

ΔΙΠ
1092

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΛΗΨΗΣ»**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Θ.ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΗΛΙΑΣ ΚΟΣΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ (επιβλέπων)

ΜΑΡΚΟΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΥΓΔΑΛΑΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Χανιά
Οκτώβριος 2002

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Εισαγωγή.....	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αισθητήρες για δρόμους κυκλοφορίας.....	12
2.1 Υπερηχητικό φαινόμενο Doppler-μοντέλο ανιχνευτή (Ultrasonic Doppler)	12
2.1.1 Αρχή λειτουργίας.....	12
2.2 Φωρατές επαγωγικού βρόγχου.....	13
2.2.1 Γενικά.....	13
2.2.2 Προδιαγραφές φωρατών σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Κοινότητα.....	14
2.2.2.1 Τρόποι λειτουργίας.....	14
2.2.2.2 Μετρήσεις φωρατών.....	15
2.3 Αισθητήρες εικόνας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μικροσκοπικά μοντέλα.....	17
3.1 Απλά γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα.....	18
3.1.1 Απλό Γραμμικό Μικροσκοπικό Μοντέλο.....	19
3.1.2 Μη γραμμικά μοντέλα κυκλοφοριακής ροής.....	19
3.2 Άλλα μικροσκοπικά μοντέλα.....	21
3.2.1 Μοντέλο τριών οχημάτων.....	21
3.2.2 Μοντέλο του Helly.....	21
3.2.3 Μη συμμετρικά μοντέλα.....	21
3.2.4 Μοντέλο του Gipps.....	22
3.2.5 Μοντέλο των Nagel-Schreckenberg.....	22
3.3 Μοντέλα βασιζόμενα στη θεωρία βέλτιστου ελέγχου.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση μοντέλου προσομοίωσης.....	26
4.1 Επιλογή μικροσκοπικού μοντέλου.....	26
4.2 Μοντέλο (3.6).....	28
4.2.1 Επιλογή παραμέτρων.....	29
4.2.2.2 Καλύτερες Παράμετροι Σχεδιασμού (με βάση τις προϋποθέσεις της παραγράφου 4.1).....	29
4.3 2 ^ο Μοντέλο (απλοποιημένο Helly).....	29
4.4 Επιλογή μοντέλου.....	30
4.4.1 Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης.....	30
4.4.2 Περιγραφή αλγορίθμου.....	31
4.4.2.1 Αρχικοποίηση- καθορισμός παραμέτρων.....	31
4.4.2.2 Παράμετροι μοντέλου.....	33
4.4.2.3 Περιγραφή υποσυστημάτων /Ανάλυση κώδικα.....	35
4.4.3 Επαλήθευση του μοντέλου.....	40
4.4.3.1 Περίπτωση ένδειξης κόκκινου από το φωτεινό σηματοδότη.....	41
4.4.3.2 Περίπτωση διαφορετικής ένδειξης του φωτεινού σηματοδότη.....	43
4.4.3.3 Περίπτωση εμφάνισης ουράς.....	45
4.4.3.4 Περίπτωση εμφάνισης ουράς στο τέλος του συνδέσμου.....	47
4.4.3.5 Παρουσίαση της θέσης των οχημάτων καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.....	49
4.4.3.5.1 Θέση φωτεινού σηματοδότη στα 1200 μέτρα.....	49
4.4.3.5.2 Θέση φωτεινού σηματοδότη στα 1400 μέτρα.....	50
4.4.3.5.3 Θέση φωτεινού σηματοδότη στα 1600 μέτρα.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υπολογισμός χωρικής κατάληψης (Space Occurancy) και χρονικής κατάληψης (Time Occurancy).....	53

5.1 Εκτίμηση του αριθμού των οχημάτων μέσα σε links (συνδέσμους).....53

5.2 Μέθοδος υπολογισμού χωρικής και χρονικής κατάληψης54

5.3 Επίδραση του χρόνου πρασίνου.....55

5.4 Αναζήτηση ενός απλού μοντέλου59

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1	Σχεδιάγραμμα ενός σύγχρονου συστήματος ΣΕΑΚ	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 1.2	Ταξινόμηση ΣΕΑΚ με βάση τη θέση του φωρατή	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 2.1	Φαινόμενο Ultrasonic Doppler	13
Σχήμα 2.2	Βασική αρχή λειτουργίας επαγωγικού βρόγχου	14
Σχήμα 3.1	Απεικόνιση ενός απλού γραμμικού μοντέλου	18
Σχήμα 3.2	Το μοντέλο οπτικής γωνίας	20
Σχήμα 4.1	Επιρροή μη γραμμικών παραμέτρων	27
Σχήμα 4.2	Επιρροή συχνής εφαρμογής μη γραμμικών περιορισμών στην ταχύτητα	28
Σχήμα 4.3	Αναπαράσταση λειτουργίας του μοντέλου	31
Σχήμα 4.4	Τιμές παραμέτρων	41
Σχήμα 4.5	Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1150-1170 seconds	42
Σχήμα 4.6	Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1150-1170 seconds	42
Σχήμα 4.7	Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1150-1170 seconds	43
Σχήμα 4.8	Τιμές παραμέτρων	43
Σχήμα 4.9	Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1340-1380 seconds	44
Σχήμα 4.10	Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1340-1380 seconds	44
Σχήμα 4.11	Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1340-1380 seconds	45
Σχήμα 4.12	Τιμές παραμέτρων	45
Σχήμα 4.13	Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 73-110 seconds	46
Σχήμα 4.14	Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 73-110 seconds	46
Σχήμα 4.15	Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 73-110 seconds	47
Σχήμα 4.16	Τιμές παραμέτρων	47
Σχήμα 4.17	Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 555-595 seconds	48
Σχήμα 4.18	Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 555-595 seconds	48
Σχήμα 4.19	Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 555-595 seconds	49
Σχήμα 4.20	Τιμές των παραμέτρων	49
Σχήμα 4.21	Θέση οχημάτων	50
Σχήμα 4.22	Τιμές των παραμέτρων	50
Σχήμα 4.23	Θέση οχημάτων	51
Σχήμα 4.24	Τιμές των παραμέτρων	51
Σχήμα 4.25	Θέση οχημάτων	52
Σχήμα 5.1	Είδη κατάληψης	53
Σχήμα 5.2		54
Σχήμα 5.3	Θέση φωρατή	54
Σχήμα 5.4	Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου	56
Σχήμα 5.5	Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου	56
Σχήμα 5.6	Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου	57
Σχήμα 5.7	Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου	57
Σχήμα 5.8	Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου	58
Σχήμα 5.9	Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου	58
Σχήμα 5.10	Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 10% του length του link	60
Σχήμα 5.11	Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 20% του length του link	60

- Σχήμα 5.12** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 30% του length του link 61
- Σχήμα 5.13** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 40% του length του link 61
- Σχήμα 5.14** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 50% του length του link. 62
- Σχήμα 5.15** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 60% του length του link. 62
- Σχήμα 5.16** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 70% του length του link 63
- Σχήμα 5.17** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 80% του length του link 63
- Σχήμα 5.18** Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 90% του length του link 64
- Σχήμα 5.19** Περίπτωση δημιουργίας ουράς στο φωρατή 65

Περίληψη

Η ανάγκη να ελέγχονται κεντρικά, και σε πραγματικό χρόνο οι φωτεινοί σηματοδότες ενός αστικού κυκλοφοριακού δικτύου, οδήγησε στην ανάπτυξη των σύγχρονων Συστημάτων Ελέγχου Αστικής Κυκλοφορίας (ΣΕΑΚ). Η πλειοψηφία των σύγχρονων ΣΕΑΚ χρησιμοποιούν φωρατές (τοποθετημένους σε διαφορετικά σημεία του συνδέσμου) για την εκτίμηση των κυκλοφοριακών συνθηκών (αριθμός αυτοκινήτων εντός του συνδέσμου). Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της σχέσης ανάμεσα στις μετρήσεις των φωρατών (χρονική κατάληψη) και του πραγματικού αριθμού οχημάτων εντός του συνδέσμου (χωρική κατάληψη).

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα αξιόπιστο μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης που υπολογίζει τις μετρήσεις του φωρατή σε σχέση με τον αριθμό των οχημάτων στο σύνδεσμο του αστικού κυκλοφοριακού δικτύου που εξετάζεται.

Πιο συγκεκριμένα, το μικροσκοπικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της χωρικής και χρονικής κατάληψης από φωρατές επαγωγικού βρόγχου, σε μια λεωφόρο μονής λωρίδας κατεύθυνσης που αποτελείται από τρεις φωτεινούς σηματοδότες. Συλλέγοντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης, όπως του διαφορετικού αριθμού οχημάτων που εισέρχονται στη λεωφόρο, των διαφορετικών τιμών πρασίνου των φωτεινών σηματοδοτών, τις διαφορετικές αποστάσεις των συνδέσμων των φωτεινών σηματοδοτών και τις διαφορετικές θέσεις του φωρατή, υπολογίζουμε τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση /επιβράδυνση των οχημάτων, καθώς επίσης τη σχέση μεταξύ χρονικής και χωρικής κατάληψης. Βάση των αποτελεσμάτων αυτών καταλήγουμε σε συμπεράσματα για τη σχέση μεταξύ χρονικής και χωρικής κατάληψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Εισαγωγή

Καθημερινά η εμπειρία των πεζών, των οδηγών μοτοσικλετών, των οδηγών αυτοκινήτων και των επιβατών δείχνει, ότι οι συνθήκες που επικρατούν στους δρόμους κυκλοφορίας ποικίλουν πολύ όσον αφορά το χρόνο μετακίνησης για την ίδια διαδρομή. Αντιλαμβανόμενοι ότι οι τιμές της διάρκειας πρασίνου, της χρονικής μετατόπισης, και του χρονικού κύκλου ασκούν μεγάλη επιρροή στις συνθήκες κυκλοφορίας, εταιρείες, ερευνητικές ομάδες και ιδρύματα έχουν αναπτύξει συστήματα και αλγορίθμους για διάρκειες πρασίνου, χρονικών μετατοπίσεων και χρονικών κύκλων με σκοπό να βελτιώσουν τις συνθήκες κυκλοφορίας.

Στην απλούστερη περίπτωση, ένας απομονωμένος τοπικός ρυθμιστής είναι αρμόδιος να ελέγχει έναν ή περισσότερους κόμβους, και να συνδέεται με τους φωτεινούς σηματοδότες των κόμβων αυτών ρυθμίζοντας έτσι το χρόνο πρασίνου. Ο τοπικός αυτός ρυθμιστής είναι υπεύθυνος να ελέγχει τη διάρκεια πρασίνου των φωτεινών σηματοδοτών, τη διάρκεια του χρονικού κύκλου και τις χρονικές μετατοπίσεις των σχετικών κόμβων. Κάθε ρυθμιστής είναι εφοδιασμένος με κατάλληλους επεξεργαστές και προγραμματιστικές ικανότητες, ώστε να είναι δυνατό για τους χειριστές να προγραμματίζουν τις ενέργειες του ρυθμιστή και να εκτελούν αλγορίθμους ελέγχου κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας το λογισμικό /εξοπλισμό του ρυθμιστή. Ιστορικές κυκλοφοριακές μετρήσεις και στατιστικές μέθοδοι πρόβλεψης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κατάλληλους ελέγχους και αλγορίθμους βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό των ενεργειών του ρυθμιστή (για παράδειγμα, για τον υπολογισμό των εντολών του ρυθμιστή για τη διάρκεια του χρόνου πρασίνου, των offset και των χρονικών κύκλων) για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Έτσι διαφορετικά προγράμματα σηματοδότησης ενεργοποιούνται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (για παράδειγμα, διαφορετικές ώρες της ημέρας) ανάλογα με την πρόβλεψη των κυκλοφοριακών συνθηκών για αυτές τις χρονικές περιόδους. Τα προγράμματα αυτά σηματοδότησης δεν λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες, αποκαλούνται προγράμματα σταθερής σηματοδότησης (fixed-time plans). Αυτή είναι η απλούστερη μορφή ελέγχου κυκλοφορίας έχει εφαρμοστεί σε πολλές σύγχρονες πόλεις από τις αρχές του 1970.

Φυσικά, η επίδραση στην κυκλοφορία του ελέγχου σταθερής σηματοδότησης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Σε περιπτώσεις όπου οι πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες διαφέρουν σημαντικά από αυτές που υποθέτει το πρόγραμμα σταθερής σηματοδότησης τέτοιου είδους συστήματα είναι πιθανό να χειροτερέψουν παρά να βελτιώσουν τις συνθήκες κυκλοφορίας.

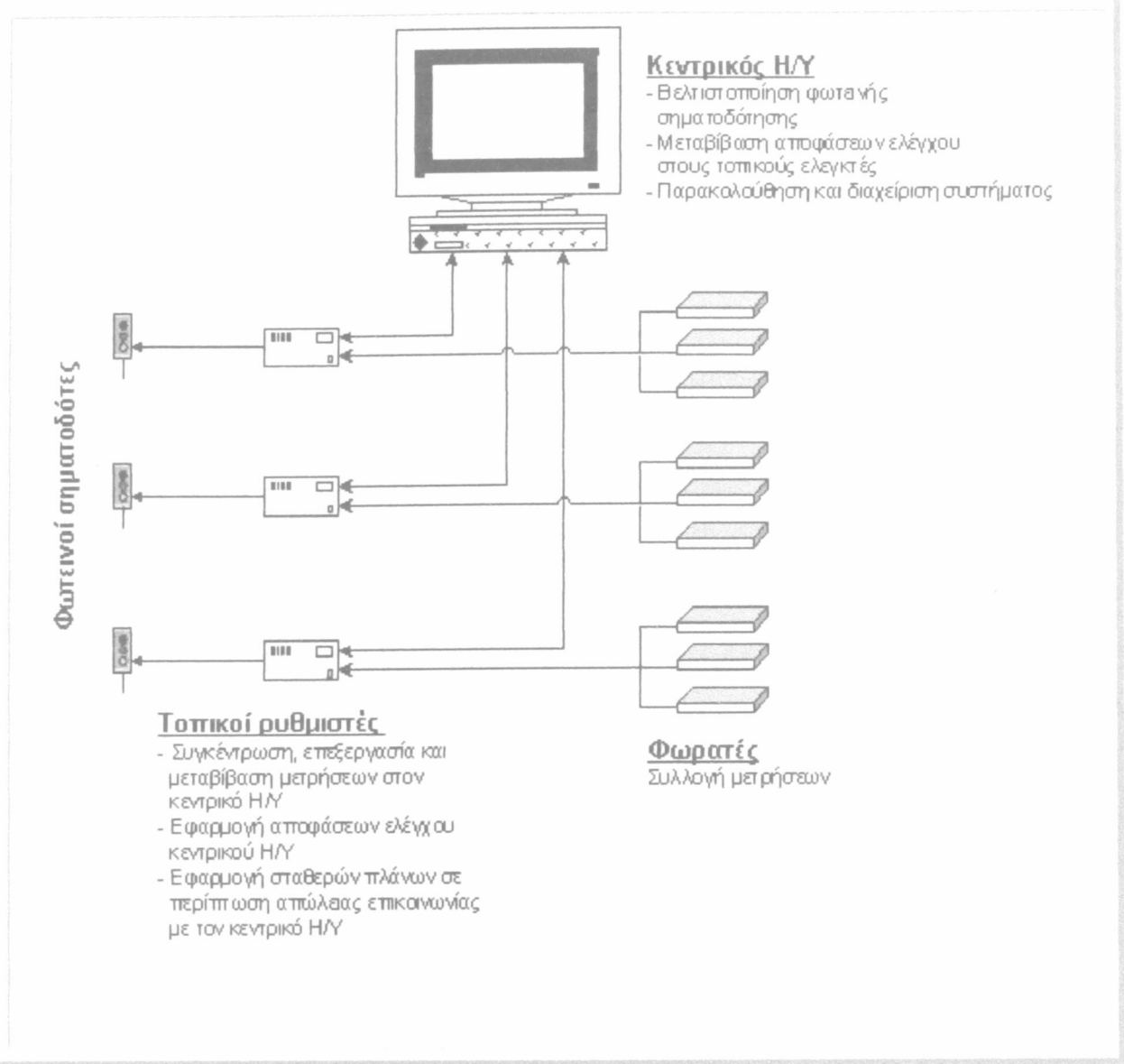
Η διαπίστωση αυτή οδήγησε τους σχεδιαστές συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης σε μία δεύτερη-γενιά συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας, στα επονομαζόμενα συστήματα κυκλοφορίας με απόκριση (traffic-responsive systems). Στα συστήματα αυτά, αισθητήρες δρόμου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο πληροφοριών όσον αφορά τις συνθήκες κυκλοφορίας. Η πλειοψηφία τέτοιων συστημάτων χρησιμοποιούν μαγνητικούς φωρατές επαγωγικού βρόγχου, οι οποίοι, είναι τοποθετημένοι κάτω από το έδαφος και ανιχνεύουν τη

διέλευση ενός οχήματος. Η λειτουργία των μαγνητικών φωρατών επαγωγικού βρόγχου βασίζεται στο γεγονός ότι η μαγνητική επαγωγή του βρόγχου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια που ένα όχημα περνά πάνω από τον φωρατή. Η πληροφορία αυτή, όσον αφορά τη διέλευση ενός οχήματος εκπέμπεται στον κόμβο που βρίσκεται ο τοπικός ελεγκτής. Με αυτόν τον τρόπο ο τοπικός ελεγκτής έχει πληροφορία σε πραγματικό χρόνο όσον αφορά τις συνθήκες κυκλοφορίας που επικρατούν στα τμήματα του δρόμου. Στην απλούστερη περίπτωση, οι μετρήσεις των φωρατών χρησιμοποιούνται για να παραταθεί η διάρκεια πρασίνου συγκεκριμένων φωτεινών σηματοδοτών όταν παρατηρείται υψηλή κυκλοφορία στα συγκεκριμένα τμήματα του δρόμου.

