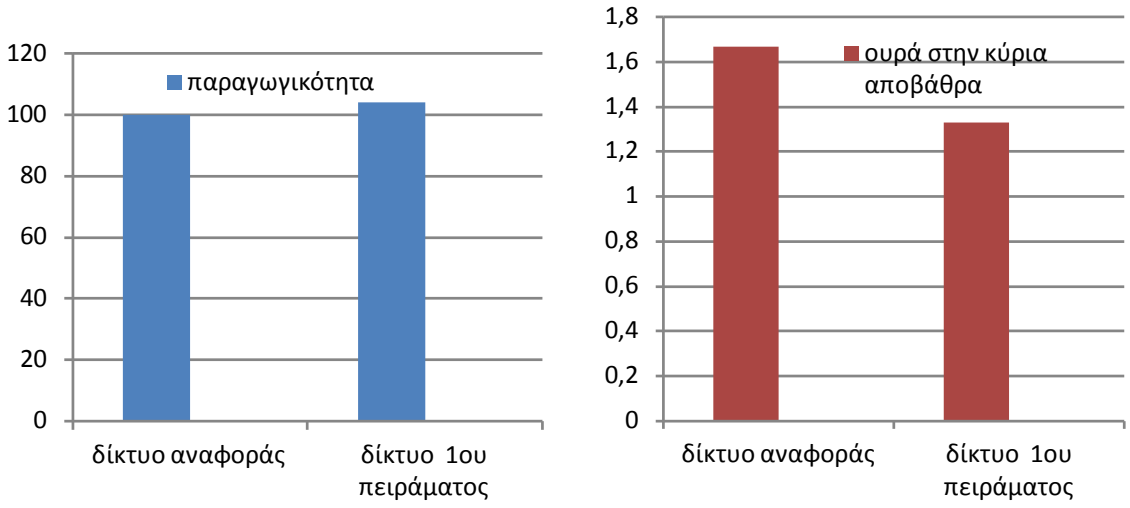
Στο πρώτο πείραμα μεταβλήθηκε ο αριθμός του εξοπλισμού (equipment). Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.15 και 3.17, το συνεργείο διαθέτει ένα μόνο σετ εξοπλισμού το οποίο όμως είναι απαραίτητο τόσο για τις εργασίες του γενικού ελέγχου (inspection) όσο και για τις εργασίες επισκευής της μηχανής (engine). Έτσι έχουμε την περίπτωση όπου δύο διεργασίες που μπορεί να γίνουν παράλληλα αναγκάζονται να μοιραστούν τους απαραίτητους πόρους τους. Μεταβάλαμε λοιπόν τον αριθμό του εξοπλισμού από 1 σε 2 για να δούμε αν αυτό θα έχει κάποια επίδραση στην απόδοση του συστήματος.

Παρακάτω, στην εικόνα 5.2.α, η οποία αποτελεί απόσπασμα του παραρτήματος Π.7.1, μπορούμε να δούμε την αναφορά των επαναληπτικών προσομοιώσεων για το 1^{ο} πείραμα για τους καταγραφείς που επηρεάζονται περισσότερο.

Αποτελέσματα			
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.33	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00

Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	104.00	103	105
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	49.36	48.66	50.59

Εικόνα 5.2.α: Απόσπασμα αναφοράς προσομοίωσης τελικού δικτύου 1ου πειράματος



Εικόνα 5.2.β: Σύγκριση δεικτών τελικού δικτύου 1ου πειράματος με το δίκτυο αναφοράς

Παρατηρούμε ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, αυξήθηκε η μέση παραγωγικότητα από 100 σε 104 οχήματα και μειώθηκε το μέσο μέγιστο μήκος των ουρών που εμφανίζονται στην κύρια αποβάθρα (στην οποία πραγματοποιούνται τόσο οι εργασίες γενικού ελέγχου όσο και οι εργασίες επισκευής της μηχανής) από 1.67 σε 1.33 (εικόνα 5.2.β). Οι ουρές αναμονής στα υπόλοιπα σημεία μέτρησης δεν επηρεάζονται σημαντικά. Το αν η διαφορά της συμπεριφοράς του συστήματός είναι σημαντική δεν μπορεί να υπολογιστεί παρά μόνο αν τη συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα και των υπόλοιπων πειραμάτων , δηλαδή με την επίδραση που μπορούν να έχουν και οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συνεργείου. Στη συνέχεια θα μπορούσαμε να κάνουμε μια μελέτη κόστους/απόδοσης και να καταλήξουμε στο τι μας συμφέρει να αλλάξουμε στον εξοπλισμό, τους πόρους, το προσωπικό και τι όχι.

5.3 Επίδραση του διαθέσιμου ανθρώπινου δυναμικού (πείραμα 2)

Στο δεύτερο πείραμα μεταβλήθηκε ο αριθμός των εργατών (mechanics) από 5 σε 2 χωρίς να επηρεαστούν οι υπόλοιποι παράγοντες , δηλαδή διατηρώντας σταθερό το μέσο επίπεδο ειδίκευσης και κούρασης του εργατικού δυναμικού. Όπως μπορούμε να δούμε στις εικόνες 3.15 έως 3.18, οι εργάτες δραστηριοποιούνται σε όλα τα επίπεδα του δικτύου αφού είναι αυτοί που εκτελούν όλες τις εργασίες. Μια τόσο μεγάλη μεταβολή του αριθμού των εργατών λοιπόν θα περιμέναμε να έχει μια σημαντική επίπτωση στην απόδοση του συνεργείου.

Παρακάτω, στην εικόνα 5.3.α, η οποία αποτελεί απόσπασμα του παραρτήματος Π.7.2, μπορούμε να δούμε την αναφορά των επαναληπτικών προσομοιώσεων για το $2^{ο}$ πείραμα.

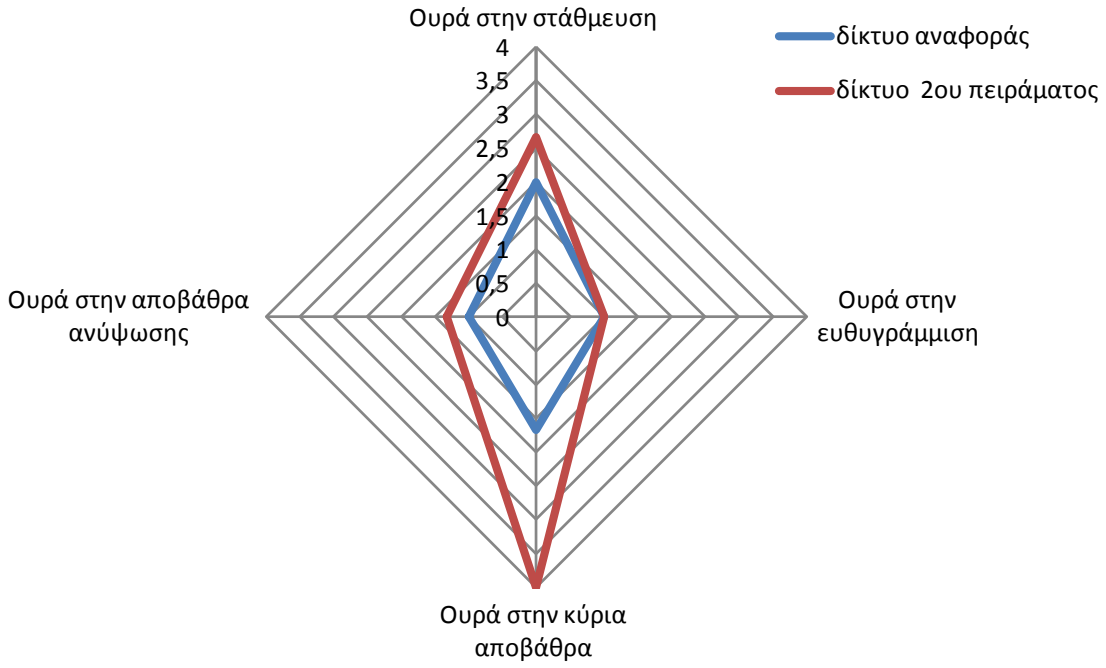
Αποτελέσματα			
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	2.67	2	3
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0

Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.004	0.001	0.006
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	4.00	4	4
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	1.28	1.14	1.39
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.33	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.0005	0.003
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	77.00	74	79
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	42.74	41.03	44.28

Εικόνα 5.3.α: Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 2^{ου} πειράματος

Παρατηρούμε ότι όπως αναμέναμε μειώθηκε η μέση παραγωγικότητα από 100 σε 77 οχήματα και αυξήθηκε σημαντικά το μέσο μήκος όλων των εσωτερικών ουρών που έχουν καταγράφει (σημειωμένα με πράσινο χρώμα στην εικόνα 5.3.α). Συγκριτικά με το πείραμα 1 και την επίδοση του δικτύου αναφοράς παρατηρούμε ότι στην κύρια αποβάθρα έχουμε μέσο μέγιστο μήκος ουράς 4 (από 1.67 στο δίκτυο αναφοράς).

Παρακάτω , στην εικόνα 5.3.β βλέπουμε μια σύγκριση των μέσων μέγιστων ουρών αναμονής σε όλα τα σημεία που έχουμε καταγραφείς ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου του 2^{ου} πειράματος και σε αυτά του δικτύου αναφοράς.



Εικόνα 5.3.β: Σύγκριση μέσων μέγιστων ουρών αναμονής δικτύου 2^{ου} πειράματος με αυτές του δικτύου αναφοράς

5.4 Επίδραση των διαθέσιμων αποβαθρών εξυπηρέτησης (πείραμα 3)

Στο τρίτο πείραμα μεταβλήθηκε ο αριθμός των αποβαθρών (bays) από 3 σε 7. Καθώς οι αποβάθρες έχουν μεγάλο κόστος, η χρησιμότητα αυτού του πειράματος είναι μεγάλη καθώς μας βοηθά να μειώσουμε σημαντικά το κόστος του εξοπλισμού μας διατηρώντας βέλτιστη την απόδοση του συνεργείου.

Παρακάτω, στην εικόνα 5.4.α, η οποία αποτελεί απόσπασμα του παραρτήματος Π.7.3, μπορούμε να δούμε την αναφορά των επαναληπτικών προσομοιώσεων για το 3^{ο} πείραμα.

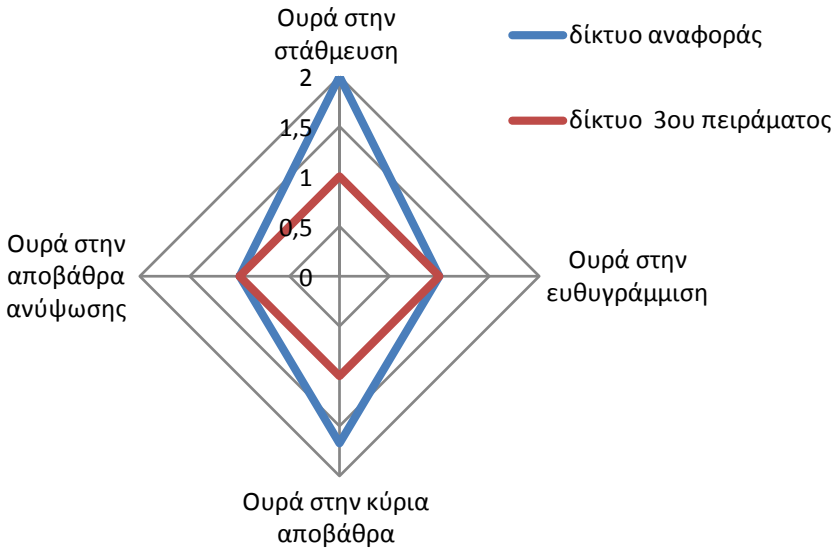
Αποτελέσματα			
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.0006	0.004
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.01	0.001	0.01
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.004	0.0001	0.008

Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	100.67	98	103
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	48.03	47.39	48.96

Εικόνα 5.4.α: Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 3ου πειράματος

Παρατηρούμε ότι παρόλο που έχουμε κυριολεκτικά μηδενίσει όλες τις εσωτερικές ουρές (όπως φαίνεται από τα στοιχεία με χρώμα η μέγιστη τιμή της ουράς δεν ξεπερνά σε κανένα σημείο του συστήματος τη μονάδα). Δεν κερδίζουμε σχεδόν τίποτα από πλευράς παραγωγικότητας καθώς αυτή έχει μόλις φτάσει το 100.67 (από 100 του δικτύου αναφοράς). Οι δύο αυτές παρατηρήσεις μας δείχνουν ότι δεν εκμεταλλευόμαστε όσο θα μπορούσαμε τους πόρους του συστήματός μας και ότι υπάρχουν άλλοι παράγοντες που δεν επιτρέπουν την αύξηση της απόδοσής του οι οποίοι θα φανούν στα επόμενα πειράματα.

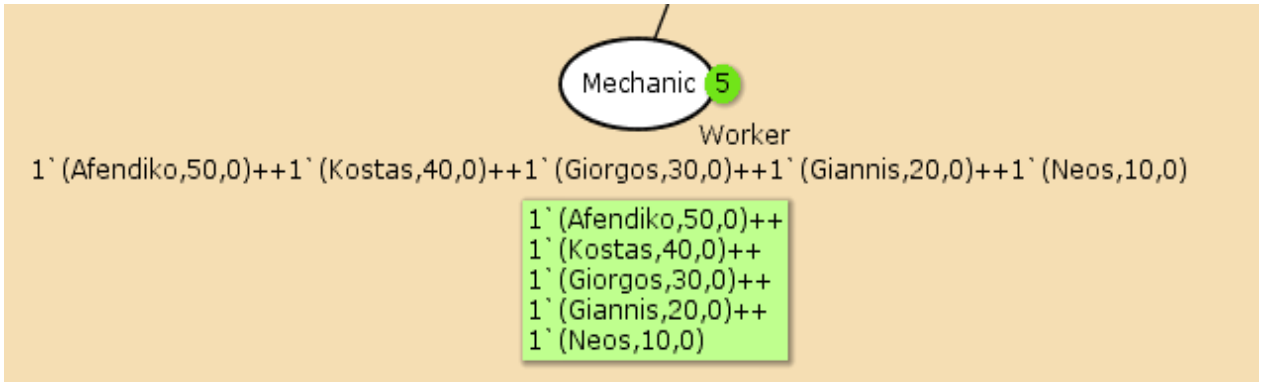
Παρακάτω , στην εικόνα 5.4.β βλέπουμε μια σύγκριση των μέσων μέγιστων ουρών αναμονής σε όλα τα σημεία που έχουμε καταγραφείς ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου του 3ου πειράματος και σε αυτά του δικτύου αναφοράς.