Η ανάγκη να ελέγχονται κεντρικά όλοι οι τοπικοί ρυθμιστές και οι φωτεινοί σηματοδότες ενός αστικού κυκλοφοριακού δικτύου, όπως επίσης και το γεγονός ότι οι συνθήκες κυκλοφορίας σε ένα συγκεκριμένο κόμβο εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες κυκλοφορίας και τις εντολές ελέγχου σε έναν γειτονικό κόμβο, οδήγησε στην ανάπτυξη των σύγχρονων Συστημάτων Ελέγχου Απόκρισης Αστικής Κυκλοφορίας (ΣΕΑΚ-Urban Traffic Control). Στα συστήματα αυτά, η πληροφορία της κυκλοφορίας συλλέγεται από τους φωρατές επαγωγικού βρόγχου και η κατάσταση των φωτεινών σηματοδοτών και των τοπικών ρυθμιστών εκπέμπεται σε έναν κεντρικό ελεγκτή κυκλοφορίας. Ο κεντρικός αυτός ελεγκτής είναι υπεύθυνος όχι μόνο για την παρακολούθηση των φωρατών, των φωτεινών σηματοδοτών και των τοπικών ρυθμιστών, αλλά στέλνει επίσης κατάλληλες εντολές ελέγχου στους τοπικούς ρυθμιστές για να αναλυθούν με τον πιο κατάλληλο τρόπο οι συνθήκες κυκλοφορίας σε όλο το οδικό δίκτυο ή στα διάφορα τμήματά του. Διάφορες μεθοδολογίες ελέγχου όπως οι SCOOT, SCATS, PAC, PRODYN, CRONOS, COP, TUC, κτλ, έχουν βρει εφαρμογές από τις αρχές της δεκαετίας του '80. Οι περισσότερες από τις μεθοδολογίες αυτές είναι αποκεντρωμένες ή ιεραρχικές, εννοώντας ότι οι περισσότερες από τις αποφάσεις ελέγχου λαμβάνονται τοπικά σε επίπεδο κόμβου, ενώ ο κεντρικός ελεγκτής κυκλοφορίας έχει μόνο το ρόλο της παρακολούθησης ή είναι απλά υπεύθυνος να αλλάζει περιοδικά (για παράδειγμα κάθε μέρα ή κάθε εβδομάδα) και όχι σε πραγματικό χρόνο τις παραμέτρους του προγράμματος σηματοδότησης, (για παράδειγμα, παραμέτρους που οφείλονται σε διαχρονικά δεδομένα) σε αλγορίθμους που ο τοπικός ελεγκτής χρησιμοποιεί.

Η πλειοψηφία των σύγχρονων ΣΕΑΚ χρησιμοποιούν φωρατές (τοποθετημένους σε διαφορετικά σημεία του συνδέσμου) για την εκτίμηση των κυκλοφοριακών συνθηκών (αριθμός αυτοκινήτων εντός του συνδέσμου). Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της σχέσης ανάμεσα στις μετρήσεις των φωρατών (χρονική κατάληψη) και του πραγματικού αριθμού οχημάτων εντός του συνδέσμου (χωρική κατάληψη)

Παρακάτω στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα ενός σύγχρονου ΣΕΑΚ συστήματος:



Σχήμα 1.1 Σχεδιάγραμμα ενός σύγχρονου συστήματος ΣΕΑΚ

Η ταξινόμηση των συστημάτων ΣΕΑΚ με βάση τη θέση του φωρατή παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Σύστημα	Θέση Συσκευών μέτρησης
TUC	Τυχαία (προτιμητέο το ανάντη ήμισυ της οδού)
OPAC	Ανάντη άκρο οδού
COP	Ανάντη άκρο οδού
PRODYN	Ανάντη άκρο οδού
SCOOT	Ανάντη άκρο οδού
SCATS	Πάνω ή ακριβώς ανάντη γραμμής STOP

TASS	<u>Στρατηγικοί φωρατές</u> Ανάντη ήμισυ της οδού <u>Τοπικοί φωρατές</u> 40 μ. ανάντη γραμμής STOP
MOTION	50 και 150 μ. ανάντη γραμμής STOP
UTOPIA	Ανάντη τμήμα οδών

Σχήμα 1.2 Ταξινόμηση ΣΕΑΚ με βάση τη θέση του φωρατή

Από τον πίνακα 1.2 παρατηρούμε ότι διαφορετικά συστήματα ΣΕΑΚ χρησιμοποιούν φωρατές σε διαφορετικές θέσεις το καθένα, ώστε να υπολογίζουν τη χωρική κατάληψη του δρόμου τον οποίο εξετάζουν από τα εισερχόμενα οχήματα. Η χωρική κατάληψη βέβαια εκτιμάται από τη χρονική κατάληψη των φωρατών, δηλαδή από το ποσοστό του χρόνου που ο φωρατής είναι «απασχολημένος» σε έναν χρονικό κύκλο. Τίθεται επομένως το πρόβλημα του πώς είναι δυνατό να υπολογιστεί η χωρική κατάληψη από τις μετρήσεις των φωρατών.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα αξιόπιστο μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης που υπολογίζει τις μετρήσεις του φωρατή σε σχέση με τον αριθμό των οχημάτων στο σύνδεσμο του αστικού κυκλοφοριακού δικτύου που εξετάζεται. Εξετάζοντας τα μικροσκοπικά μοντέλα για το συγκεκριμένο πρόβλημα, καταλήξαμε αρχικά στη χρησιμοποίηση δύο εξ'αυτών, του μη γραμμικού μοντέλου κυκλοφοριακής ροής που προτάθηκε από τον Pipes και αποτελεί ένα από τα πιο γενικά και δημοφιλή μοντέλα, και του απλοποιημένου μοντέλου του Helly.

Από τα δύο αυτά μοντέλα καταλήξαμε τελικά στη χρησιμοποίηση της απλοποιημένης μορφής του μοντέλου του Helly, διότι αν και τα δύο μοντέλα δίνουν τα ίδια περίπου αποτελέσματα, το μοντέλο του Helly είναι υπολογιστικά πιο «γρήγορο», και αριθμητικά πιο ευσταθές, πληρεί δηλαδή τις προϋποθέσεις για το πρόβλημα που εξετάζουμε.

Το μοντέλο προσομοίωσης που παρουσιάζεται παρακάτω αναφέρεται σε μια λεωφόρο μονής λωρίδας κατεύθυνσης που αποτελείται από τρεις φωτεινούς σηματοδότες. Το μήκος της λεωφόρου είναι σταθερό, όπως επίσης η θέση του πρώτου φωτεινού σηματοδότη, ενώ η θέση του δεύτερου και του τρίτου αλλάζει ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζουμε. Η λεωφόρος χωρίζεται σε τρεις συνδέσμους. Θεωρούμε την ύπαρξη φωρατών μόνο στο 2^ο και 3^ο σύνδεσμο. Η θέση του φωρατή δεν είναι σταθερή σε κάθε σύνδεσμο. Ο φωρατής μπορεί να παίρνει εννέα δυνατές θέσεις μέσα σε αυτόν, οι οποίες βρίσκονται αντίστοιχα σε απόσταση από το φωτεινό σηματοδότη ίση με το 10%, 20%, 30%,..., 90% του μήκους του συνδέσμου. Θεωρούμε ότι ο φωρατής ανιχνεύει τη 'διέλευση' οχήματος όταν υπάρχει όχημα του οποίου το εμπροσθεν άκρο βρίσκεται σε απόλυτη απόσταση από τη θέση (σημείο) του φωρατή μικρότερη των 2 μέτρων. Ο αριθμός των οχημάτων επί της λεωφόρου είναι διαφορετικός κάθε φορά, και μάλιστα μόλις κάποιο όχημα διασχίσει όλη τη λεωφόρο θεωρούμε ότι εισέρχεται πάλι σε αυτή με κατάλληλα αρχικοποιημένες συνθήκες.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη με βάση το μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζουμε μπορούμε να εξάγουμε πολλά συμπεράσματα από τις μετρήσεις του φωρατή, όπως για παράδειγμα ότι χαμηλές τιμές χρονικής κατάληψης του φωρατή υποδηλώνουν ότι η ουρά στο σύνδεσμο βρίσκεται περίπου κατάντη της θέσης του φωρατή, ότι μεσαίες τιμές κατάληψης υποδηλώνουν ότι η ουρά στο σύνδεσμο βρίσκεται γύρω από τη θέση του φωρατή, και τέλος ότι, μεγάλες τιμές χρονικής κατάληψης υποδηλώνουν ότι η ουρά στο σύνδεσμο βρίσκεται περίπου ανάντη του ρεύματος της θέσης του φωρατή. Πιο συγκεκριμένα:

- Παρατηρείται το φαινόμενο σε διάφορες περιπτώσεις ο φωρατής να είναι κατειλημμένος για ένα μεγάλο ποσοστό του κύκλου, αλλά το τμήμα του δρόμου που εξετάζουμε να διασχίζεται από μικρό αριθμό οχημάτων
- Όταν ο φωτεινός σηματοδότης βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το φωτεινό σηματοδότη, υπάρχει μια αναλογία στις τιμές της χρονικής και της χωρικής κατάληψης.
- Όσο πιο κοντά είναι ο φωρατής στο φωτεινό σηματοδότη, τόσο πιο πολλά αυτοκίνητα περνούν από αυτόν. Όταν βρίσκεται στο μέσον του συνδέσμου, ο αριθμός των αυτοκινήτων μειώνεται, ενώ όταν απομακρύνεται περισσότερο, ο αριθμός των αυτοκινήτων μειώνεται και άλλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αισθητήρες για δρόμους κυκλοφορίας

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στους τρεις κυριότερους τύπους αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εκτίμηση κυκλοφοριακών δεδομένων σε δρόμους κυκλοφορίας: σε αισθητήρες Ultrasonic Doppler, σε επαγωγικού βρόγχου φωρατές, και σε αισθητήρες εικόνας (image sensors).

2.1 Υπερηχητικό φαινόμενο Doppler-μοντέλο ανιχνευτή (Ultrasonic Doppler)

Μια μέθοδος ανίχνευσης της ταχύτητας κινούμενων οχημάτων, είναι ο υπολογισμός της με τη χρησιμοποίηση εργαλείων που χρησιμοποιούν μικροκύματα, το οποίο όμως κρίνεται απαγορευμένο από τη νομοθεσία. Εν τούτοις, αισθητήρες που η λειτουργία τους βασίζεται στο υπερηχητικό φαινόμενο Doppler δεν θεωρούνται απαγορευμένοι από τη νομοθεσία. Επίσης, μπορούν με εύκολο και κατάλληλο τρόπο να εξελιχθούν και να αποκτήσουν ισοδύναμη ακρίβεια με αυτή των φωρατών τύπου ραντάρ. Ωστόσο, ο υπολογισμός της ταχύτητας των οχημάτων με αισθητήρα τέτοιου τύπου θεωρείται δύσκολος, διότι απαιτεί μια πολύπλοκη και δαπανηρή υλοποίηση καθώς επίσης είναι ακόμα άλυτο το πρόβλημα της επιρροής της ταχύτητας του ήχου από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Παρόλα αυτά με την εφαρμογή της μεθόδου Doppler-signal control, μια μέθοδος που αντισταθμίζει την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, και που τοποθετεί έναν υπερηχητικό ‘πομποδέκτη’, ο αισθητήρας τύπου υπερηχητικού Doppler, λειτουργεί ικανοποιητικά και δίνει αρκετά ακριβείς μετρήσεις ταχύτητας. Επίσης κρίνεται κατάλληλος και για τον υπολογισμό εκτιμήσεων καταλήψεων δρόμων και ποσοτήτων κυκλοφορίας.

2.1.1 Αρχή λειτουργίας

Η επίδραση του φαινομένου Doppler είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει τη συχνότητα ενός ήχου κύματος που αντανακλάται από ένα κινούμενο σώμα με κάποια ταχύτητα αναφορικά με το εκπέμπων σώμα. Όταν ο ήχος κύματος μιας συγκεκριμένης συχνότητας αντανακλάται από το κινούμενο σώμα προς το εκπέμπων σώμα, υπόκειται μια αλλαγή στη συχνότητα, ώστε να υπάρχει αναλογία της σχετικής ταχύτητας του πομπού και του δέκτη. Η σχετική ταχύτητα των δύο σωμάτων μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά των συχνοτήτων μεταξύ της πηγής του ήχου και του επηρεαζόμενου κύματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 μια υπερηχητική δέσμη με συχνότητα ω προβάλλεται προοδευτικά προς το κινούμενο όχημα από το εκπομπών σώμα το οποίο είναι η πηγή του ήχου, και ένα αντανακλλόμενο κύμα συχνότητας ν , εκπέμπεται και απορροφάται από το εκπομπών σώμα.



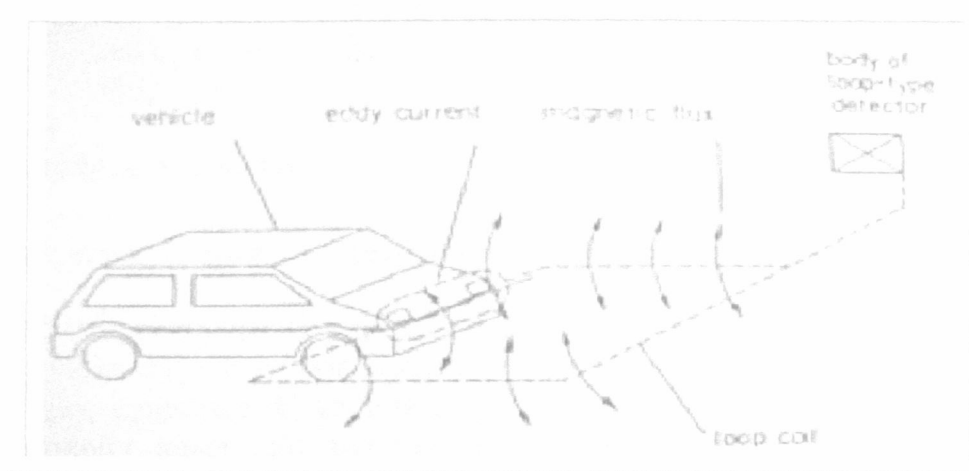
Σχήμα 2.1 Φαινόμενο Ultrasonic Doppler

2.2 Φωρατές επαγωγικού βρόγχου

2.2.1 Γενικά

Οι επαγωγικού βρόγχου φωρατές έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις ανίχνευσης της ελεγχόμενης κίνησης, όπως έχουν και οι υπερηχητικοί τύποι φωρατών. Οι βασικές αρχές λειτουργίας των φωρατών επαγωγικού βρόγχου γίνονται κατανοητές από το σχήμα 2.2. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στέλνεται στο μαγνητικό πεδίο που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του δρόμου, ένα μαγνητικό πεδίο της ίδιας συχνότητας δημιουργείται κοντά στην επιφάνεια του δρόμου. Αν κάποιο μεταλλικό αντικείμενο εισχωρήσει στο μαγνητικό αυτό πεδίο, τότε η μαγνητική επαγωγή προκαλεί την εμφάνιση στροβιλικού ρεύματος στο μεταλλικό αντικείμενο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή σύνθετης αντίστασης του loop coil στην πλευρά της εισόδου. Αρχικά ανιχνεύεται η αλλαγή αυτή, και αμέσως μετά το αντικείμενο (όχημα). Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να λεχθεί, ότι ο loop coil και το όχημα συμπεριφέρονται ως μετασχηματιστές. Δηλαδή, αν μαγνητικό πεδίο είναι ο κύριος στροβιλιστής, τότε το μεταλλικό αντικείμενο θα είναι το δευτερεύων πεδίο, το οποίο είναι μικρότερο λόγω της μεταλλικής αντίστασης. Το κύριο τμήμα στροβιλισμού συγκρίνεται με το δευτερεύων, με εξαιρετικά χαμηλή αμοιβαία επαγωγή, η οποία μηδενίζεται όσο δεν παρατηρείται περίπτωση εμφάνισης οχήματος πάνω στο μαγνητικό πεδίο. Αν ένα αυτοκίνητο πλησιάζει στο μαγνητικό πεδίο, η αμοιβαία επαγωγή γίνεται υψηλή, προκαλώντας τη σύνθετη αντίσταση να αλλάξει τη φορά του κύριου πεδίου του μετασχηματιστή. Αυτή η αλλαγή της σύνθετης αντίστασης συνεπάγεται αλλαγές στην αντίσταση, στην επαγωγή και στη φάση. Όλες οι παραπάνω ποσότητες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των οχημάτων. Εντούτοις, για πολλές περιπτώσεις, η ανιχνευτική μέθοδος βασίζεται στην αλλαγή της επαγωγής. Η αλλαγή της επαγωγής στο μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία, τη βροχή και τη μετατροπή (αλλαγή) της επιφάνειας του δρόμου, με αποτέλεσμα η αλλαγή της τιμής της επαγωγής να επηρεάζεται περισσότερο από αυτούς τους παράγοντες παρά από τη διείσδυση των οχημάτων στην υπό εξέταση περιοχή.

Γι' αυτό, το φαινόμενο αυτό θα πρέπει να αντισταθμιστεί. Με χρήσιμα εργαλεία υπολογίζεται η εισροή των οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το ποσό της επαγωγής η οποία μεταβλήθηκε κατά τη διάρκεια της δημιουργίας της στην έξοδο. Η αλλαγή στη επαγωγή οφείλεται στην εισροή των οχημάτων, ανάλογα και με τον τύπο κάθε οχήματος. το σύστημα είναι περισσότερο ευαίσθητο σε οχήματα μικρού μήκους και λιγότερο σε οχήματα μεγάλου μήκους.



Σχήμα 2.2 Βασική αρχή λειτουργίας επαγωγικού βρόγχου

2.2.2 Προδιαγραφές φωρατών σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Κοινότητα

2.2.2.1 Τρόποι λειτουργίας

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Κοινότητας οι φωρατές επαγωγικού βρόγχου θα πρέπει να παρέχουν δύο εναλλακτικούς τρόπους λειτουργίας: «διέλευση» και «παρουσία».

- 1 Κατά τη λειτουργία «διέλευσης» ο φωρατής θα παράγει ένα βραχύ παλμό σταθερής διάρκειας 75ms έως 150ms για κάθε ενεργοποίησή του από διέλευση οχήματος πάνω από το βρόχο του.
 - 1 Σε περίπτωση στάθμευσης οχήματος πάνω από μέρος του βρόχου του, ο φωρατής θα είναι σε θέση να αισθάνεται άλλο όχημα, που θα διέρχεται πάνω από το ελεύθερο μέρος του βρόχου του, σε δύο (2) s το πολύ.
- 2 Κατά τον τρόπο «παρουσίας» ο φωρατής θα δίνει μια συνεχή έξοδο, για όσο χρόνο διαρκεί η παρουσία ενός οχήματος πάνω στο βρόχο του. Η μέγιστη διάρκεια του παλμού αυτού θα καθορίζεται από ένα διακόπτη παρουσίας. Μετά την μέγιστη αυτή διάρκεια το σύστημα θα επανέρχεται αυτόματα σε κατάσταση ηρεμίας, με προσαρμογή του στην αυτεπαγωγή του βρόχου με το σταθμευμένο πάνω του όχημα, και ο φωρατής θα αισθάνεται στο εξής άλλα οχήματα που διέρχονται από το ελεύθερο τμήμα αυτού του βρόχου.

1. Για ένα τυπικό βρόχο 2m X 2m με τρεις σπείρες, με τη μέγιστη ευαισθησία του φωρατή και για ένα κλειστό επιβατικό όχημα σταθμευμένο ακριβώς πάνω από το βρόχο, η μέγιστη διάρκεια του παλμού εξόδου θα μπορεί να ρυθμιστεί από 5 min περίπου έως 45 min περίπου.
2. Οι φωρατές θα διαθέτουν στιγμιαίο διακόπτη επαναφοράς (π.χ. κουμπί πίεσης), με τον οποίο θα απενεργοποιούνται όλα τα κανάλια που καταγράφουν παρουσία οχήματος. Το ίδιο αποτέλεσμα θα έχει και η επιλογή με τη βοήθεια του σχετικού διακόπτη τις λειτουργίες «διέλευσης».

2.2.2.2 Μετρήσεις φωρατών

Οι φωρατές γενικώς πρέπει να παρέχουν τις παρακάτω μετρήσεις:

- α) Παρουσία. Η παράμετρος αυτή δηλώνει την παρουσία οχήματος πάνω από τον βρόχο ανίχνευσης και για όσο διάστημα διαρκεί αυτή.
 - β) Αριθμός οχημάτων. Η παράμετρος αυτή δηλώνει τον αριθμό των οχημάτων που πέρασαν πάνω από τον βρόχο σε κάποιο χρονικό διάστημα που θα καθορίζεται στο λογισμικό της συσκευής για τις επενέργειες. Ο μηδενισμός της παραμέτρου θα γίνεται μέσω του λογισμικού αυτού σε οποιοδήποτε σημείο του προγράμματος χρονισμού και ανεξάρτητα για κάθε ανιχνευτή.
 - γ) Κατάληψη. Η παράμετρος αυτή δηλώνει τον χρόνο παρουσίας οχημάτων πάνω από τον βρόχο σε κάποιο χρονικό διάστημα που θα καθορίζεται στο λογισμικό της συσκευής για τις επενέργειες. Η μέτρηση του χρόνου παρουσίας γίνεται με βήμα το πολύ 100 ms. Ο μηδενισμός της παραμέτρου γίνεται μέσω του λογισμικού αυτού σε οποιοδήποτε σημείο του προγράμματος χρονισμού και ανεξάρτητα για κάθε ανιχνευτή. Όλες οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να αποθηκεύονται ανά χρονικά διαστήματα.
 - δ) Εξομαλυσμένη κατάληψη. Η παράμετρος αυτή δηλώνει τον μέσο κεντροβαρικό χρόνο παρουσίας οχημάτων πάνω από τον βρόχο σε μια σειρά χρονικών διαστημάτων και είναι η κεντροβαρική μέση τιμή των καταλήψεων στα παραπάνω χρονικά διαστήματα. Ο μηδενισμός της παραμέτρου γίνεται μέσω του λογισμικού αυτού σε οποιοδήποτε σημείο του προγράμματος χρονισμού και ανεξάρτητα για κάθε ανιχνευτή.
 - ε) Εξομαλυσμένος αριθμός οχημάτων. Η παράμετρος αυτή είναι ο μέσος κεντροβαρικός αριθμός των οχημάτων πάνω από τον βρόχο σε μια σειρά χρονικών διαστημάτων.
 - στ) Χρονικό διάκενο. Η παράμετρος αυτή δηλώνει την χρονική διάρκεια κατά την οποία δεν υπάρχει αυτοκίνητο πάνω από τον βρόχο.
 - ζ) Τελευταίο συμπληρωμένο διάκενο. Η παράμετρος αυτή δηλώνει το τελευταίο χρονικό διάκενο του οποίου έχει ολοκληρωθεί η μέτρηση. Η παράμετρος αλλάζει κάθε φορά που συμπληρώνεται το τρέχον χρονικό διάκενο, δηλαδή κάθε φορά που περνά όχημα πάνω από τον βρόχο.
- Η μήτρα των ενδιαμέσων χρόνων, ο συνδυασμός των ομάδων σε φάσεις, η διαδοχή των φάσεων, τα μέγιστα και τα ελάχιστα όρια πράσινης ένδειξης και οι άλλες απαραίτητες παράμετροι (ανάλογα με την μέθοδο λειτουργίας) θα καθορίζονται από τον μελετητή. Σε περίπτωση βλάβης έστω και ενός από τους βρόγχους των φωρατών μιας ομάδας σηματοδοτών ο χρόνος πρασίνου της ομάδας

αυτής θα παίρνει αυτόματα μία προκαθορισμένη από τον μελετητή σταθερή διάρκεια.

2.3 Αισθητήρες εικόνας

Οι μαγνητικού τύπου φωρατές και οι υπερηχητικού τύπου φωρατές έχουν συχνά χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή πληροφοριών για μια συνεχή ροή οχημάτων σε ένα ελεγχόμενο σύστημα κυκλοφορίας. Σε αντίθεση με τους φωρατές επαγωγικού βρόγχου, όπου χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα (για παράδειγμα, ίσο με τον χρονικό κύκλο) για να συλλεχθούν αξιόπιστες μετρήσεις και συνεπώς υπάρχει χρονική καθυστέρηση στην εκτίμηση των κυκλοφοριακών δεδομένων, οι αισθητήρες εικόνας μπορούν οπτικά να ανιχνεύσουν την κατάσταση της συνεχούς ροής των οχημάτων στην έκταση του χώρου του δρόμου, και να συλλέξουν αμέσως όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για τη συνεχή ροή των οχημάτων. Με τον αισθητήρα εικόνας μπορεί να ανιχνευθεί το πλήθος των οχημάτων, να συλλεχθούν πληροφορίες για τη ροή των οχημάτων, την ταχύτητα σε κάθε σημείο και τη μέση ταχύτητα των οχημάτων. Μάλιστα οι πληροφορίες συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο, με αποτέλεσμα ατυχήματα, μπλοκαρίσματα να μπορούν να ανιχνευθούν αμέσως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μικροσκοπικά μοντέλα

Στο χώρο της μοντελοποίησης κυκλοφοριακής ροής, τα μικροσκοπικά μοντέλα (microscopic ή car-following models) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά μεμονωμένων οχημάτων σε ένα οδικό δίκτυο, ή πιο συγκεκριμένα τη συμπεριφορά του συστήματος οχήματος-οδηγού σε ένα ρεύμα αλληλεπιδρόντων οχημάτων. Οι κύριες εφαρμογές των μοντέλων αυτών είναι:

- Η απόκτηση γνώσης και κατανόησης της συμπεριφοράς του συστήματος οδηγού-οχήματος (για παράδειγμα για την ανάπτυξη νέων συσκευών ασφαλείας)
- Η παροχή του κύριου συστατικού των μικροσκοπικών προσομοιώσεων που χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως (για παράδειγμα στον έλεγχο ή βελτιστοποίηση νέων στρατηγικών ελέγχου της κυκλοφοριακής ροής).
- Ενσωμάτωση σε προσομοιώσεις οδήγησης σε virtual περιβάλλον.

Τα car-following μοντέλα αποτελούνται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που υπολογίζουν την επιτάχυνση ενός οχήματος σε σχέση με τα προπορευόμενά του. Πολλές φορές αποτελούν προσεγγιστικά μοντέλα των οποίων οι παράμετροι δίνονται αυθαίρετα, αλλά με τη συνεισφορά της θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου και πρόβλεψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαχθεί μια δομή ενός μοντέλου βελτίστου ελέγχου που θα προσομοιώνει όσο το δυνατόν καλύτερα τη συμπεριφορά του οδηγού, με την παραδοχή ότι η συμπεριφορά του οδηγού συνίσταται στην ελαχιστοποίηση μιας τετραγωνικής συνάρτησης. Η θεωρία των car-following μοντέλων αρχικά πρωτάθηκε από τον Reuschel (1950) και τον Pipes (1953) και στη συνέχεια επεκτάθηκε από τους Herman et al. (1959). Ανάμεσα σε άλλους που ασχολήθηκαν εκτενώς με το θέμα ήταν και οι Gazis (1974), Gerlogh και Huber (1975) και Bekey et al. (1977).

Τα μικροσκοπικά μοντέλα αποτελούν το βασικότερο μέρος μιας μικροσκοπικής προσομοίωσης. Σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται όταν είναι για παράδειγμα απαραίτητο να γνωρίζουμε ακριβώς τη θέση των οχημάτων σε ένα οδικό δίκτυο, να κάνουμε διαφοριοποιήσεις μεταξύ διαφορετικών ειδών οχημάτων (αυτοκίνητα, λεωφορεία, φορτηγά). Ο κύριος χώρος εφαρμογής τους είναι ο έλεγχος και ο υπολογισμός στρατηγικών ελέγχου κυκλοφοριακής ροής: προσαρμοστικές, στρατηγικές πραγματικού χρόνου για αυτοκίνητα, στρατηγικές προτεραιότητας για λεωφορεία κλπ. Επίσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη επιπέδων θορύβου και καυσαερίων σε σηματοδοτημένες διασταυρώσεις, και για τον έλεγχο της επάρκειας των συσκευών ασφαλείας που χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουν τις συγκρούσεις που εμφανίζονται σε ρεύματα οχημάτων που κινούνται με μικρές αποστάσεις μεταξύ τους.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε βασικά μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση της συμπεριφοράς μεμονωμένων οχημάτων.

3.1 Απλά γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα

Στη γενική τους μορφή τα μικροσκοπικά μοντέλα κυκλοφοριακής ροής να αναπαρασταθούν με την έκφραση:

$$\text{απόκριση}(t+\tau) = \text{ευαισθησία} \times \text{ερέθισμα}(t),$$

όπου τ είναι ο χρόνος αντίδρασης του συστήματος οχήματος-οδηγού. Αν και η ακριβής περιγραφή της σχέσης ερέθισμα-απόκριση θα μπορούσε να γίνει πολύ περίπλοκη, έχει αποδειχθεί ότι το φαινόμενο μπορεί να προσεγγιστεί αρκετά καλά με ένα σχετικά απλό σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Για τα διάφορα μοντέλα που θα περιγράψουμε, η απόκριση θα είναι πάντα η επιτάχυνση (ή επιβράδυνση) του οχήματος που ακολουθεί, με ερέθισμα στις περισσότερες περιπτώσεις τη διαφορά των ταχυτήτων μεταξύ του οχήματος που προηγείται και του οχήματος που ακολουθεί.