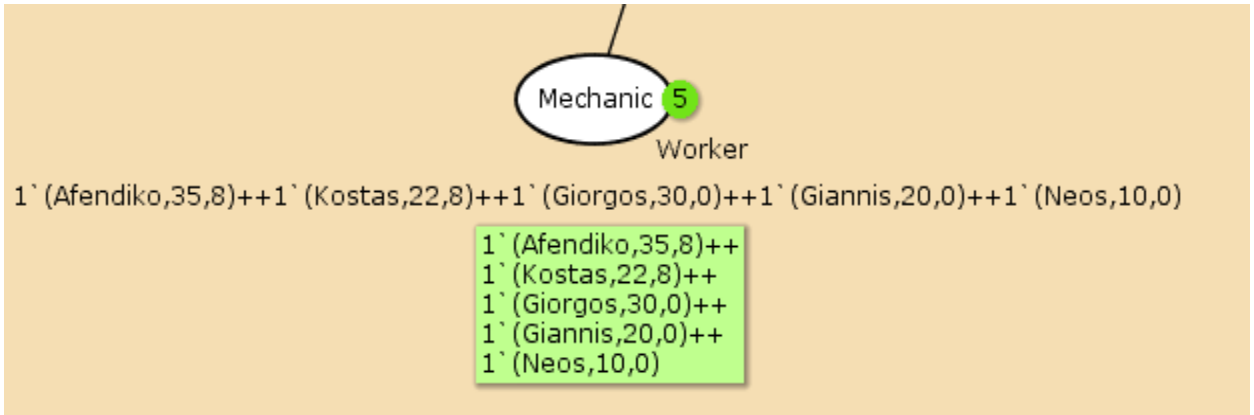
Εικόνα 5.4.β: Σύγκριση μέσων μέγιστων ουρών αναμονής δικτύου 3ου πειράματος με αυτές του δικτύου αναφοράς

5.5 Επίδραση του αρχικού φόρτου εργασίας (πείραμα 4)

Στο τέταρτο πείραμα αυξήθηκε η αρχική κούραση των εργατών (πεδίο fortos κάθε μηχανικού). Ενώ στη προσομοίωση του δικτύου αναφοράς όλοι οι εργάτες ξεκινάνε ξεκούραστοι με αρχική τιμή φόρτου 0 (εικόνα 5.5.α), στο δίκτυο που χρησιμοποιήσαμε στο 4^{ο} πείραμα οι δύο πιο έμπειροι εργάτες ξεκινάνε πολύ κουρασμένοι (εικόνα 5.5.β). Σ'αυτό το σημείο πρέπει να υπενθυμίσουμε τη σύνδεση που έχουμε κάνει στον κώδικά μας ανάμεσα στο επίπεδο εξειδίκευσης των εργατών και τον φόρτο εργασίας/κούραση κώδικας που ενεργοποιείται για κάθε μηχανικό μετά την εκτέλεση μιας εργασίας (if f=5 then (m,l-1,0) else (m,l,f+1) όπου f ο φόρτος εργασίας/κούραση και l το επίπεδο εξειδίκευσης).

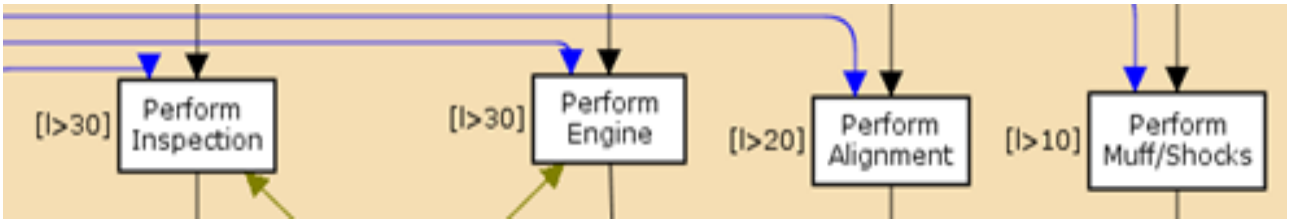


Εικόνα 5.5.α: Αρχικές συνθήκες φόρτου δικτύου αναφοράς



Εικόνα 5.5.β: Αρχικές συνθήκες φόρτου δικτύου 4^{ου} πειράματος

Το σενάριο που επιλέξαμε περιμένουμε να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος καθώς, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 5.5.γ ο κριτής/supervisor έχει θέση ως αναγκαίο επίπεδο εξειδίκευσης για την εκτέλεση των εργασιών γενικού ελέγχου (inspection) και επισκευής της μηχανής (engine) το επίπεδο 30 (l>30). Καθώς όμως εμείς έχουμε αυξήσει τα επίπεδα κούρασης μόνο ο εργάτης Afendiko είναι ικανός να εκτελέσει τις πιο πολύπλοκες εργασίες.



Εικόνα 5.5.γ: Απόσπασμα της εικόνας 3.16

Παρακάτω, στην εικόνα 5.5.δ, η οποία αποτελεί απόσπασμα του παραρτήματος Π.7.4, μπορούμε να δούμε την αναφορά των επαναληπτικών προσομοιώσεων για το 4^{ο} πείραμα.

Αποτελέσματα			
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	4.33	4	5
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00

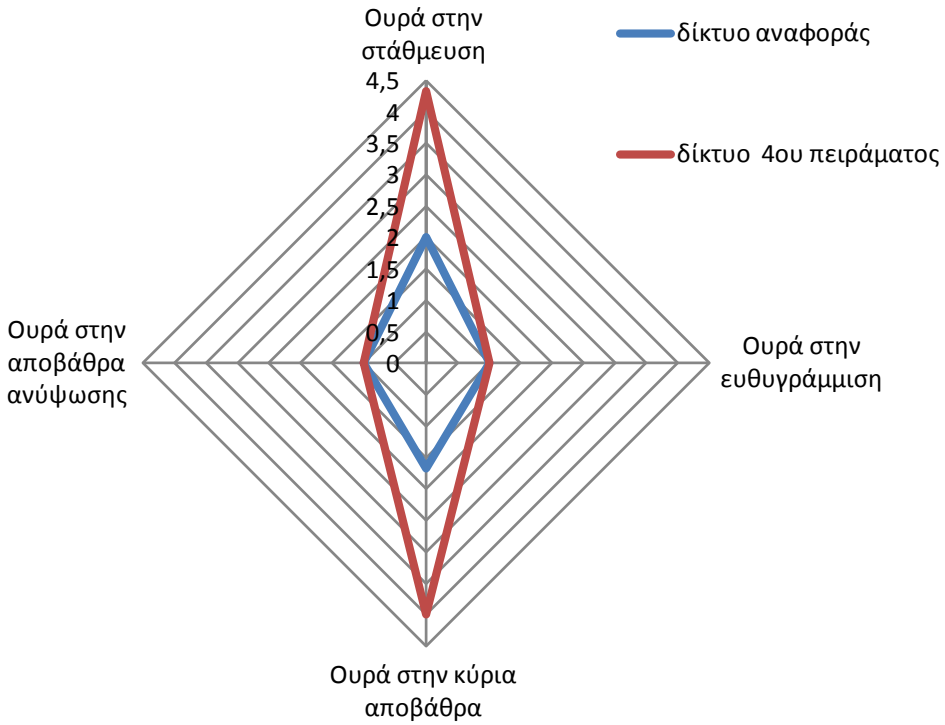
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.00	0.002
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	4.00	4	4
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	2.68	2.6	2.73
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	60.33	56	65
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	31.32	29.91	33.32