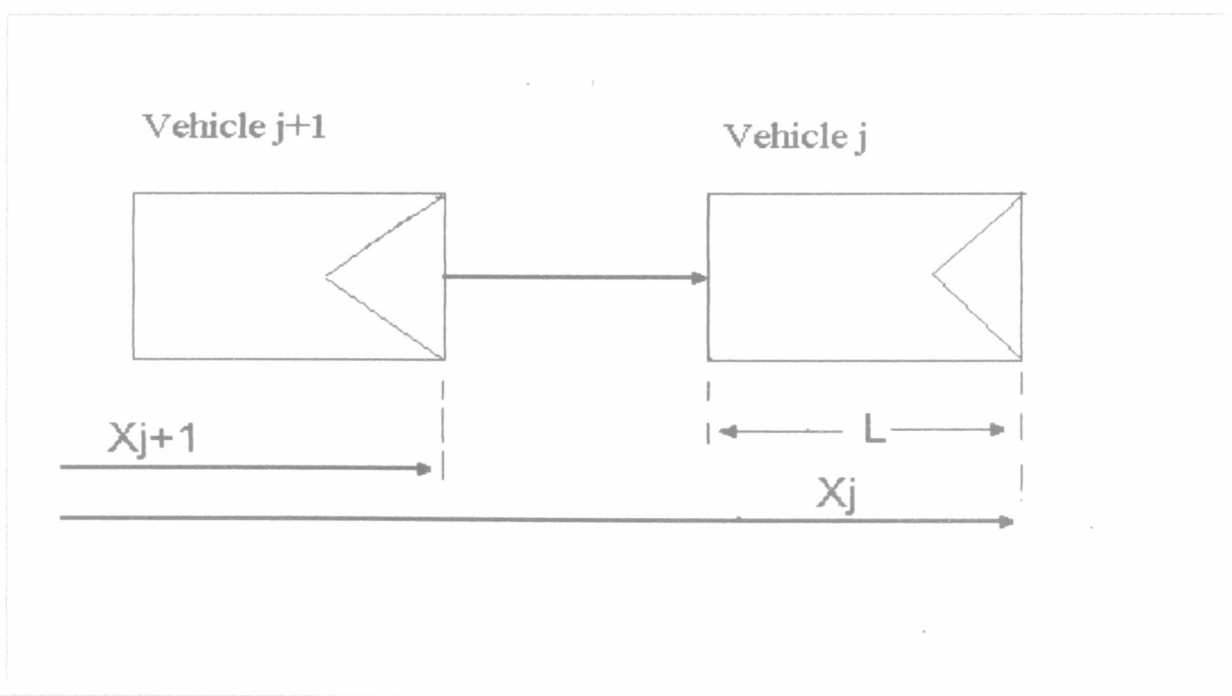
Στο μοντέλο αυτό εξετάζουμε την οδική συμπεριφορά N αυτοκινήτων. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το προπορευόμενο όχημα είναι εκείνο που καθορίζει τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση των οχημάτων που το ακολουθούν. Θέλοντας να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι ας θεωρήσουμε δύο αυτοκίνητα το vehicle j και το vehicle $j+1$, όπου το vehicle $j+1$ είναι ο ακολουθητής του vehicle j . Ορίζουμε επίσης τις παραμέτρους :

L = μήκος των οχημάτων

X_j = θέση του vehicle j

X_{j+1} = θέση του vehicle $j+1$

S = Χρονική σταθερά ασφαλείας



Σχήμα 3.1 Απεικόνιση ενός απλού γραμμικού μοντέλου

Το μοντέλο αυτό είναι το πιο απλό μοντέλο, το οποίο δείχνει ότι η ταχύτητα του ακολουθούντος οχήματος εξαρτάται από τη διαφορά της θέσης του από το

προπορευόμενο όχημα. Μάλιστα η διαφορά είναι τέτοια ώστε αν το προπορευόμενο όχημα σταματήσει, τότε το ακολουθόν όχημα να το φτάσει χωρίς όμως να το προσπεράσει ή να συγκρουστεί με αυτό. Reuschel, (1950).

$$x_j - x_{j+1} = L + S \cdot \dot{x}_{j+1} \quad (3.1)$$

Διαφορίζοντας τη σχέση (1.1) προκύπτει η σχέση (3.2)

$$\ddot{x}_{j+1} = \frac{1}{S} (\dot{x}_j - \dot{x}_{j+1}) \quad (3.2)$$

που δείχνει ποια θα είναι η επιτάχυνση του του ακολουθούντος οχήματος. Pipes, (1953).

3.1.1 Απλό Γραμμικό Μικροσκοπικό Μοντέλο

Το μοντέλο αυτό περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \tau) = \lambda [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (3.3)$$

όπου n είναι ο αριθμός του προπορευόμενου οχήματος, $n+1$ ο αριθμός του ακολουθούντος οχήματος, τ ο χρόνος αντίδρασης και λ ο συντελεστής ευαισθησίας. Στην αξιολόγηση που έγινε το 1958 από τους Chandler et al. στο General Motors Technical Center, βρέθηκε πειραματικά ότι η τιμή του τ είναι περίπου 1.5sec και του λ περίπου 0.37 sec^{-1} . Αυτό το απλό μοντέλο δε θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικό κυρίως όσον αφορά τις επιπτώσεις του στη μόνιμη κατάσταση ροής (steady-state flow), αλλά η ευστάθειά του μπορεί να εξεταστεί εύκολα κάνοντας τη χρήση της θεωρίας γραμμικών συστημάτων

Η ευστάθεια κάποιου μοντέλου κυκλοφοριακής ροής πρέπει να εξεταστεί προκειμένου να επαληθευτεί ότι η αλλαγή της ταχύτητας του προπορευόμενου οχήματος μιας αλυσίδας οχημάτων δε θα επεκταθεί στα οχήματα που ακολουθούν στην αλυσίδα μέχρι να εμφανιστεί κάποια σύγκρουση. Υπάρχουν δύο τύποι ευστάθειας: η τοπική ευστάθεια (local stability) που σχετίζεται με την απόκριση ενός οχήματος στην αλλαγή της κίνησης του οχήματος που βρίσκεται ακριβώς μπροστά του και η ασυμπτωτική ευστάθεια (asymptotic ή string stability) που σχετίζεται με την προοδευτική αύξηση του πλάτους της διακύμανσης κατά μήκος της αλυσίδας των οχημάτων.

Σε ότι αφορά το γραμμικό μοντέλο μπορεί να αποδειχθεί ότι η τοπική ευστάθεια θεωρείται δεδομένη εφόσον $\lambda \tau \leq \pi/2$, τη στιγμή που μια αλυσίδα οχημάτων μπορεί να θεωρηθεί ως ασυμπτωτικά ευσταθής μόνο όταν $\lambda \tau < 0.5$ (Herman et al. 1959).

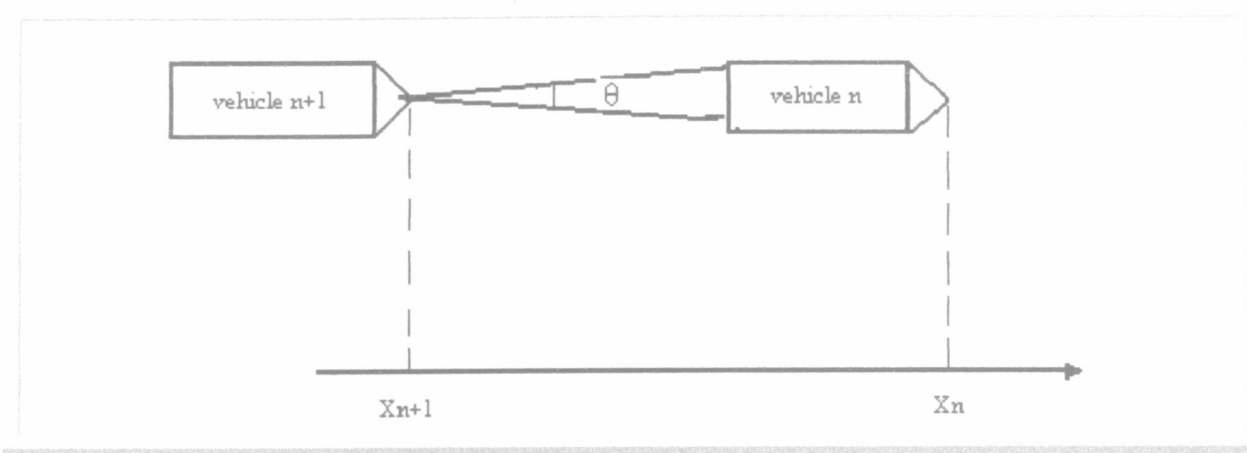
3.1.2 Μη γραμμικά μοντέλα κυκλοφοριακής ροής

Στην εξίσωση (3.3) ο συντελεστής λ είναι μια σταθερά, γεγονός που σημαίνει ότι η απόκριση για μια συγκεκριμένη διαφορά ταχυτήτων μεταξύ δύο αυτοκινήτων είναι

ανεξάρτητη από την μεταξύ τους απόσταση –το οποίο ουσιαστικά δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικό. Για τον λόγο αυτό οι Gazis et al. (1959) ανέπτυξαν το παρακάτω μοντέλο:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+\tau) = \lambda_o \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} \quad (3.4)$$

η οποία δείχνει ότι η απόκριση είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Ο λ_o είναι ένας νέος συντελεστής ευαισθησίας (σε m^2/sec).



Σχήμα3.2 Το μοντέλο οπτικής γωνίας

Το 1953 ο Pipes εισηγήθηκε ένα μοντέλο κυκλοφοριακής ροής βασισμένο στην υπόθεση ότι η επιτάχυνση του ακολουθούντος οχήματος είναι ανάλογη της αντίληψης του οδηγού σχετικά με το βαθμό αλλαγής της γωνίας θ (Σχήμα 3.2) και κατέληξε έτσι στην εξής γραμμική εξίσωση:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+\tau) = \lambda_o \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^2} \quad (3.5)$$

περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς του οδηγού, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για μια συγκεκριμένη διαφορά ταχύτητας και συγκεκριμένη απόσταση, η απόκριση γίνεται τόσο πιο σημαντική όσο αυξάνει η ταχύτητα του οχήματος. Τελικά, όλες οι παράμετροι που είδαμε οδηγούν στην παρακάτω γενική μορφή των μη γραμμικών μοντέλων κυκλοφοριακής ροής:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+\tau) = \lambda_o \dot{x}_{n+1}(t+\tau)^m \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \quad (3.6)$$

όπου l και m είναι σταθερές.

3.2 Άλλα μικροσκοπικά μοντέλα

3.2.1 Μοντέλο τριών οχημάτων

Πολλές προσπάθειες έχουν καταβληθεί προκειμένου να αναπτυχθούν μοντέλα που περιλαμβάνουν και δεύτερο προπορευόμενο αυτοκίνητο, όπως για παράδειγμα το παρακάτω γραμμικό μοντέλο:

$$\ddot{x}_{n+2}(t+\tau) = \lambda_1 [\dot{x}_{n+1}(t) - \dot{x}_{n+2}(t)] + \lambda_2 [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+2}(t)] \quad (3.7)$$

Πειραματικά όμως αποδείχθηκε ότι το ερέθισμα εξαιτίας του δεύτερου οχήματος (εδώ με αριθμό n) δεν ήταν πολύ σημαντικό.

3.2.2 Μοντέλο του Helly

Με τα μικροσκοπικά μοντέλα που μελετήσαμε ως τώρα, η απόσταση μεταξύ δύο οχημάτων που πηγαίνουν με την ίδια ταχύτητα παραμένει η ίδια. Ο Helly (1961) υπέθεσε ότι ο οδηγός θα ενδιαφερόταν και για τη διαφορά της υπαρκτής απόστασης ($x_n - x_{n+1}$) και της επιθυμητής απόστασης. Μια απλοποιημένη μορφή του μοντέλου είναι η εξής:

$$\ddot{x}_{n+2}(t+\tau) = c_1 [\dot{x}(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + c_2 [x_n(t) - x_{n+1}(t) + D], \quad (3.8)$$

όπου c_1, c_2 , είναι παράμετροι ελέγχου της επιθυμητής απόστασης και D η επιθυμητή απόσταση. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα προσομοίωσης **SITRA-B** (Gabard et al., 1982), όπου η επιθυμητή απόσταση δίνεται από τη σχέση:

$$D = l_n + \tau_{n+1} \dot{x}_{n+1}(t), \quad (3.9)$$

όπου l_n είναι το μήκος του οχήματος n και τ_{n+1} η χρονική απόσταση για το όχημα $n+1$. Περισσότερα για το μικροσκοπικό μοντέλο αναφέρονται στο 4^ο Κεφάλαιο.

3.2.3 Μη συμμετρικά μοντέλα

Στα προηγούμενα μοντέλα υποθέσαμε ότι ο βαθμός απόκρισης του συστήματος οχήματος-οδηγού είναι ο ίδιος, τόσο στην περίπτωση της επιτάχυνσης όσο και στην περίπτωση της επιβράδυνσης. Είναι γνωστό όμως ότι οι δυνατότητες των οχημάτων αλλά και της αντίδρασης των οδηγών είναι σαφώς μεγαλύτερες κατά την επιβράδυνση παρά την επιτάχυνση. Το ακόλουθο μοντέλο έχει προταθεί:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+t) = \lambda_+ [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)], \quad (3.10)$$

$$\ddot{x}_{n+1}(t+\tau) = \lambda_- [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)], \quad (3.11)$$

για θετική και αρνητική σχετική ταχύτητα αντίστοιχα. Αυτό ουσιαστικά αποτελεί μια επέκταση του γραμμικού μοντέλου. Εισάγοντας πραγματικές μετρήσεις στο μοντέλο είναι δυνατόν να βρεθεί ότι το πηλίκο $\frac{\lambda_-}{\lambda_+}$ ισούται με 1,1.

3.2.4 Μοντέλο του Gipps

Ο Gipps (1981) πρότεινε ένα νέο μικροσκοπικό μοντέλο για την κυκλοφοριακή ροή, βασισμένο στην υπόθεση ότι κάθε οδηγός θέτει κάποια όρια όσον αφορά τις επιθυμητές τιμές επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Το μοντέλο αποτελείται από δύο μέρη, ένα για την περιγραφή της επιτάχυνσης και ένα για την επιβράδυνση. Για την επιτάχυνση έχουμε:

$$\dot{x}_{n+1}^\lambda(t+\tau) = \dot{x}_{n+1}(t) + 2.5\lambda_{n+1}\tau \left[1 - \frac{\dot{x}_{n+1}(t)}{V_{n+1}} \right] \times \left[0.025 + \frac{\dot{x}_{n+1}(t)}{V_{n+1}} \right]^{1/2}, \quad (3.12)$$

όπου $\dot{x}_{n+1}^\lambda(t+\tau)$ είναι η μέγιστη ταχύτητα μέχρι την οποία μπορεί να επιταχύνει ένα όχημα κατά το χρονικό διάστημα $(t, t+\tau)$, V_{n+1} είναι η επιθυμητή ταχύτητα για το n+1 όχημα και a_{n+1} είναι η μέγιστη επιτάχυνση για το n+1 όχημα. Για το φρενάρισμα (επιβράδυνση) ισχύει:

$$\dot{x}_{n+1}^b(t+\tau) = \beta_{n+1}\tau + \left([\beta_{n+1}\tau]^2 - \beta_{n+1} \left\{ 2[x_n(t) - l_n - x_{n+1}(t)] - \dot{x}_{n+1}(t)\tau - \frac{\dot{x}_n(t)^2}{\hat{\beta}} \right\} \right)^{1/2}, \quad (3.13)$$

όπου $\dot{x}_{n+1}^b(t+\tau)$ είναι η μέγιστη ασφαλής ταχύτητα για το όχημα n+1 σε σχέση με το όχημα n, β_{n+1} είναι το πιο απότομο φρενάρισμα που ο οδηγός του οχήματος n+1 είναι διατεθειμένος να πραγματοποιήσει (<0), l_n είναι το μήκος του οχήματος n και $\hat{\beta}$ είναι η εκτίμηση του β_n που χρησιμοποιείται από τον οδηγό του οχήματος n+1.

Τέλος, κάτω από οποιαδήποτε από τις παραπάνω συνθήκες, η ταχύτητα του οχήματος n+1 είναι το ελάχιστο των ταχυτήτων $\dot{x}_{n+1}^\lambda(t+\tau)$ και $\dot{x}_{n+1}^b(t+\tau)$. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στο MULTISIM (Gipps 1986) ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κίνησης οχημάτων σε αρτηρίες με παραπάνω από μια λωρίδες, στο οποίο ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη μοντελοποίηση αποφάσεων εναλλαγής λωρίδων.

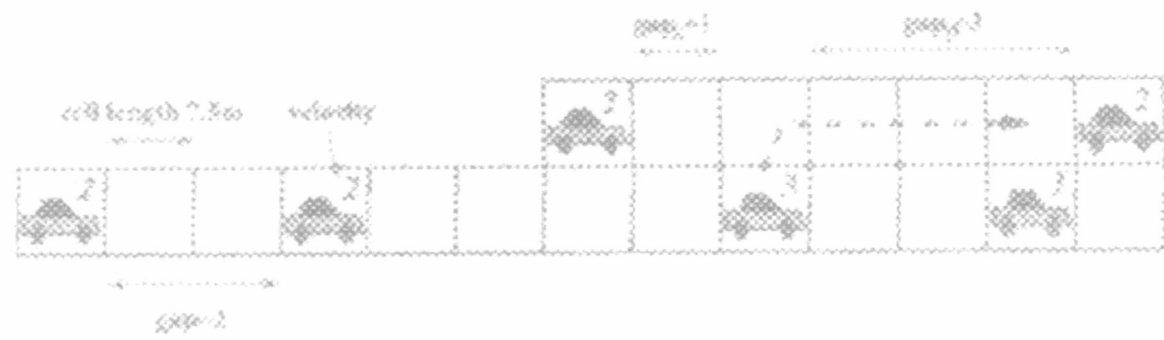
3.2.5 Μοντέλο των Nagel-Schreckenberg

Τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου θα πρέπει να περιγράφουν τις σχετικές πλευρές των δυναμικών στοιχείων της ροής όσο πιο απλά γίνεται. Ακολουθώντας αυτή την παραδοχή οι Nagel και Schreckenberg (1992) παρουσίασαν ένα κυψελοειδές μοντέλο που βασίζεται στη

θεωρία αυτομάτων. Αποτελεί ένα απλό μοντέλο, από την άποψη ότι δίνει τη δυνατότητα να αναπαραχθούν βασικά χαρακτηριστικά των κυκλοφοριακών συνθηκών, αποφεύγοντας όμως παράλληλα την παγίδα της υπεραπλούστευσης. Μέχρι σήμερα, λεπτομερείς μελέτες του μοντέλου (Schadschneider 1999, Chowdhury et al. 2000) δείχνουν ότι αποτελεί μικροσκοπική προσομοίωση υψηλής ταχύτητας για οδικά δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι τα εξής: ο δρόμος χωρίζεται σε κυψέλες με μήκος $\Delta x = \rho_{jam}^{-1} = 7.5m/veh$ με $\rho_{jam} \approx 133veh/km$, την πυκνότητα των αυτοκινήτων που βρίσκονται σε κυκλοφοριακή συμφόρηση. Κάθε κυψέλη είναι είτε άδεια είτε γεμάτη με ένα μόνο όχημα, με μια ταχύτητα με ακέραιη τιμή ---- που ανήκει στο διάστημα $\{0,...,v_{max}\}$ με v_{max} την μέγιστη ταχύτητα. Η κίνηση των οχημάτων περιγράφεται από τους ακόλουθους κανόνες (parallel dynamics):

- R1** Επιτάχυνση: $v_i \leftarrow \min(v_i + 1, v_{max})$,
- R2** Επιβράδυνση: για την αποφυγή ατυχήματος: $v_i' \leftarrow \min(v_i, gap)$,
- R3** Τυχαιοποίηση: με συγκεκριμένη πιθανότητα p εκτέλεσε την $v_i'' \leftarrow \max(v_i' - 1, 0)$,
- R4** Κίνηση: $x_i \leftarrow x_i + v_i''$



Σχήμα3.3 Μέρος του δρόμου σε ένα κυψελοειδές μοντέλο αυτομάτων.



Οι δύο πρώτοι κανόνες (**R1,R2**) περιγράφουν μια βέλτιστη στρατηγική οδήγησης, με τον οδηγό να επιταχύνει αν το όχημα δεν έχει φτάσει στην μέγιστη ταχύτητα v_{max} και να επιβραδύνει για να αποφύγει τη δημιουργία ατυχήματος, γεγονός που ρητά αποκλείεται. Ένα τέτοιο κυψελοειδές αυτόματο είναι ντετερμινιστικό και η στάσιμη κατάσταση εξαρτάται μόνο από τις αρχικές συνθήκες. Οι οδηγοί όμως δεν αντιδρούν με αυτόν τον βέλτιστο τρόπο: μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους χωρίς εμφανείς λόγους, κάτι που αντανακλάται στη μεταβλητή θορύβου της επιβράδυνσης p (**R3**). Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οχημάτων, και αυτή η μεταβλητή είναι υπεύθυνη για την ξαφνική δημιουργία συμφορήσεων.

Για να περιγραφούν περισσότερο σύνθετες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα κίνηση σε πολλές λωρίδες ή περιοχές συννέωσης διαφορετικών ροών, το βασικό σύνολο κανόνων πρέπει να επεκταθεί. Για παράδειγμα, μια αλλαγή λωρίδας θα γίνει με αναφορά σε κάποιες παραμέτρους ασφαλείας και νομιμότητας, οι οποίες αλλάζουν από χώρα σε χώρα. Ένα παράδειγμα αλλαγής λωρίδας φαίνεται στο Σχήμα. Πρώτα το όχημα ελέγχει αν εμποδίζεται από το όχημα που προηγείται στη λωρίδα του. Αυτό ισχύει αν $gap < v$. Στη συνέχεια πρέπει να λάβει υπ' όψιν, στη λωρίδα που επιθυμεί να

μπει, το κενό σε σχέση με αυτόν που ακολουθεί gap_s και αυτόν που προηγείται gap_p . Αν τα κενά επιτρέπουν μια ασφαλή αλλαγή λωρίδας, το όχημα μετακινείται στην άλλη λωρίδα.

Το μοντέλο αυτό είναι από εκείνα που έχουν τη δυνατότητα να μεταφραστούν πολύ εύκολα ως ένα σύστημα πολλών πρακτόρων με αντιδρώντες (reactive) πράκτορες. Η οντότητα οδηγού-οχήματος (πράκτορας) αντιδρά στην αντίληψη που έχει για την ταχύτητά του και το κενό μπροστά του. Αυτή η συμπεριφορά είναι σχετικά απλή και δεν απαιτεί γνωστική μοντελοποίηση, επιτρέποντας έτσι αποτελεσματικές και γρήγορες προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας. Αν όμως επιθυμούμε να συμπεριλάβουμε περισσότερο σύνθετες διαδικασίες λήψης αποφάσεων θα χρειαστεί να εισαγάγουμε επιπρόσθετα επίπεδα υπολογισμών.

3.3 Μοντέλα βασιζόμενα στη θεωρία βέλτιστου ελέγχου

Στην προσέγγιση της εξαγωγής ενός μοντέλου από τη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου (Bekeley et al. 1977), η δυναμική ενός οχήματος που ακολουθεί κάποιο άλλο εκφράζεται από τη σχέση:

$$x_{n+1}(t + \Delta t) = A_{n+1}x_{n+1}(t) + Bv(t), \quad (3.14)$$

όπου $x_{n+1}(t)$ είναι το δυσδιάστατο διάνυσμα κατάστασης του οχήματος που ακολουθεί (θέση $x_{n+1}(t)$ και ταχύτητα $\dot{x}_{n+1}(t)$), A_{n+1} είναι ένας 2×2 πίνακας συντελεστών, B είναι ένας 2×1 πίνακας και $v(t)$ είναι ο έλεγχος που ασκείται από τον οδηγό (επιτάχυνση ή επιβράδυνση) μια παρόμοια αναπαράσταση χρησιμοποιείται για τη δυναμική του οχήματος που προηγείται (χωρίς όμως τον όρο ελέγχου $Bv(t)$), και η έκφραση του κριτηρίου της τετραγωνικής σύγκλισης που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί από το όχημα που ακολουθεί είναι:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \{ [x_n(t_i) - x_{n+1}(t_i) - ax_{n+1}(t_i)]^2 q_1 + [\dot{x}_n(t_i) - \dot{x}_{n+1}(t_i)]^2 q_2 + r v^2(t_i) \}, \quad (3.15)$$

όπου q_1, q_2 και r είναι παράγοντες βάρους και a είναι μια σταθερά. Ο πρώτος όρος αναπαριστά την απόκλιση της απόστασης των οχημάτων από μια επιθυμητή απόσταση (η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί), ο δεύτερος όρος αναπαριστά το σχετικό σφάλμα ταχύτητας και ο τρίτος όρος το κόστος ελέγχου.

Υποθέτοντας επιπλέον ότι οι δυναμικές του οχήματος που προηγείται είναι ίδιες με αυτού που ακολουθεί, μπορεί να αποδειχθεί ότι η λύση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης οδηγεί σε αυτήν τη γενική δομή ελέγχου $v(t)$:

$$v(t) = c_1 [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + c_2 [x_n(t) - x_{n+1}(t) - c_3 \dot{x}_{n+1}(t)], \quad (3.16)$$

έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε εδώ ότι αυτή η δομή είναι πολύ κοντά σε αυτή που χρησιμοποιήθηκε από τον Helly (1961).

Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε ντετερμινιστικά μοντέλα. Μπορούμε επίσης να προσεγγίσουμε το θέμα στοχαστικά εισάγοντας μεταβλητές θορύβου παρατήρησης και κατάστασης στη διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται φίλτρο Kalman για να εξαχθεί η λύση αυτού του προβλήματος στοχαστικού ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση μοντέλου προσομοίωσης

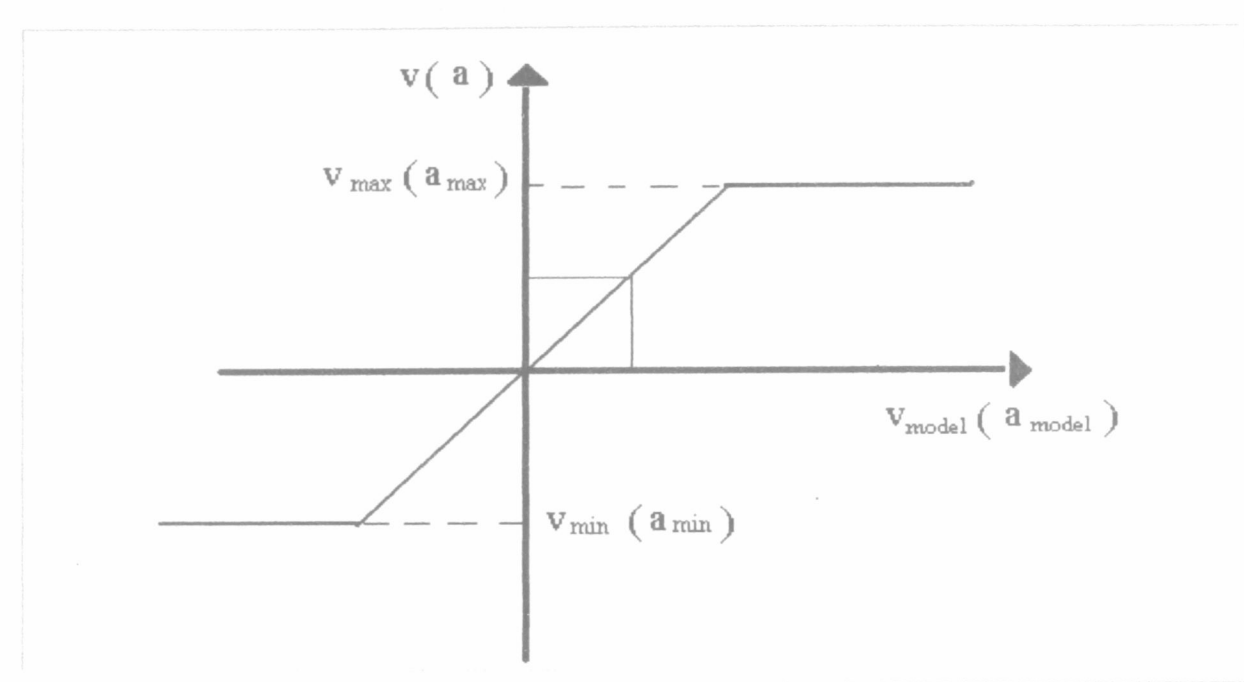
4.1 Επιλογή μικροσκοπικού μοντέλου

Το μικροσκοπικό μοντέλο που θα επιλέξουμε θα πρέπει να πληρεί κάποιες προϋποθέσεις ώστε να μας παρέχει τα αποτελέσματα που επιθυμούμε. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο θα πρέπει να είναι:

- ✦ Υπολογιστικά απλό. Το μοντέλο θα πρέπει να είναι απλό όσον αφορά την επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού (design parameters). Η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση των οχημάτων θα πρέπει να καθορίζονται από όσο το δυνατόν λιγότερες παραμέτρους σχεδιασμού, έτσι ώστε να υπολογίζονται όσο το δυνατό πιο εύκολα.
- ✦ Αριθμητικά ευσταθές: Πολλά μοντέλα γίνονται αριθμητικά ασταθή σε περιπτώσεις που ο χρόνος δειγματοληψίας, δηλαδή το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιείται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του μικροσκοπικού μοντέλου, ξεπερνά τα 0.1 seconds, χρόνος που θεωρείται ικανοποιητικός για μικροσκοπικά μοντέλα. Σαν αποτέλεσμα η χρήση των μοντέλων αυτών γίνεται απαγορευτική γιατί απαιτούν μεγάλους χρόνους προσομοίωσης.
- ✦ Ρεαλιστικό: Λέγοντας ότι το μοντέλο είναι ρεαλιστικό εννοούμε ότι πρέπει να ικανοποιεί κάποιους περιορισμούς, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα ανάγονται από αυτό να ανταποκρίνονται και να συμφωνούν με πραγματικές συνθήκες της συμπεριφοράς των οδηγών στους δρόμους. Πρέπει δηλαδή να τηρούνται κάποιοι περιορισμοί όπως:
 - Περιορισμός ασφαλείας. Κάθε ζεύγος αυτοκινήτων θα πρέπει να διατηρεί μια συγκεκριμένη απόσταση ασφαλείας, έτσι ώστε αν το προπορευόμενο όχημα επιβραδύνει ή σταματήσει για οποιαδήποτε αιτία, το ακολουθόν όχημα να είναι σε θέση να αντιδράσει με τέτοιο τρόπο, χωρίς να υπάρξει περίπτωση σύγκρουσης μεταξύ τους. Μάλιστα αυτό πρέπει να ισχύει για όλα τα ζεύγη αυτοκινήτων ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή τους κυκλοφορία.
 - Προσπέραση οχήματος. Στο πρόβλημα που μελετάμε η λεωφόρος έχει μόνο μία λωρίδα κυκλοφορίας με συνέπεια, όπως είναι πλήρως κατανοητό, η προσπέραση να μην είναι εφικτή. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν από το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, και να αποφρύνονται έτσι τυχόν προσπεράσεις που θα δώσουν λανθασμένα αποτελέσματα.
 - Περιορισμός μέγιστης (ελάχιστης) ταχύτητας και επιτάχυνσης. Στον καθορισμό των τιμών αυτών των παραμέτρων θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας κάποιους παράγοντες ώστε τα αποτελέσματα να είναι ρεαλιστικά όπως:
 - Δυνατότητες σημερινών οχημάτων: ταχύτητα που μπορούν να αναπτύξουν, χρόνος που χρειάζεται να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν ανάλογα με την περίπτωση.
 - Ασφάλεια και άνεση επιβάτη.

- Περιορισμοί Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας. Πρέπει να πληρούνται οι κανόνες του Κ.Ο.Κ. σχετικά με άνω όρια ταχυτήτων
- Ομαλή συμπεριφορά σε συνθήκες stop-and-go.

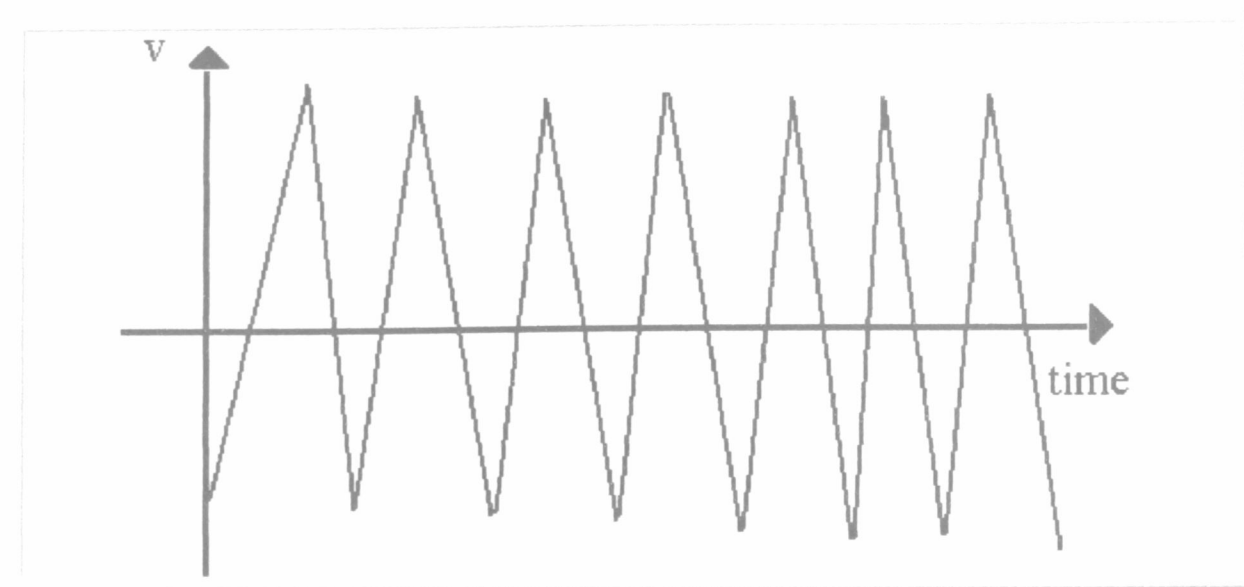
Για τους παραπάνω λόγους, στο μικροσκοπικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να γίνεται χρήση μη-γραμμικών περιορισμών (hard-limiters), με σκοπό τη διατήρηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης σε συγκεκριμένες ελάχιστες και μέγιστες τιμές, που θα καθορίζονται από το σχεδιαστή, σε περίπτωση που οι εξισώσεις του μοντέλου οδηγούν σε ταχύτητες ή/και επιταχύνσεις μεγαλύτερες (μικρότερες) από τις ήδη επιτρεπτές. Σχηματικά η επιρροή των μη-γραμμικών παραμέτρων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1 Επιρροή μη γραμμικών παραμέτρων

Από το Σχήμα 4.1 οι v_{model} , a_{model} αντιστοιχούν στην ταχύτητα και επιτάχυνση όπως αυτές υπολογίζονται από το μικροσκοπικό μοντέλο. Με την εφαρμογή όμως των μη-γραμμικών περιορισμών όταν η τιμή τους τείνει να ξεπεράσει τις ορισμένες από το σχεδιαστή τιμές (v_{max} , v_{min} , a_{max} , a_{min}), αμέσως γίνονται ίσες με τις ορισμένες αυτές τιμές.