Εικόνα 5.5.δ: Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 4^{ου} πειράματος

Παρατηρούμε ότι η παραγωγικότητα επηρεάστηκε σημαντικά (έπεσε στα 60.3 οχήματα από τα 100 του δικτύου αναφοράς). Επίσης κάποιες ουρές αναμονής αυξήθηκαν σημαντικά (στο χώρο στάθμευσης (parking) η μέση μέγιστη τιμή της έφτασε τα 4.3 οχήματα από 0 στο δίκτυο αναφοράς).

Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η κούραση δεν επηρεάζει μόνο το ποιος εργάτης μπορεί να εκτελέσει ποια εργασία αλλά και την ποιότητα της επισκευής ((if f<3 then discuniform(8.0,10.0) else discuniform(5.0,8.0)). Αυτό σημαίνει ότι αν ο φόρτος εργασίας f είναι μικρός τότε η ποιότητα της επισκευής q θα είναι καλή (8<q<10) και επομένως απαιτούνται λιγότερο συχνές επαναληπτικές επιδιορθώσεις μετά τον ποιοτικό έλεγχο των οχημάτων.

Παρακάτω , στην εικόνα 5.5.β βλέπουμε μια σύγκριση των μέσων μέγιστων ουρών αναμονής σε όλα τα σημεία που έχουμε καταγραφείς ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου του 4^{ου} πειράματος και σε αυτά του δικτύου αναφοράς.



Εικόνα 5.5.β: Σύγκριση μέσων μέγιστων ουρών αναμονής δικτύου 4^{ου} πειράματος με αυτές του δικτύου αναφοράς

5.6 Επίδραση του βαθμού εξειδίκευσης του ανθρώπινου δυναμικού (πείραμα 5)

Στο πέμπτο πείραμα αυξήθηκε το επίπεδο της εξειδίκευσης των εργατών (πεδίο level κάθε μηχανικού). Συγκεκριμένα τους δόθηκε ένα αρκετά μεγάλο επίπεδο (l=50) ώστε όλοι οι εργάτες να μπορούν να εκτελούν μέχρι το τέλος της προσομοίωσης όλες τις εργασίες. Ουσιαστικά θέλαμε να απαντήσουμε στο ερώτημα ποια είναι η ιδανική διαστρωμάτωση της εμπειρίας των εργατών του συνεργείου, αν δηλαδή είναι καλύτερο να έχουμε μόνο έμπειρο προσωπικό η ένα μείγμα έμπειρων και νέων μηχανικών.

Παρακάτω, στην εικόνα 5.6.α, η οποία αποτελεί απόσπασμα του παραρτήματος Π.7.5, μπορούμε να δούμε την αναφορά των επαναληπτικών προσομοιώσεων για το 5^{ο} πείραμα.

Αποτελέσματα			
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	0.00	0	0
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.00	0.004

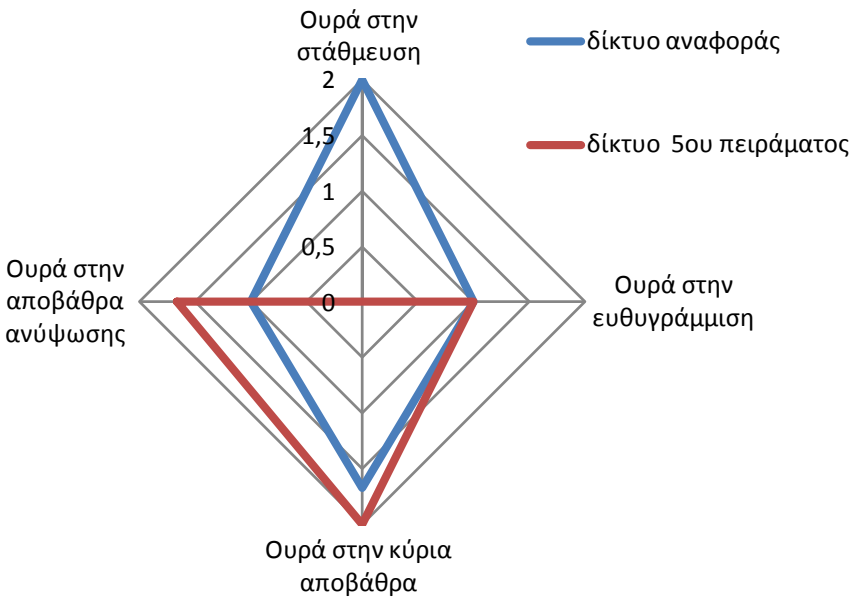
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	2.00	2	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.67	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	103.00	98	106
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	48.05	47.39	49.01

Εικόνα 5.6.α: Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 5ου πειράματος

Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του συστήματος είναι αρκετά παρόμοια με αυτή του δικτύου αναφοράς. Η παραγωγικότητα αυξήθηκε στα 103 οχήματα, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού το επίπεδο εξειδίκευσης επηρεάζει τη λειτουργία του δικτύου Petri μόνο στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει κανένας διαθέσιμος (idle) εργάτης αρκετά εξειδικευμένος ώστε να εκτελέσει κάποια εργασία. Το συμπέρασμα που βγάζουμε είναι ότι μάλλον δεν θα άξιζε να πληρώναμε έμπειρους εργάτες αλλά ένα εργατικό δυναμικό διαβαθμισμένης εμπειρίας είναι αρκετά αποτελεσματικό. Αυτό βέβαια ισχύει για το

συγκεκριμένο συνεργείο και τα όρια που έχει θέσει ο κριής/supervisor. Σε ένα άλλο συνεργείο τα συμπεράσματα θα μπορούσαν να είναι πολύ διαφορετικά.

Παρακάτω , στην εικόνα 5.6.β βλέπουμε μια σύγκριση των μέσων μέγιστων ουρών αναμονής σε όλα τα σημεία που έχουμε καταγραφείς ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου του 5^{ου} πειράματος και σε αυτά του δικτύου αναφοράς.