Βέβαια το μοντέλο δεν θα πρέπει να καταφεύγει συχνά στη χρησιμοποίηση των μη-γραμμικών περιορισμών, ώστε να μην παρατηρούνται φαινόμενα της μορφής όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.2 Επιρροή συχνής εφαρμογής μη γραμμικών περιορισμών στην ταχύτητα

Παρατηρούμε ότι με συχνή εφαρμογή των μη-γραμμικών περιορισμών σε μικρά χρονικά διαστήματα, οι μεταβολές της ταχύτητας των οχημάτων είναι απότομη με αποτέλεσμα αυτή να μη θεωρείται ρεαλιστική. (Στην πραγματικότητα δε συναντούμε περιπτώσεις που η αυξομειώση της ταχύτητας ενός οδηγού, ενώ κινείται σε κάποιον αυτοκινητόδρομο, να έχει τέτοια μορφή όπως του σχήματος. Αντίθετα η κίνησή του είναι ομαλή με μικρές αυξομειώσεις και μάλιστα σε αραιά χρονικά διαστήματα.)

Από τα μοντέλα που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3, επέλεξαμε τα μοντέλα (3.6), (που είναι και το πιο διαδεδομένο μοντέλο) και αυτό του Helly. Τα υπόλοιπα απορρίφθηκαν, γιατί είναι αρκετά πολύπλοκα για τους σκοπούς αυτής της εργασίας-πολλές παράμετροι σχεδιαστή (design parameters), υπολογιστικά πολύπλοκα για προσομοιώσεις μεγάλου αριθμού οχημάτων.

4.2 Μοντέλο (3.6)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το μοντέλο αυτό έχει τη μορφή:

$$\ddot{x}_{j+1}(t + \tau) = \lambda [\dot{x}_j(t) - \dot{x}_{j+1}(t)],$$

Όπου λ είναι ίση με:

$$\lambda = \lambda_o \frac{\dot{x}_{j+1}(t + \tau)^m}{[x_j(t) - x_{j+1}(t)]^l}$$

Οι παράμετροι τ , λ_o , m και l είναι σταθερές που οι τιμές τους καθορίζονται από τον κατασκευαστή του μοντελου, ώστε για κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα να είναι ικανοποιητικά, και να πληρούν τις προϋποθέσεις της παραγράφου 2.1

4.2.1 Επιλογή παραμέτρων

4.2.2.1 Περιβάλλον προσομοίωσης.

Αναλυτική περιγραφή παρουσιάζεται στο 5^ο Κεφάλαιο. Περίληπτικά αναφέρουμε ότι το μικροσκοπικό μοντέλο το χρησιμοποιούμε για τη μελέτη της συμπεριφοράς οχημάτων, τα οποία διασχίζουν μία λεωφόρο μίας λωρίδας κατεύθυνσης. Στη λεωφόρο υπάρχουν τρεις φωτεινοί σηματοδότες, σε διαφορετικές θέσεις κάθε φορά, ανάλογα με την υπο εξέταση περίπτωση. Επίσης η διάρκεια πρασίνου των φωτεινών σηματοδοτών δεν είναι σταθερή, έτσι ώστε να γίνει μια πιο αναλυτική μελέτη για την εξαγωγή πιο ικανοποιητικών αποτελεσμάτων.

4.2.2.2 Καλύτερες Παράμετροι Σχεδιασμού (με βάση τις προϋποθέσεις της παραγράφου 4.1)

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις που θέλουμε και να παίρνουμε καλύτερα αποτελέσματα, είναι οι σταθερές σχεδιαστή m και l καθώς ακόμη και ο χρόνος δειγματοληψίας dt. Οι καλύτερες τιμές των παραμέτρων αυτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

m	0
l	1
dt	0.01

4.3 2^ο Μοντέλο (απλοποιημένο Helly)

Με βάση το απλοποιημένο μοντέλο του Helly αρχικά υπολογίζεται η επιθυμητή ταχύτητα (V_desired) που πρέπει να έχει το όχημα, ώστε να φτάσει σε απόσταση ασφαλείας το προπορευόμενο όχημα σε χρόνο 1/λ. Η επιθυμητή αυτή ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$V_{des}(i)=\lambda*(x(i+1)-x(i)-b),$$

όπου x(i+1) είναι η θέση του προπορευόμενου οχήματος, x(i) η θέση του ακολουθούντος οχήματος, και ο αριθμός έξι (6) είναι η απόσταση ασφαλείας συν το μήκος του οχήματος. Η επιθυμητή ταχύτητα καθορίζεται από τον κατασκευαστή και έχει υπολογιστεί έτσι ώστε να ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες. Σαν δεύτερο βήμα υπολογίζεται η επιτάχυνση που θα πρέπει να έχουν τα οχήματα, έτσι ώστε να φτάσουν στην επιθυμητή ταχύτητα σε χρονικό διάστημα T (=dt). Η επιτάχυνση δίνεται από τη σχέση:

$$a(i)=(1/dt)*(V_{des}(i)-v(i)),$$

όπου dt το χρονικό διάστημα T που αναφέρεται παραπάνω, $V_{des}(i)$ η επιθυμητή ταχύτητα και $v(i)$ η ονομαστική ταχύτητα κάθε οχήματος. Τέλος σαν τρίτο βήμα εισάγουμε τους μη-γραμμικούς περιορισμούς (hard-limiters), ώστε-όπως έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, να μην υπάρχει περίπτωση να παρατηρηθούν τιμές της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, μικρότερες ή μεγαλύτερες από τις καθορισμένες μέγιστες και ελάχιστες τιμές αντίστοιχα.

4.4 Επιλογή μοντέλου

Με βάση τα αποτελέσματα που συλλέξαμε από τη χρησιμοποίηση του μοντέλου (3.6) καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι δεν είναι το κατάλληλο γι' αυτό και καταφύγαμε στην επιλογή του μοντέλου Helly.

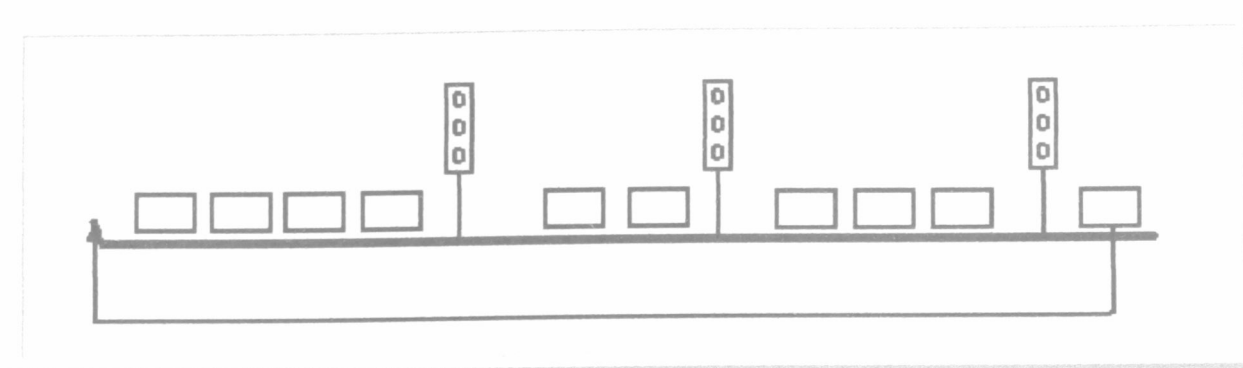
Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι τα αποτελέσματα προσομοίωσης που δίνουν και τα δύο μικροσκοπικά μοντέλα είναι σχεδόν ίδια, όμως το δεύτερο μοντέλο υπερέχει του πρώτου για τους εξής λόγους:

- Ο αριθμός των επαναλήψεων, καθώς και ο χρόνος για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του συστήματος και την εξαγωγή συμπερασμάτων με τη χρησιμοποίηση του πρώτου μοντέλου, είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με το δεύτερο. Το πρώτο μοντέλο δηλαδή είναι αρκετά χρονοβόρο πράγμα το οποίο δεν επιθυμούμε. Αρκεί να αναφέρουμε ότι για τη διακπεραίωση μιας προσομοίωσης του συστήματος με το πρώτο μοντέλο χρειαζόμαστε 80.000 επαναλήψεις και περίπου 8 ώρες, ενώ με το δεύτερο μόλις 4000 επαναλήψεις και 20 λεπτά περίπου.
- Το πρώτο μοντέλο δεν είναι τόσο εύρωστο όσο το δεύτερο στην επιλογή των παραμέτρων. Η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση των οχημάτων καθορίζονται από πολλές σχετικά μεταβλητές, τις τιμές των οποίων καθορίζουμε εμείς με αποτέλεσμα μια μικρή αλλαγή σε κάποια από αυτές να αλλάζει σχεδόν ολοκληρωτικά το αποτέλεσμα. Μάλιστα παρατηρήθηκε ότι για μεγάλες τιμές του χρόνου δειγματοληψίας το μοντέλο γινόταν αριθμητικά ασταθές.

4.4.1 Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης

Το περιβάλλον που θα αναλυθεί παρακάτω αποτελεί μια προσομοίωση συστήματος, που περιλαμβάνει ένα σταθερό τμήμα μιας λεωφόρου και τρεις φωτεινούς σηματοδότες, που είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένα σημεία της λεωφόρου αυτής. Τη λεωφόρο διασχίζουν αυτοκίνητα ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από το χρήστη ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το μήκος της λεωφόρου παραμένει σταθερό και έχει οριστεί ίσο με χίλια οκτακόσια μέτρα. Επίσης τόσο η θέση των φωτεινών σηματοδοτών όσο και η χρονική διάρκεια του πρασίνου, αλλάζουν ανάλογα με την υπό εξέταση περίπτωση.

Η προσομοίωση του μοντέλου γίνεται για τεσσερις χιλιάδες επαναλήψεις. Κάθε αυτοκίνητο που διανύει τη λεωφόρο, περνάει δηλαδή και από τον τρίτο φωτεινό σηματοδότη, θεωρούμε ότι εισέρχεται πάλι σε αυτή και μάλιστα με την αρχική ταχύτητα που είχε πρωτοεισέλθει και με μηδενική επιτάχυνση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.3 Αναπαράσταση λειτουργίας του μοντέλου

Σκοπός του μοντέλου είναι κάθε φορά να υπολογίζει τόσο την ταχύτητα όσο και τη θέση των αυτοκινήτων κάθε χρονική στιγμή. Το μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει πληρεί τις προϋποθέσεις της παραγράφου 2.1. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό αρκεί να αναφέρουμε ότι κατά την προσομοίωση του μοντέλου, στη λεωφόρο που εξετάζουμε (απολείται μόνο από μία λωρίδα κυκλοφορίας) δεν υπάρχει περίπτωση να γίνει κάποια προσπέραση-πράγμα που ούτως ή άλλως είναι αδύνατο- ούτε επίσης η θέση δύο αυτοκινήτων να ταυτίζεται. Το μοντέλο μας δηλαδή είναι έτσι κατασκευασμένο ούτως ώστε να καταλαβαίνει τέτοιου είδους συνθήκες και να μην τις επιτρέπει να συμβαίνουν. Μάλιστα το έχουμε έτσι κατασκευάσει, ώστε η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυτοκινήτων να μη γίνεται ποτέ μικρότερη της απόστασης ασφαλείας που έχουμε ορίσει. Διευκρινιστικά αναφερούμε ότι σαν απόσταση ασφαλείας θεωρούμε την απόσταση εκείνη μεταξύ δύο αυτοκινήτων που εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσής τους, αν ο προπορευόμενος οδηγός σταματήσει για οποιεδήποτε λόγο. Επίσης οι τιμές τόσο της ταχύτητας των οχημάτων όσο και της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης αυτών έχουν επιλεγεί βάση κριτηρίων που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ανάλογα λοιπόν με τις τιμές των μεταβλητών καθορίζεται η συμπεριφορά των αυτοκινήτων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή τους κυκλοφορία στη λεωφόρο και να αποφεύγονται τυχόν μπλοκαρίσματα ή συγκρούσεις μεταξύ των. Στη μελέτη που γίνεται εξετάζονται αρκετές περιπτώσεις έτσι ώστε να βρεθούν οι καλύτερες τιμές των μεταβλητών παραμέτρων που θα μας δώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Γι' αυτό σε κάθε περίπτωση συλλέγουμε τα αποτελέσματα και τα αποδοθέντα διαγράμματα, τα συγκρίνουμε μεταξύ τους και καταλήγουμε στην πιο ρεαλιστική εκδοχή. Ο πηγαίος κώδικας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MAT LAB, version 5.3.

4.4.2 Περιγραφή αλγορίθμου

4.4.2.1 Αρχικοποίηση- καθορισμός παραμέτρων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι παράμετροι του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τρεις είναι οι παράμετροι που αλλάζουμε για κάθε περίπτωση που εξετάζουμε.

- Θέση των φωτεινών σηματοδοτών. Συγκεκριμένα οι περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί είναι:
 1. θέση πρώτου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια μέτρα, δεύτερου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια διακόσια μέτρα και τρίτου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια οκτακόσια μέτρα
 2. θέση πρώτου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια μέτρα, δεύτερου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια τετρακόσια μέτρα και τρίτου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια οκτακόσια μέτρα
 3. θέση πρώτου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια μέτρα, δεύτερου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια εξακόσια μέτρα και τρίτου φωτεινού σηματοδότη στα χίλια οκτακόσια μέτρα

Παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται οι θέσεις του πρώτου και του τρίτου φωτεινού σηματοδότη είναι πάντα ίδια και αυτή που αλλάζει είναι του δεύτερου. Μάλιστα η θέση του κάθε φορά διαφέρει κατά διακόσια μέτρα. Βέβαια στη μελέτη που κάνουμε θα μπορούσαν να εξεταστούν πολλές ακόμη διαφορετικές θέσεις του δεύτερου φωτεινού σηματοδότη, πέρα από τις τυπικές θέσεις των χιλίων διακοσίων, χιλίων τετρακοσίων και χιλίων εξακοσίων μέτρων αντίστοιχα. Στην εργασία όμως που εξετάζουμε, τα αποτελέσματα προσομοίωσης που συλλέξαμε για αυτές τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά με αποτέλεσμα να μη θεωρείται σκόπιμη περαιτέρω ανάλυση που θα έκανε το πρόβλημα πιο πολύπλοκο.

- Αριθμός αυτοκινήτων που διασχίζουν τη λεωφόρο. Πέντε διαφορετικές περιπτώσεις έχουμε εδώ:

N=Αριθμός αυτοκινήτων
50
100
150
200
250

Το μήκος της λεωφόρου που εξετάζουμε είναι χίλια οκτακόσια μέτρα. Επίσης το μήκος των οχημάτων συνυπολογιζόμενης και μίας απόστασης που πρέπει να διατηρούν μεταξύ τους έχει οριστεί στα έξι μέτρα. Εύκολα μπορεί κάποιος να βγάλει το συμπέρασμα ότι ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί να βρίσκονται και να διασχίζουν τη λεωφόρο -δεδομένου ότι έχει μια λωρίδα κατεύθυνσης- είναι τριακόσια. Για το λόγο αυτό ο αριθμός των οχημάτων που εξετάζουμε φτάνει ως και τα διακόσια πενήντα, για να μελετηθούν όλες οι δυνατές περιπτώσεις και να εξαχθούν όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα.