Εικόνα 5.6.β: Σύγκριση μέσων μέγιστων ουρών αναμονής δικτύου 5^{ου} πειράματος με αυτές του δικτύου αναφοράς

5.7 Επίδραση του αριθμού των χώρων στάθμευσης (πείραμα 6)

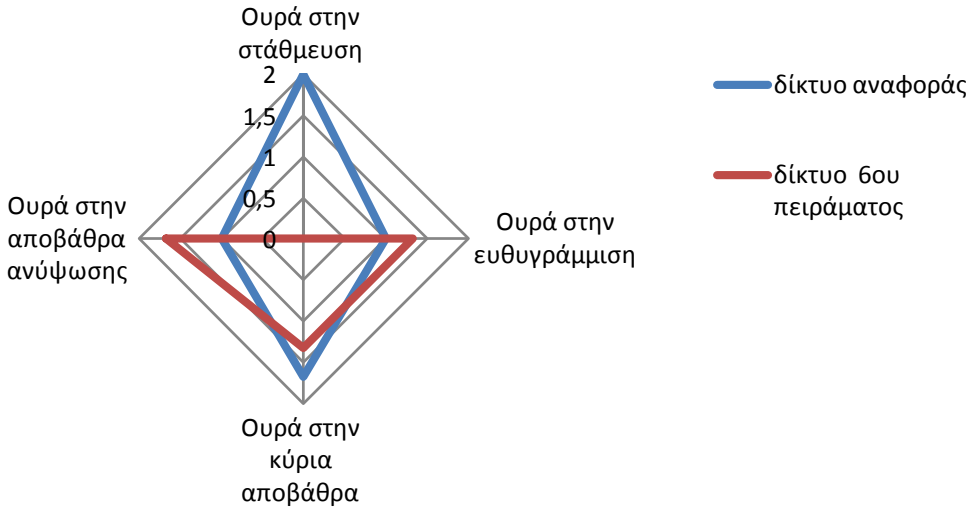
Στο έκτο πείραμα αυξήθηκε ο αριθμός των χώρων στάθμευσης (parking) από 1 σε 4. Παρακάτω, στην εικόνα 5.7.α, η οποία αποτελεί απόσπασμα του παραρτήματος Π.7.6, μπορούμε να δούμε την αναφορά των επαναληπτικών προσομοιώσεων για το 6^{ο} πείραμα.

Αποτελέσματα			
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	0.00	0	0
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.333	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.002	0.003
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.33	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	1.67	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.0002	0.00	0.0005

Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)			
Κ μέγιστο (max_iid)	101.67	99	103
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	48.34	47.42	49.23
Όνομα μεταβλητής	**Μέση τιμή (Avrg)**	**Ελάχιστη τιμή (Min)**	**Μέγιστη τιμή (Max)**

Εικόνα 5.7.α : Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 6ου πειράματος

Όπως ήταν αναμενόμενο μηδενίστηκαν οι ουρές αναμονής στο χώρο στάθμευσης (πρόκειται για τα οχήματα που περιμένουν για να μεταβούν στο χώρο στάθμευσης και όχι αυτά που βρίσκονται ήδη σε αυτόν) αφού και στις 3 επαναληπτικές προσομοιώσεις δεν παρουσιάστηκε καμμία ουρά εκεί. Παρόλ' αυτά η παραγωγικότητα του συστήματος αυξήθηκε ελάχιστα , στα 101.67 οχήματα , πράγμα που αποδεικνύει ότι για τη συγκεκριμένη ροή εισόδου οχημάτων (η οποία έχει οριστεί από τον κριτή/supervisor) δεν χρειάζεται επιπλέον χώρος στάθμευσης. Είναι λογικό να παρατηρούσαμε μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της παραγωγικότητας αν η ροή εισόδου οχημάτων ήταν μεγαλύτερη.



Εικόνα 5.7.β: Σύγκριση μέσων μέγιστων ουρών αναμονής δικτύου 6ου πειράματος με αυτές του δικτύου αναφοράς

5.8 Πειραματικά Συμπεράσματα

Τα στατιστικά στοιχεία που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε από τη διεξαγωγή των έξι πειραμάτων είναι πολλά όπως επίσης και οι δυνατοί συνδιασμοί που μπορούμε να κάνουμε για να δημιουργήσουμε νέα. Το πιο πείραμα μας είναι χρήσιμο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συγκεκριμένες προδιαγραφές του κάθε παραγωγικού συστήματος, τις συνθήκες και τους στόχους που έχουμε. Ενδεικτικά , σε αυτό το σύνολο πειράμάτων η παραγωγικότητα αποδείχθηκε ένα καλό μέτρο σύγκρισης για να έχουμε μια γενική εικόνα σε πραγματικές συνθήκες:

1) Αριθμός εργαλείων (1→2)

   Π.χ. Μέση παραγωγικότητα 100→102

2) Αριθμός εργατών (5→2)

   Π.χ. Μέση παραγωγικότητα 100→77

3) Αριθμός αποβαθρών (3→7)

   Π.χ. Μέση παραγωγικότητα 100→100

4) Κούραση εργατών (μικρή→μεγάλη)

   Π.χ. Μέση παραγωγικότητα 100→60

5) Εξειδίκευση εργατών (μικρή→μεγάλη)

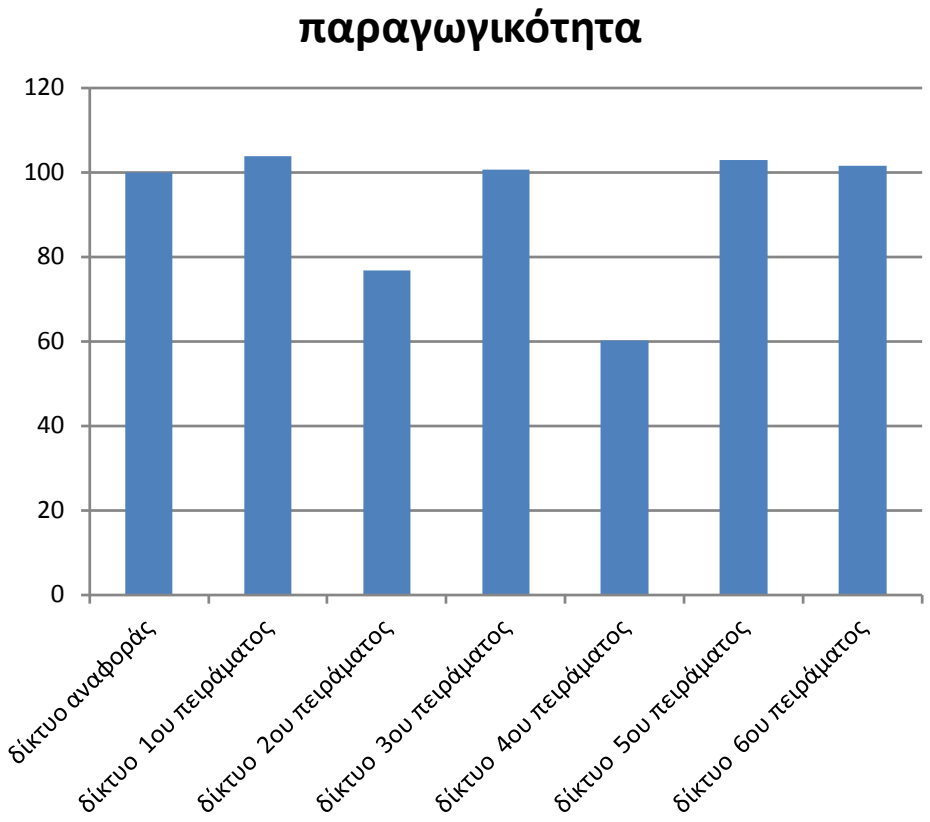
   Π.χ. Μέση παραγωγικότητα 100→103

6) Αριθμός χώρων parking (1→4)