- Χρόνος/ διάρκεια πρασίνου. Οι τιμές της διάρκειας του πρασίνου που έχουμε επιλέξει είναι οι εξής:

$g_tf(i)=\text{Χρόνος/διάρκεια}$ πρασίνου
20 seconds
30 seconds
40 seconds
50 seconds
60 seconds

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι κύκλος (cycle) σε έναν σηματοδοτούμενο κόμβο, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει στον κόμβο αυτό μια πλήρης εναλλαγή stages. Με άλλα λόγια, για ένα συγκεκριμένο φωτεινό σηματοδότη του κόμβου, ο κύκλος είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την έναρξη του πρασίνου του συγκεκριμένου φωτεινού σηματοδότη μέχρι την επομένη έναρξη πρασίνου, του ιδίου φωτεινού σηματοδότη. Στην περίπτωσή μας οι συνθήκες απλοποιούνται, γιατί ουσιαστικά αγνοούμε τους υπόλοιπους φωτεινούς σηματοδότες του κόμβου. Δεν υπάρχει περίπτωση δηλαδή, -για παράδειγμα στην περίπτωση του δεύτερου φωτεινού σηματοδότη- όταν η ένδειξή του είναι κόκκινο να εισέλθουν στη λεωφόρο άλλα οχήματα ή να τη διασχίσουν πεζοί.

Ο κύκλος στην συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζουμε έχει οριστεί στα εβδομήντα δευτερόλεπτα (70 seconds), που είναι τυπικός κύκλος σε οδικά δίκτυα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας κύκλος μπορεί να πάρει τιμές έως και εκατόν σαράντα δευτερόλεπτα (140 seconds), αλλά στην περίπτωσή μας η ορισμένη τιμή είναι η κατάλληλη λόγω της απλοποιημένης μορφής του προβλήματος.

Offset: Σαν offset θεωρούμε το χρόνο που απαιτείται για να διασχίσει ένα όχημα σε τυπικές κυκλοφοριακές συνθήκες την απόσταση μεταξύ δύο φωτεινών σηματοδοτών. Το offset(1) παίρνει τη μηδενική τιμή, διότι μέχρι τα αυτοκίνητα να φτάσουν στον πρώτο φωτεινό σηματοδότη δεν έχουν περάσει από άλλο σημείο αναφοράς. Το offset(2) παίρνει τιμές που μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση που βρίσκονται ο πρώτος και ο δεύτερος φωτεινός σηματοδότης. Έτσι η τιμή του πάντα είναι το πηλίκο της διαφοράς μεταξύ της θέσης του δεύτερου φωτ. σηματοδότη πλὴν του πρώτου, προς την ονομαστική ταχύτητα του οχήματος. Όμοια υπολογίζεται και η τιμή του offset(3). Την παράμετρο αυτή θα μπορούσαμε να μην την χρησιμοποιήσουμε καθόλου στο πρόβλημά μας, αν εξετάζαμε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (δεν υπάρχουν ουρές στον κατάντη σύνδεσμο οι οποίες θα καθυστερούσαν το πράσινο κύμα των οχημάτων). Κάτω από τις συνθήκες της προσομοίωσης, ο τρόπος υπολογισμού του offset δεν είναι βέλτιστος μιας και θα απαιτούνταν έλεγχος του offset σε πραγματικό χρόνο- ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες – αλλά κάτι τέτοιο είναι πέρα από τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

4.4.2.2 Παράμετροι μοντέλου

Οι παράμετροι του μοντέλου αυτού είναι η ονομαστική ταχύτητα των οχημάτων (init_v), η σταθερά σχεδιαστή λ η οποία ορίζεται από το λόγο 1/headway, όπου headway είναι ο χρόνος που απαιτείται από το ακολουθών όχημα για να φτάσει στην τωρινή θέση που βρίσκεται το προπορευόμενο όχημα, η μέγιστη επιτάχυνση και

επιβράδυνση του οχήματος (max_accel και max_decel αντίστοιχα), και η αρχική απόσταση μεταξύ δύο οχημάτων μόλις αυτά εισέρχονται στη λεωφόρο (init_dist). Εδώ σημειώνουμε ότι οι τιμές των παραμέτρων καθορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες. Μάλιστα οι τιμές της ταχύτητας και της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης επιλέχθησαν από περιοδικά που μελετούν τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις/δυνατότητες των οχημάτων που κυκλοφορούν στην αγορά αυτή την περίοδο. Αυτό έγινε, ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά.

Οι παράμετροι του μοντέλου και οι τιμές τους αντίστοιχα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Συμβολισμός	Παράμετροι	Τιμή
No_ iterations	αριθμός των επαναλήψεων	4000
N_tf	Αριθμός φωτεινών σηματοδοτών	3
Cycle Time	Χρονικός κύκλος	70sec
distance_observation	Σημείο που ο οδηγός αρχίζει να βλέπει το φανάρι	50m
Offset	Χρόνος που απαιτείται για τη διάσχιση μεταξύ δύο φωτεινών σηματοδοτών	Εξαρτάται από τη θέση των φωτ. σηματοδοτών σε κάθε περίπτωση
offset(1)		0
offset(2)		(x_tf(2)-x_tf(1))/(50*(1000/3600))
offset(3)		(x_tf(3)-x_tf(2))/(50*(1000/3600))
init_v	Ονομαστική ταχύτητα αυτοκινήτων	50*(1000/3600) m/sec
λ	Σταθερά σχεδιαστή	0.5 headway=2 seconds
dt	Σταθερά σχεδιαστή	0.5
max_decel	Μέγιστη επιβράδυνση	-6
Max_accel	Μέγιστη επιτάχυνση	1.5
init_dist	Αρχική απόσταση μεταξύ 2 αυτοκινήτων	10
t_cycle(i)	Χρόνος που πέρασε από την τελευταία έναρξη του κύκλου του i-οστού φωτεινού σηματοδότη	Παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με την υπό εξεταζόμενη περίπτωση
j_min(i)	Δείκτης του αυτοκινήτου που είναι πιο κοντά στο i φανάρι	

$x_{\min}(i)$	Θέση του $j_{\min}(i)$	
---------------	------------------------	--

4.4.2.3 Περιγραφή υποσυστημάτων /Ανάλυση κώδικα

Πριν αρχίσουμε την προσομοίωση της κίνησης του 1^{ου} αυτοκινήτου, θεωρούμε σαν αρχική θέση τη μηδενική και ορίζουμε τη θέση, που θα έχει το κάθε ένα από τα αυτοκίνητα με συγκεκριμένη, ίδια ταχύτητα και μηδενική επιτάχυνση. Στη μηδενική αυτή θέση ξεκινά και ο χρονικός κύκλος. Στόχος, για κάθε χρονική στιγμή ο υπολογισμός της θέσης και της ταχύτητας των αυτοκινήτων.

```
for i=1:N-1,
    x(i+1)=[x(i)+init_dist];
end
for i=1:N,
    v(i)=init_v;
    xold(i)=x(i);
    vold(i)=v(i);
    a(i)=0;
end
```

Ξεκινώντας τη μελέτη της κινήσεως, υπολογίζουμε το χρόνο που πέρασε από την αρχή του κύκλου. Αν αυτός είναι μικρότερος από το χρόνο διάρκειας του πρώτου φωτεινού σηματοδότη -ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζουμε-τότε θεωρούμε ότι αυτός είναι πράσινος, διαφορετικά κόκκινος.

```
for loop=1:No_Iterations,
    t=((loop-1)*dt);
    t_cycle(1)=mod(t,cycle);
    if t_cycle(1)<g_tf(1);
        status_tf(1)=1;
    else
        status_tf(1)=0;
    end
end
```

Συνεχίζοντας, εξετάζουμε την περίπτωση, το πρώτο όχημα να συναντήσει τον δεύτερο ή τον τρίτο φωτεινό σηματοδότη. Στην περίπτωση αυτή, αν ο χρόνος που πέρασε από την αρχή του κύκλου ($t_{\text{cycle}}(1)$) είναι μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειάζεται το αυτοκίνητο να διασχίσει την απόσταση, τότε ο χρόνος $t_{\text{cycle}}(i)$ ορίζεται σαν η διαφορά μεταξύ του $t_{\text{cycle}}(1)$ και του $\text{offset}(i)$. Αλλιώς ο χρόνος $t_{\text{cycle}}(i)$ ορίζεται σαν η διαφορά μεταξύ του αθροίσματος του $t_{\text{cycle}}(1)$ και του χρονικού κύκλου cycle πλην του $\text{offset}(i)$.

Ο ορισμός εδώ γίνεται διότι στην περίπτωση που ο χρόνος $t_cycle(i)$ είναι μικρότερος του χρόνου διάρκειας του 2^{ου} ή του 3^{ου} φαναριού τότε αυτό να θεωρηθεί ότι είναι κόκκινο αλλιώς πράσινο.

```
for i=2:N_tf,
    if t_cycle(1)>offset(i)
        t_cycle(i)=t_cycle(1)-offset(i);
    else
        t_cycle(i)=t_cycle(1) + cycle-offset(i);
    end

    if t_cycle(i)<g_tf(i);
        status_tf(i)=1;
    else
        status_tf(i)=0;
    end
end
```

Υπολογισμός θέσης και ταχύτητας οχημάτων σε σχέση με την απόστασή τους από τους φωτεινούς σηματοδότες.

Στο σημείο αυτό περνάμε στην εξέταση της συμπεριφοράς των οχημάτων σε σχέση με την απόστασή τους από τον φωτεινό σηματοδότη και την ένδειξη αυτού. Για το λόγο αυτό ορίζουμε τις παραμέτρους $j_min(i)$ και $x_min(i)$ που δηλώνουν το δείκτη του οχήματος που είναι πιο κοντά στο φωτεινό σηματοδότη και τη θέση του οχήματος αντίστοιχα. Η μεταβλητή i παίρνει τιμές μεταξύ ένα και τρία, όσοι δηλαδή είναι και οι φωτεινοί σηματοδότες. Ανάλογα τώρα σε ποιον φωτεινό σηματοδότη κοντά είναι το κάθε όχημα και ποια ένδειξη έχει αυτός καθορίζεται η θέση και η ταχύτητα του οχήματος.

```
for i=1:N_tf,
    x_min(i)=0;
    j_min(i)=0;
    for j=1:N,
        if x(j)<=x_tf(i) & x(j)>x_min(i)
            if i==1
                x_min(i)=x(j);
                j_min(i)=j;
            else
```



```

        if x(j)>x_tf(i-1)
            x_min(i)=x(j);
            j_min(i)=j;
        end
    end
end
end
end

```

Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις συμπεριφοράς του οχήματος που περνά για πρώτη φορά από τους φωτεινούς σηματοδότες μόλις ξεκινά η προσομοίωση του μοντέλου. Ανάλογα με την απόστασή του από τον κάθε φωτεινό σηματοδότη έχουμε :

1. Περίπτωση που ο φωτεινός σηματοδότης έχει σαν ένδειξη κόκκινο. Επίσης το όχημα έχει μεγαλύτερη απόσταση από τη διαφορά θέσης του φωτεινού σηματοδότη και της απόστασης παρατήρησης αλλά και μικρότερη απόσταση δύο μέτρων από τη θέση του φωτεινού σηματοδότη. Στην περίπτωση αυτή αν το όχημα έχει κάποια ταχύτητα(η οποία είναι μεγαλύτερη της τιμής του 0.1m/sec τιμή που εμείς έχουμε ορίσει) τότε αυτό αρχίζει να επιβραδύνει και μάλιστα θεωρούμε ότι αυτό γίνεται με τη μέγιστη επιβράδυνση.
2. Περίπτωση που ο φωτεινός σηματοδότης έχει σαν ένδειξη κόκκινο. Επίσης το όχημα έχει μεγαλύτερη απόσταση από τη διαφορά θέσης του φωτεινού σηματοδότη και της απόστασης παρατήρησης αλλά και μικρότερη απόσταση δύο μέτρων από τη θέση του φωτεινού σηματοδότη. Στην περίπτωση αυτή αν το όχημα έχει κάποια ταχύτητα(η οποία είναι μικρότερη της τιμής του 0.1m/sec τιμή που εμείς έχουμε ορίσει) τότε θεωρούμε ότι έχει μηδενική ταχύτητα και επιτάχυνση, είναι δηλαδή σταματημένο.
3. Περίπτωση που ο φωτεινός σηματοδότης έχει σαν ένδειξη κόκκινο. Αν η απόσταση του οχήματος είναι μεγαλύτερη των δύο μέτρων από το φωτεινό σηματοδότη και έχει κάποια ταχύτητα τότε θεωρούμε ότι διατηρεί αυτήν την ταχύτητα οπότε και περνά το φανάρι.
4. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση από τις παραπάνω θεωρούμε ότι το όχημα θα συνεχίσει κανονικά την πορεία του με την ίδια σταθερή ταχύτητα που είχε.

```

for j=1:N_tf,
    if N==j_min(j) & x(N)>x_tf(j)-distance_observation(j)
        &x(N)<x_tf(j)-2 & status_tf(j)==0 & v(N)>0.1
            % a(N)=(x_tf(j)-2-x(N)-v(N)*(1+n_1*dt))/(sum_n_1*dt^2);
            a(N)=max_decel;
            break
        elseif N==j_min(j) & status_tf(j)==0 & v(N)<0.1
            a(N)=0;
            v(N)=0;
            break
        elseif N==j_min(j) & status_tf(j)==0 & v(N)>0 & x(N)>x_tf(j)-2
            a(N)=0;
            break
        else
            a(N)=0;
            v(N)=init_v;
        end
    end
end

```

```

end
v(N)=v(N)+dt*a(N);
x(N)=x(N)+dt*v(N);

```

η ταχύτητα και η επιτάχυνση του οχήματος θα δίνονται από τις σχέσεις:

```

v(N)=v(N)+dt*a(N);
x(N)=x(N)+dt*v(N);

```

Όμοια τώρα εξετάζουμε τη συμπεριφορά των οχημάτων που θα ακολουθήσουν. Διακρίνουμε και εδώ τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Περίπτωση που ο φωτεινός σηματοδότης έχει σαν ένδειξη κόκκινο. Επίσης το όχημα έχει μεγαλύτερη απόσταση από τη διαφορά θέσης του φωτεινού σηματοδότη και της απόστασης παρατήρησης αλλά και μικρότερη απόσταση δύο μέτρων από τη θέση του φωτεινού σηματοδότη. Στην περίπτωση αυτή αν το όχημα έχει κάποια ταχύτητα(η οποία είναι μεγαλύτερη της τιμής του 0.1m/sec τιμή που εμείς έχουμε ορίσει) τότε αυτό αρχίζει να επιβραδύνει και μάλιστα θεωρούμε ότι αυτό γίνεται με τη μέγιστη επιβράδυνση.
2. Περίπτωση που ο φωτεινός σηματοδότης έχει σαν ένδειξη κόκκινο. Επίσης το όχημα έχει μεγαλύτερη απόσταση από τη διαφορά θέσης του φωτεινού σηματοδότη και της απόστασης παρατήρησης αλλά και μικρότερη απόσταση δύο μέτρων από τη θέση του φωτεινού σηματοδότη. Στην περίπτωση αυτή αν το όχημα έχει κάποια ταχύτητα(η οποία είναι μικρότερη της τιμής του 0.1m/sec τιμή που εμείς έχουμε ορίσει) τότε θεωρούμε ότι έχει μηδενική ταχύτητα και επιτάχυνση, είναι δηλαδή σταματημένο.
3. Αν η απόσταση του οχήματος είναι μεγαλύτερη των δύο μέτρων από το φωτεινό σηματοδότη του οποίου η ένδειξη είναι κόκκινο και έχει κάποια ταχύτητα τότε θεωρούμε ότι είναι σταματημένο
4. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ισχύει το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος θα δίνεται από τη σχέση :

$$V_{des}(i) = \lambda * (x(i+1) - x(i) - 7) \quad \text{όπου}$$

λ είναι η σταθερά σχεδιαστή που ισούται με το λόγο 1/headway όπου headway ο χρόνος που απαιτείται από το ακολουθών όχημα για να φτάσει στην τωρινή θέση που βρίσκεται το προπορευόμενο όχημα
 $x(i)$ είναι η θέση του συγκεκριμένου οχήματος
 $x(i+1)$ είναι η θέση του προπορευόμενου οχήματος και
ο αριθμός 6 είναι η απόσταση ασφαλείας συν το μήκος του αυτοκινήτου.