   Π.χ. Μέση παραγωγικότητα 100→101

Παρατηρούμε γενικά μεγάλη εξάρτηση της παραγωγικότητας από τον αριθμό και την κατάσταση των εργατών και άρα από τα λάθη που αυτοί κάνουν. Αντίθετα παρατηρούμε μικρή ή και μηδενική εξάρτηση της παραγωγικότητας από

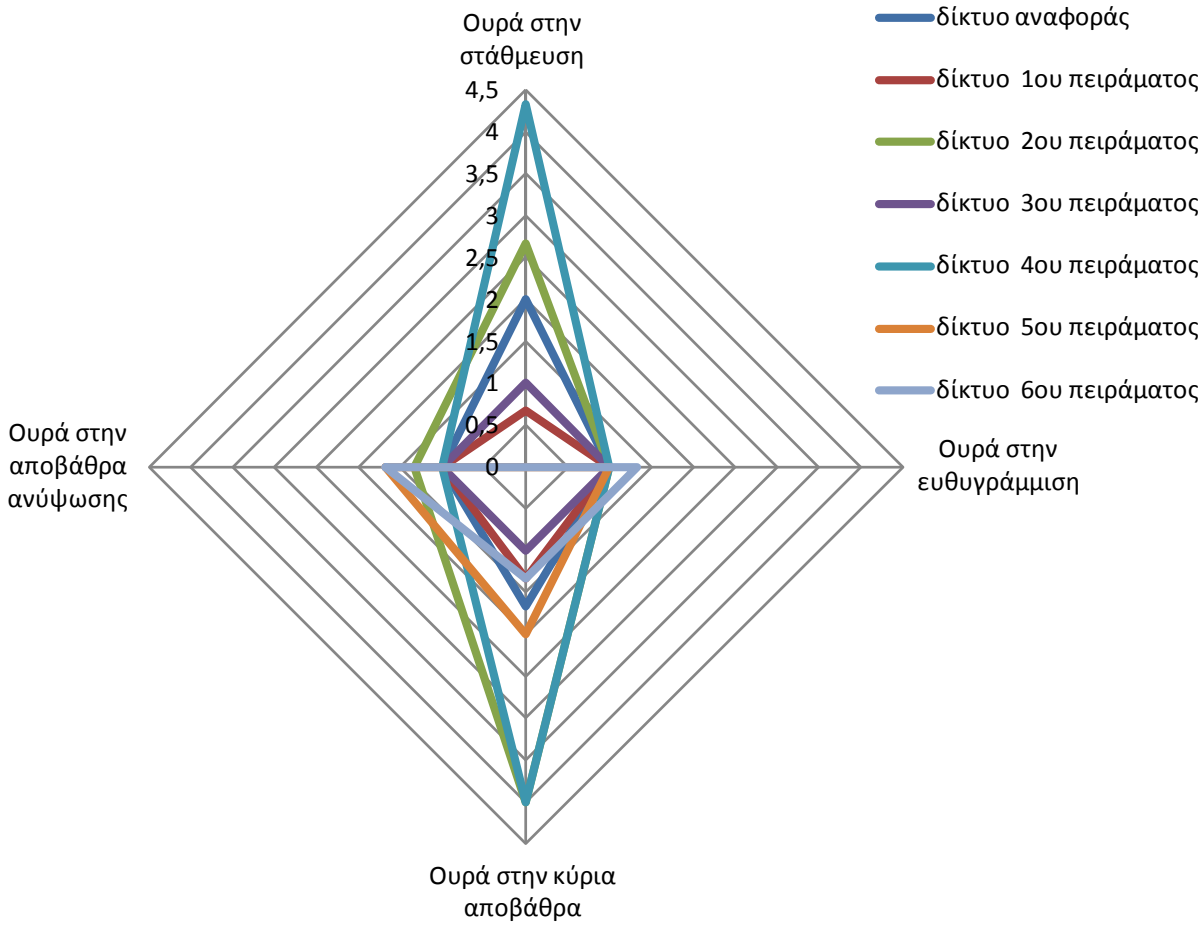
άλλους παράγοντες που θα περιμέναμε να είχαν μεγαλύτερη επίδραση όπως ο εξοπλισμός του συνεργείου (εργαλεία,parking,αποβάθρες). Τα λάθη λοιπόν που κάνουν οι εργάτες όταν ο φόρτος τους είναι υψηλός (και επομένως η κούρασή τους μεγάλη) επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την παραγωγικότητα.



Εικόνα 5.8.α: Σύγκριση μέσης παραγωγικότητας των δικτύων όλων των πειραμάτων με αυτήν του δικτύου αναφοράς

Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουμε αν αναλύσουμε τα αποτελέσματα των συνολικών και επιμέρους ουρών αναμονής καθώς και του χρόνου παραμονής των οχημάτων στο συνεργείο. Συγκεκριμένα , διαπιστώσαμε ότι η μείωση του εξοπλισμού οδηγεί σε αύξηση των ουρών αναμονής στις περιοχές που αυτός χρειάζεται καθώς και ότι ο αριθμός , η εξειδίκευση και ο φόρτος εργασίας του ανθρώπινου δυναμικού επηρεάζουν τις ουρές αναμονής όλου του συστήματος , κάτι που ήταν αναμενόμενο καθώς το ανθρώπινο δυναμικό συμμετέχει σε όλες τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στο συνεργείο.

Όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα 5.8.β το δίκτυο του 4ου πειράματος ήταν αυτό με τη χειρότερη επίδοση στον τομέα των ουρών ακολουθούμενο από το δίκτυο του 2ου πειράματος , κάτι που αντικατοπτρίστηκε και στην παραγωγικότητα των δικτύων αυτών όπως είδαμε στην εικόνα 5.8.α.



Εικόνα 5.8.β: Σύγκριση μέσων μέγιστων ουρών αναμονής των δικτύων όλων των πειραμάτων με αυτήν του δικτύου αναφοράς

Τέλος, διαπιστώσαμε κάποιες προσθήκες στον εξοπλισμό του συνεργείου ή την εξειδίκευση του προσωπικού οι οποίες θα ήταν λιγότερο χρήσιμες απ'ότι θα περιμέναμε (επιπλέον αποβάθρες ή χώροι στάθμευσης) καθώς η επίδρασή τους στην παραγωγικότητα και τις επιμέρους ή συνολικές ουρές αναμονής ήταν μεν θετική αλλά όχι αρκετά σημαντική έτσι ώστε να δικαιολογεί το κόστος της απόκτησής τους.

6. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με τη μοντελοποίηση και προσομοίωση των εργασιών που γίνονται σε ένα συνεργείο συντήρησης αυτοκινήτων με τη μέθοδο των Δικτύων Petri. Συγκεκριμένα, το μοντέλο που αναπτύχθηκε παρέχει την δυνατότητα ανάλυσης των ουρών αναμονής αυτοκινήτων τόσο κατά την άφιξή τους όσο και στα ενδιάμεσα στάδια παροχής των υπηρεσιών συντήρησης στους διάφορους σταθμούς εργασίας. Ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης των διαδικασιών του συνεργείου περιλαμβάνουν μεταβλητές όπως χρόνος αναμονής, χρόνος εξυπηρέτησης, αριθμός εξυπηρετούμενων πελατών ανά ώρα κλπ. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ασφάλεια των εργασιών του συνεργείου και τα ανθρώπινα λάθη τα οποία μπορούν να συμβούν.

Στην παρούσα διατριβή ασχοληθήκαμε ιδιαίτερα με τη μοντελοποίηση των παραγόντων εμφάνισης των ανθρωπίνων λαθών, αναλύσαμε τις επιπτώσεις τους και προσπαθήσαμε να βρούμε μεθόδους για να ελαχιστοποιήσουμε τις συνέπειές τους. Αντί να προσδιορίσουμε την πιθανότητα εμφάνισης των ανθρωπίνων σφαλμάτων, αφήσαμε το μοντέλο μας να τα εμφανίσει μέσω της μοντελοποίησης των παραγόντων που τα προκαλούν. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν έξι πειράματα για τον έλεγχο διάφορων ανεξάρτητων μεταβλητών όπως αριθμός εργατών και εργαλείων, εξειδίκευση εργατών και διαθεσιμότητα, καθώς και αριθμός ή τύπος λάθών που μπορεί να έχουν κρίσιμες συνέπειες στην ασφάλεια και απόδοση των εργασιών του συνεργείου.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παραθέσαμε καθίσταται σαφές ότι ο παραπάνω μηχανισμός εντοπισμού ανθρωπίνων λαθών είναι απαραίτητος και σημαντικός για τη διαδικασία παραγωγής. Ο μηχανισμός αυτός, όχι μόνο ανιχνεύει τα λάθη κατά τη στιγμή εμφάνισης τους, αλλά επιπλέον ενεργοποιεί ένα πλήθος αναδράσεων για την αντιμετώπιση τους. Συμπερασματικά, από την προηγούμενη προσομοίωση μπορούμε να κατανοήσουμε ότι χωρίς το μηχανισμό εντοπισμού ανθρωπίνων λαθών, θα είχαμε λάβει ένα ελαττωματικό

όχημα το οποίο δεν θα γινόταν αντιληπτό. Σε μία τέτοια περίπτωση θα είχε δαπανηθεί πολύτιμος χρόνος και πόροι για την εξαρχής εσφαλμένη κατασκευή. Με τον παραπάνω μηχανισμό όμως, το ανθρώπινο σφάλμα ανιχνεύθηκε εγκαίρως και με την πυροδότηση της κατάλληλης ανάδρασης επαναλήφθηκε μόνο ένα τμήμα της διαδικασίας ώστε να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις. Έτσι στη συνέχεια η διαδικασία κύλησε ομαλά (χωρίς άλλα ανθρώπινα λάθη) και τελικά παράχθηκε μια άρτια επισκευή. Η χρήση του παραπάνω μηχανισμού κρίνεται απαραίτητη εφόσον επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε το σύστημα μας σε ένα δυναμικό περιβάλλον που ο παράγων άνθρωπος παίζει σημαντικό ρόλο.

Συμπερασματικά, από τα αποτελέσματα των επαναληπτικών προσομοιώσεων παρατηρούμε ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική η επίδραση των λαθών που εμφανίζονται εξαιτίας της κούρασης των εργατών σε σχέση με άλλους παράγοντες που επηρεάζουν ελάχιστα την παραγωγικότητα (π.χ. ο εξοπλισμός). Ένα ακόμα συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε από τις προηγούμενες προσομοιώσεις είναι το γεγονός ότι ακόμα και σε ακραία σενάρια εμφάνισης πολλών ανθρώπινων λαθών, το τελικό σύστημα συμπεριφέρεται καλύτερα από το πρώτο. Η μοντελοποίηση της όλης διαδικασίας είναι πιο ακριβής αφού χωρίς τον ποιοτικό έλεγχο το αρχικό σύστημα παράγει όχι σωστά επιδιορθωμένα οχήματα τα οποία δεν γίνονται αντιληπτά και παραδίδονται στον πελάτη.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από όλα τα παραπάνω είναι ότι επετεύχθη ο βασικός στόχος της μοντελοποίησης που αφορούσε το ρόλο και τον αντίκτυπο των ανθρωπίνων σφαλμάτων, όπως επίσης και την διαχείριση και αντιμετώπιση τους. Στόχος της εργασίας δεν ήταν να προσδιορίσει τα ανθρώπινα σφάλματα με ποσοτικό τρόπο αλλά να τα μοντελοποιήσει με λεπτομέρεια, να τα εντοπίσει έγκαιρα και να περιορίσει τον αντίκτυπο τους στην συνολική διαδικασία, με τη χρήση κατάλληλων αναδράσεων.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Μια επέκταση της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου αυτομάτου ελέγχου των ανθρωπίνων σφαλμάτων και των επιπτώσεών τους με σκοπό τη βελτιστοποίηση δεικτών απόδοσης του συστήματος όπως η παραγωγικότητα. Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης τις τιμές κάποιων μεταβλητών (όπως ο αριθμός των εργατών ή του εξοπλισμού) ή ακόμη να αλλάξει τους κανόνες που καθορίζουν ποιος εργάτης μπορεί να εκτελέσει ποια εργασία και ποιο είναι το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας των επισκευών. Ακόμα, θα μπορούσε να επεκταθεί το μοντέλο των ανθρωπίνων σφαλμάτων και σε άλλους τομείς όπως για παράδειγμα τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε κάθε επισκευή ή ακόμα να γίνει πιο πολυεπίπεδο το σύστημα επαναφοράς των οχημάτων σε περίπτωση σφάλματος.

7. Παραρτήματα

Π.7.1 1ο πείραμα

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
K ενεργοποιητής (count_iid)	3.33	1.95	2.87	6.62	1.15	2	4
K μέγιστο (max_iid)	0.67	0.97	1.43	3.31	0.58	0	1
K ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
K μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
K ενεργοποιητής (count_iid)	130.00	18.99	27.99	64.58	11.27	123	143
K μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
K ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
K μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.001	0.001	0.003	0.0006	0.002	0.003

Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	235.33	29.51	43.48	100.29	17.5	218	253
Κ μέγιστο (max_iid)	1.33	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	115.67	27.04	39.85	91.92	16.04	99	131
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	106.00	1.69	2.48	5.73	1.00	105	107
Κ μέγιστο (max_iid)	104.00	1.69	2.48	5.73	1.00	103	105
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	49.36	1.80	2.66	6.13	1.07	48.66	50.59

Εικόνα 7.1: Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 1ου πειράματος

Π.7.2 2ο πείραμα

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	393.33	101.45	149.5	344.83	60.18	324	432
Κ μέγιστο (max_iid)	2.67	0.97	1.43	3.31	0.58	2	3
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	330.33	93.7	138.08	318.49	55.58	267	371
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.004	0.004	0.006	0.013	0.002	0.001	0.006
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	334.33	24.85	36.62	84.48	14.74	323	351

Κ μέγιστο (max_iid)	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4	4
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	1.28	0.22	0.32	0.74	0.13	1.14	1.39
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	327.67	55.64	81.99	189.13	33.01	295	361
Κ μέγιστο (max_iid)	1.33	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.002	0.003	0.006	0.001	0.0005	0.003
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	79.00	4.46	6.57	15.16	2.65	76	81
Κ μέγιστο (max_iid)	77.00	4.46	6.57	15.16	2.65	74	79
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	42.74	2.75	4.05	9.33	1.63	41.03	44.28

Εικόνα 7.2 : Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 2ου πειράματος

Π.7.3 3ο πείραμα

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	6.00	3.37	4.97	11.46	2.00	4	8
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	124.67	41.17	60.67	139.93	24.42	105	152
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.003	0.004	0.01	0.002	0.0006	0.004
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής	241.67	38.9	57.32	132.2	23.07	225	268

(count_iid)							
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.01	0.005	0.007	0.02	0.003	0.001	0.01
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	146.00	48.25	71.1	163.99	28.62	113	164
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.004	0.006	0.009	0.02	0.003	0.0001	0.008
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	102.67	4.24	6.25	14.42	2.52	100	105
Κ μέγιστο (max_iid)	100.67	4.24	6.25	14.42	2.52	98	103
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	48.03	1.4	2.06	4.75	0.83	47.39	48.96

Εικόνα 7.3 : Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 3^{ου} πειράματος

Π.7.4 4ο πείραμα

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	1894.33	146.14	215.36	496.72	86.69	1821	1990
Κ μέγιστο (max_iid)	4.33	0.97	1.43	3.31	0.58	4	5
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	1058.33	36.8	54.22	125.06	21.83	1039	1082
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.002	0.003	0.008	0.001	0.00	0.002
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	1019.00	70.46	103.84	239.5	41.8	986	1066

Κ μέγιστο (max_iid)	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4	4
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	2.68	0.12	0.17	0.4	0.07	2.6	2.73
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	1074.33	117	172.41	397.67	69.4	1027	1154
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	62.33	7.6	11.2	25.84	4.51	58	67
Κ μέγιστο (max_iid)	60.33	7.6	11.2	25.84	4.51	56	65
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	31.32	3	4.42	10.2	1.78	29.91	33.32

Εικόνα 7.4 : Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 4^{ου} πειράματος

Π.7.5 5ο πείραμα

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	2
Κ μέγιστο (max_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	121.33	22.45	33.08	76.31	13.32	110	136
Κ μέγιστο (max_iid)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	1
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.004	0.006	0.01	0.002	0.00	0.004
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	275.33	44.9	66.17	152.61	26.63	258	306

Κ μέγιστο (max_iid)	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	130.67	42.7	62.91	145.11	25.32	102	150
Κ μέγιστο (max_iid)	1.67	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	105.00	7.35	10.83	24.98	4.36	100	108
Κ μέγιστο (max_iid)	103.00	7.35	10.83	24.98	4.36	98	106
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	48.05	1.43	2.11	4.86	0.85	47.39	49.01

Εικόνα 7.5 : Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 5^{ου} πειράματος

Π.7.6 6ο πείραμα

Αποτελέσματα							
Όνομα μεταβλητής	Μέση τιμή (Avrg)	Διαστήματα εμπιστοσύνης			Τυπική απόκλιση (StD)	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)
		90% Half Length	95% Half Length	99% Half Length			
Ουρά στην στάθμευση (List_length_dc_Parking'Parking_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	2
Κ μέγιστο (max_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην ευθυγράμμιση (List_length_dc_Parking'WaitAlign_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	106.67	13.63	20.08	46.32	8.08	98	114
Κ μέγιστο (max_iid)	1.333	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.002	0.001	0.002	0.005	0.0009	0.002	0.003
Ουρά στην κύρια αποβάθρα (List_length_dc_Parking'WaitBay_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	270.00	16.08	23.7	54.66	9.54	260	279

Κ μέγιστο (max_iid)	1.33	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ουρά στην αποβάθρα ανύψωσης (List_length_dc_Parking'WaitLift_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	121.33	32.75	48.26	111.31	19.43	100	138
Κ μέγιστο (max_iid)	1.67	0.97	1.43	3.31	0.58	1	2
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	0.0002	0.0005	0.0007	0.002	0.0003	0.00	0.0005
Πλήθος οχημάτων που έχουν εξυπηρετηθεί (Marking_size_Top'Ready_for__Customer_1)							
Κ ενεργοποιητής (count_iid)	103.67	3.9	5.74	13.23	2.31	101	105
Κ μέγιστο (max_iid)	101.67	3.9	5.74	13.23	2.31	99	103
Κ ελάχιστο (min_iid)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
Κ μέση τιμή (avrg_iid)	48.34	1.52	2.24	5.18	0.9	47.42	49.23

Εικόνα 7.6 : Αναφορά προσομοίωσης τελικού δικτύου 6^{ου} πειράματος

8. Βιβλιογραφία

[1] Diimitrios Georgakopoulos,Mark Hornick1 and Amit Sheth, An overview of workflow management: From process modeling to workflow automation infrastructure, Springer, 2005.

[2] K. Salimifard and M. Wright, "Petri net-based modeling of workflow systems: An overview," European Journal of Operational Research, vol. 134, pp. 664–676, 2001.

[3] W.M.P. van der Aalst , The Application of Petri Nets to Workflow Management , Eindhoven, Springer, 1997.

[4] Marca, D. A. and McGowan, C. L. 1987 SADT: Structured Analysis and Design Technique. McGraw-Hill, Inc.

[5] Bosil, J., Giaglis, G., & Hlupic, V., IDEF diagrams and petri nets for business process modeling. Kluwer Academic Publ, 2001

[6] K. Jensen. *Coloured Petri Nets. Basics Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Springer, 1992.

[7] CPN Tools help pages (http://wiki.daimi.au.dk/cpntools-help/cpntools-help.wiki)

[8] Anne Vinter Ratzer, Lisa Wells, Henry Michael Lassen, Mads Laursen, Frank Qvortrup, Martin Stig Stissing, Michael Westergaard, Søren Christensen, Kurt Jensen. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets. Springer, Vol. 2679, 2003.

[9] Lisa Wells, Henry Michael Lassen, Kristian Bisgaard Lassen, Mads Laursen, Henrik Thuesen, Michael Westergaard, Søren Christensen, Kurt Jensen. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets – Version 1.0 and Beyond.

[10] Kurt Jensen, Lars Michael Kristensen and Lisa Wells. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems. International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT), Springer, Volume 9, pp. 213-254, 2007.

[11] A. M. Law and W. D. Kelton. Simulation Modeling & Analysis. McGraw-Hill, 3rd edition, 2000.

[12] L. M. Kristensen, J. B. Jørgensen, and K. Jensen. Application of Coloured Petri Nets in System Development.In Lectures on Concurrency and Petri Nets - Advances in Petri Nets. Proc. of 4th Advanced Course on Petri Nets, volume 3098 of Lecture Notes in Computer Science, pp 626–685. Springer-Verlag, 2004.

[13] K. Jensen. Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Volume 1: Basic Concepts. Springer-Verlag, 1992.

[14] Examples of Industrial Use of CP-nets. www.daimi.au.dk/CPnets/intro/example indu.html.