Αν τώρα η επιθυμητή ταχύτητα (V_{des}) πάρει τιμή μεγαλύτερη από αυτή που εμείς έχουμε ορίσει(συγκεκριμένα $V_{des}(i) > 90 * (1000/3600)$) τότε αμέσως την κάνουμε ίση με $90 * (1000/3600)$

Όμοια τώρα η επιτάχυνση/επιβράδυνση του οχήματος δίνεται από τη σχέση:

$$a(i) = (1/dt) * (V_{des}(i) - v(i)) \text{ όπου}$$

V_{des} η επιθυμητή ταχύτητα και
 $v(i)$ η ταχύτητα που έχει

και εδώ αν η επιτάχυνση/επιβράδυνση πάρει τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη αντίστοιχα από την καθορισμένη τότε αμέσως γίνεται ίση με την καθορισμένη τιμή.

Με βάση λοιπόν το μοντέλο αυτό η νέα ταχύτητα του μοντέλου θα είναι ίση με :

$$v(i) = v(i) + dt * a(i)$$

αν σε κάποια περίπτωση η ταχύτητα πάρει αρνητική τιμή τότε τη θεωρούμε ίση με το μηδέν.

Καθώς επίσης η νέα του θέση θα δίνεται από τη σχέση:

$$x(i) = x(i) + dt * v(i)$$

```
for i=N-1:-1:1,
    for j=1:N_tf,
        if i==j_min(j) & x(i)>x_tf(j)-distance_observation(j)
        & x(i)<x_tf(j)-2 & status_tf(j)==0 & v(i)>0.1
            %a(i)=(x_tf(j)-2-x(i)-v(i)*(1+n_1*dt))/(sum_n_1*dt^2);
            a(i)=max_decel;
            break
        elseif i==j_min(j) & status_tf(j)==0 & v(i)<0.1
            a(i)=0;
            v(i)=0;
            break;
        elseif i==j_min(j) & status_tf(j)==0 & v(i)>0 & x(i)>x_tf(j)-2
            a(i)=0;
            v(i)=0;
            break
    else
        Vdes(i)=lambda*(x(i+1)-x(i)-7);
        if Vdes(i)>90*(1000/3600)
            Vdes(i)=90*(1000/3600);
        end
        a(i)=(1/dt)*(Vdes(i)-v(i));
        if a(i)<max_decel
            a(i)=max_decel;
```

```

        end
        if a(i)>max_accel
            a(i)=max_accel;
        end
    end
end
end
v(i)=v(i)+dt*a(i);
if v(i)<0
    v(i)=0;
end
x(i)=x(i)+dt*v(i);
end

```

Έλεγχος λίγο μετά τον τρίτο φωτεινό σηματοδότη

Όταν το N-οστό αυτοκίνητο(προπορευόμενο όχημα) περάσει και τον τρίτο φωτεινό σηματοδότη, τότε αμέσως θεωρείται ως πρώτο ενώ αυτό που το ακολουθούσε (N-1) γίνεται αμέσως N κ.ο.κ. Μάλιστα η νέα του θέση είναι η μηδενική, η ταχύτητά του ίση με init_v και η επιτάχυνσή του επίσης μηδενική. Διασχίζει δηλαδή ξανά τη λεωφόρο.

```

if x(N)>x_tf(N_tf)+0.5

    for i=N:-1:2,
        x(i)=x(i-1);
        v(i)=v(i-1);
        a(i)=a(i-1);
    end
    x(1)=0;
    v(1)=init_v;
    a(1)=0;
end

```

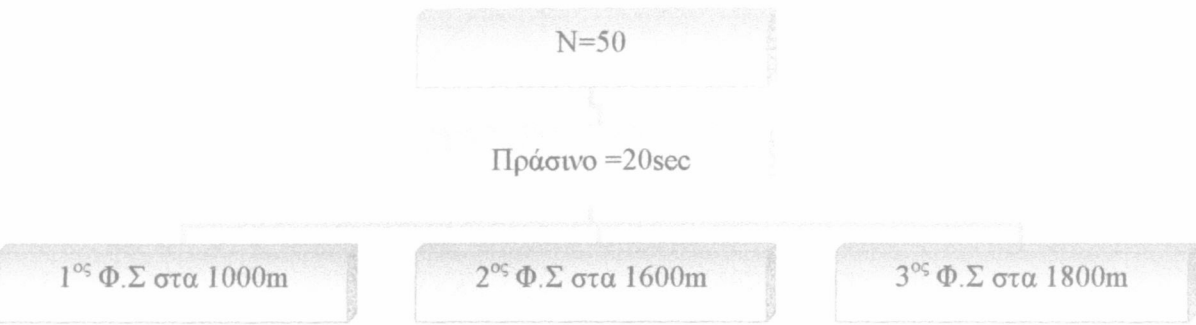
4.4.3 Επαλήθευση του μοντέλου

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια διαγράμματα θέσης, ταχύτητας, και επιτάχυνσης των οχημάτων σε σχέση με το χρόνο, για τέσσερις διαφορετικές προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Helly. Με βάση τα διαγράμματα αυτά εξάγονται κάποια συγκεκριμένα συμπεράσματα, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο δημιουργίας ουράς σε κάποιο μήκος του συνδέσμου, του τί συμβαίνει όταν ο φωτεινός σηματοδότης έχει ενδειξη πράσινο ή

κόκκινο κτλ. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια διαγράμματα που απεικονίζουν τη θέση των οχημάτων σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

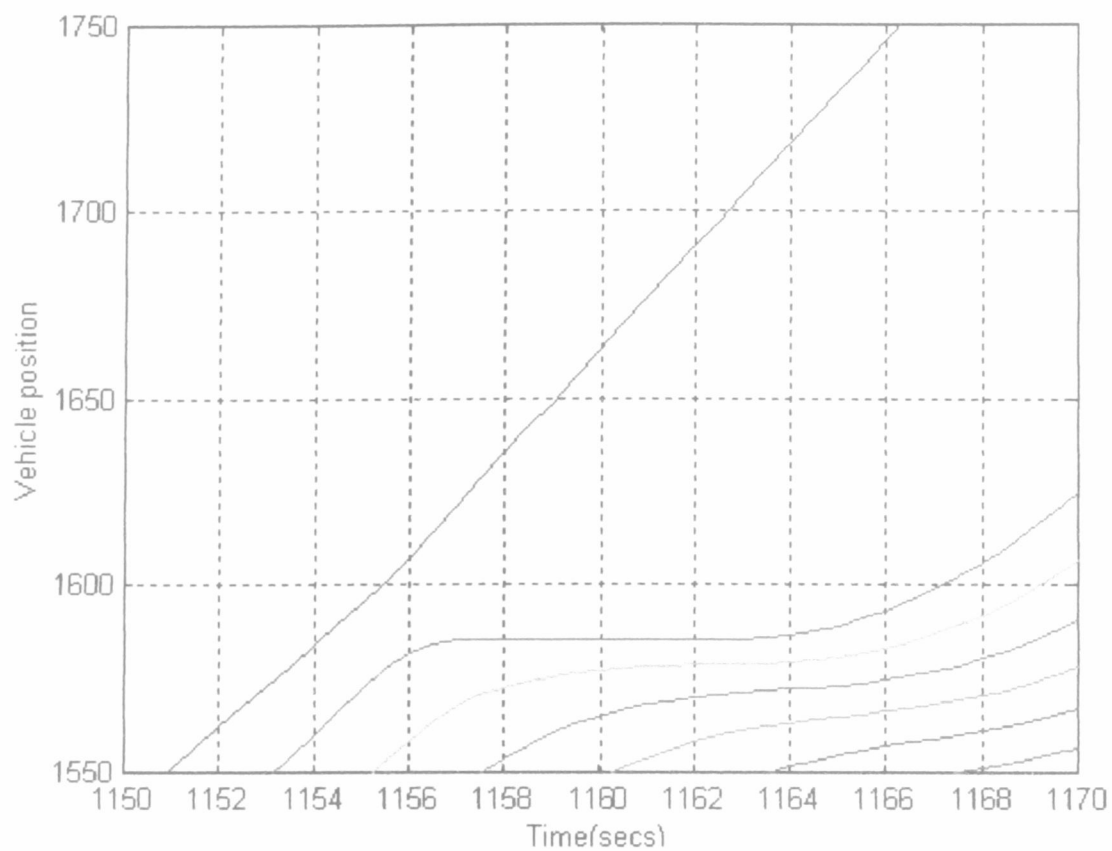
4.4.3.1 Περίπτωση ένδειξης κόκκινου από το φωτεινό σηματοδότη.

Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πρασίνου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.

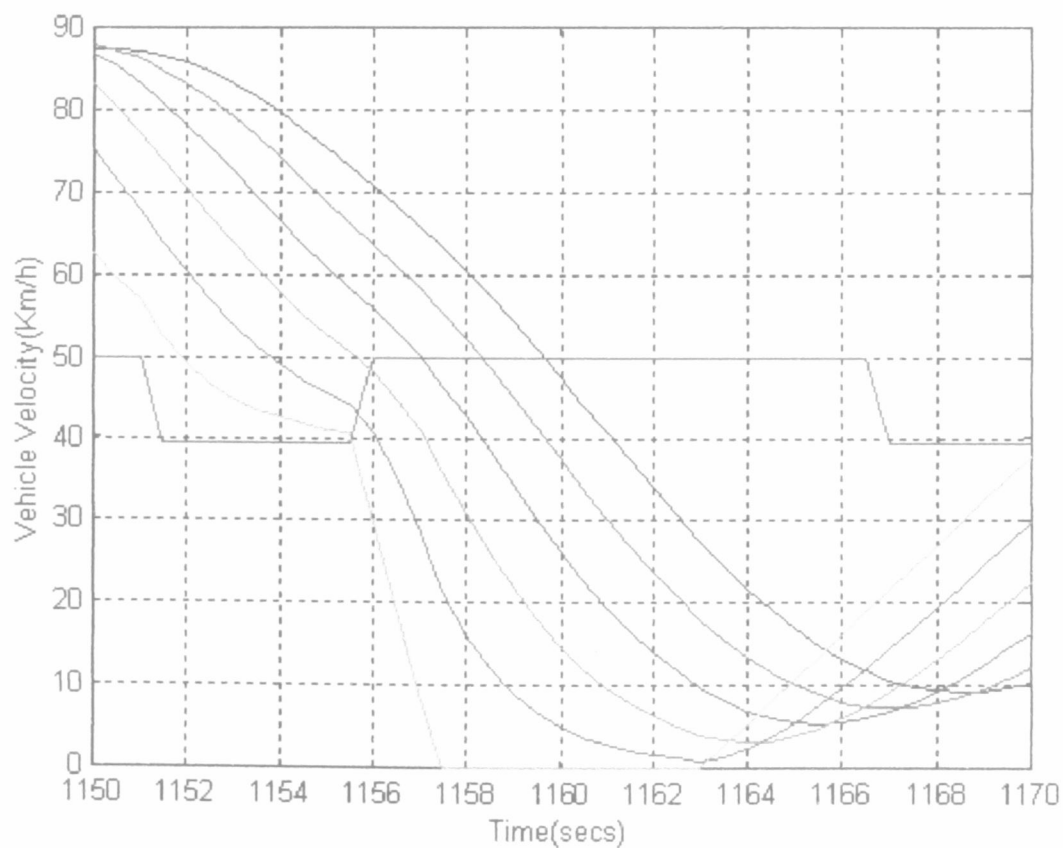


Σχήμα 4.4 Τιμές παραμέτρων

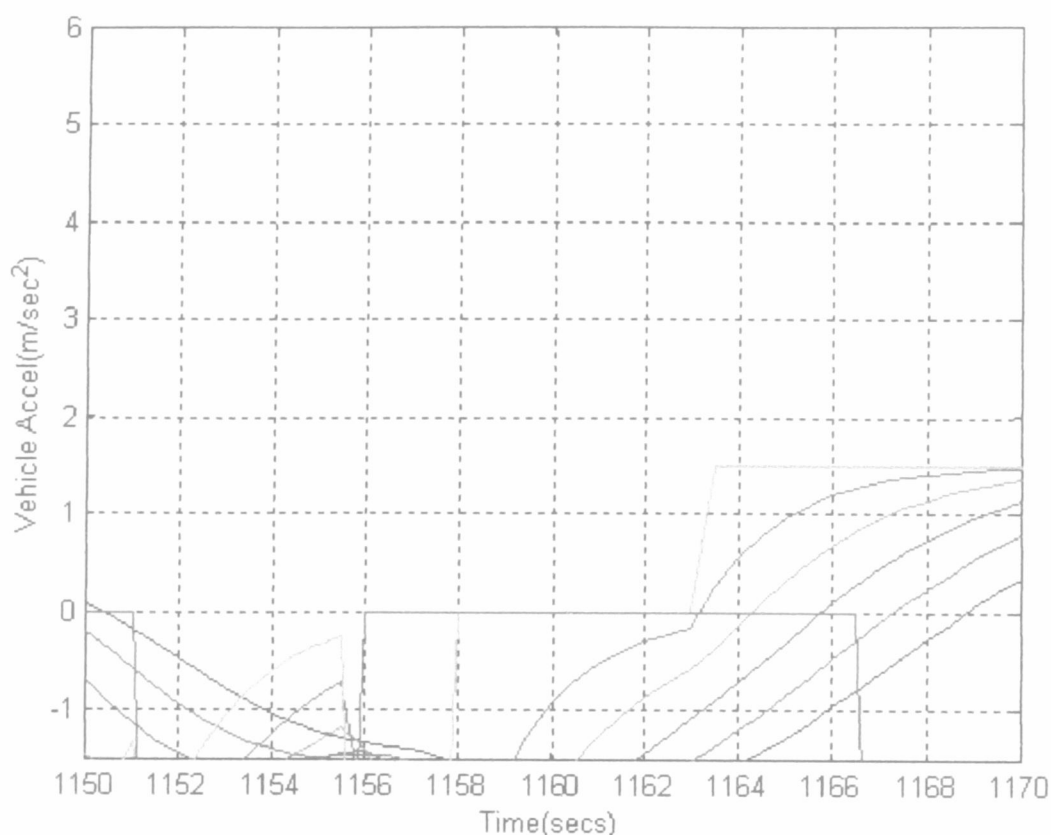
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούμε ότι στο χρονικό διάστημα 1150-1170 secs, ενώ, το όχημα που παριστάνεται με μπλε χρώμα περνά από το φωτεινό σηματοδότη (που βρίσκεται στα 1600 μέτρα), τα υπόλοιπα παραμένουν για ένα χρονικό διάστημα στην ίδια περίπου θέση έως ότου ξεκινήσουν πάλι την ανοδική τους πορεία. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι το όχημα που παριστάνεται με μπλε χρώμα, συναντά πράσινο και περνά, ενώ τα υπόλοιπα συναντούν κόκκινο και ελαττώνουν την ταχύτητά τους και σταματούν. Παρακάτω παρουσιάζονται, εκτός από τη θέση, τόσο η ταχύτητα όσο και η επιτάχυνση/επιβράδυνση των οχημάτων, σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 4.5 Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1150-1170 seconds



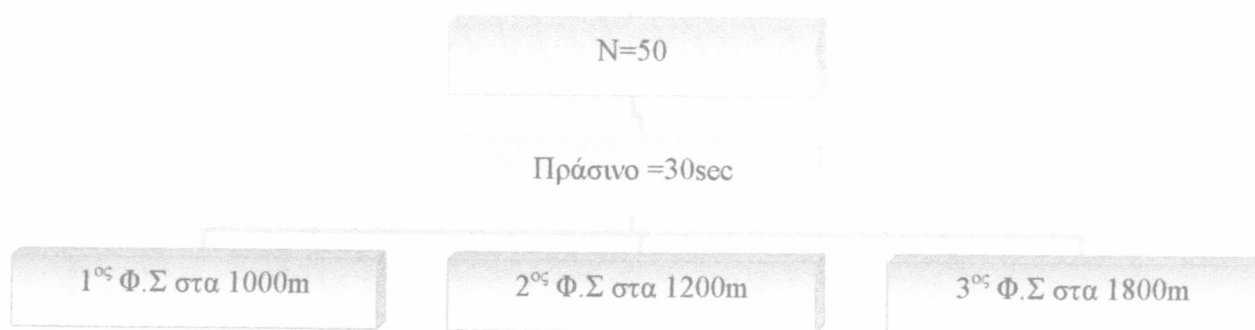
Σχήμα 4.6 Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1150-1170 seconds



Σχήμα 4.7 Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1150-1170 seconds

4.4.3.2 Περίπτωση διαφορετικής ένδειξης του φωτεινού σηματοδότη

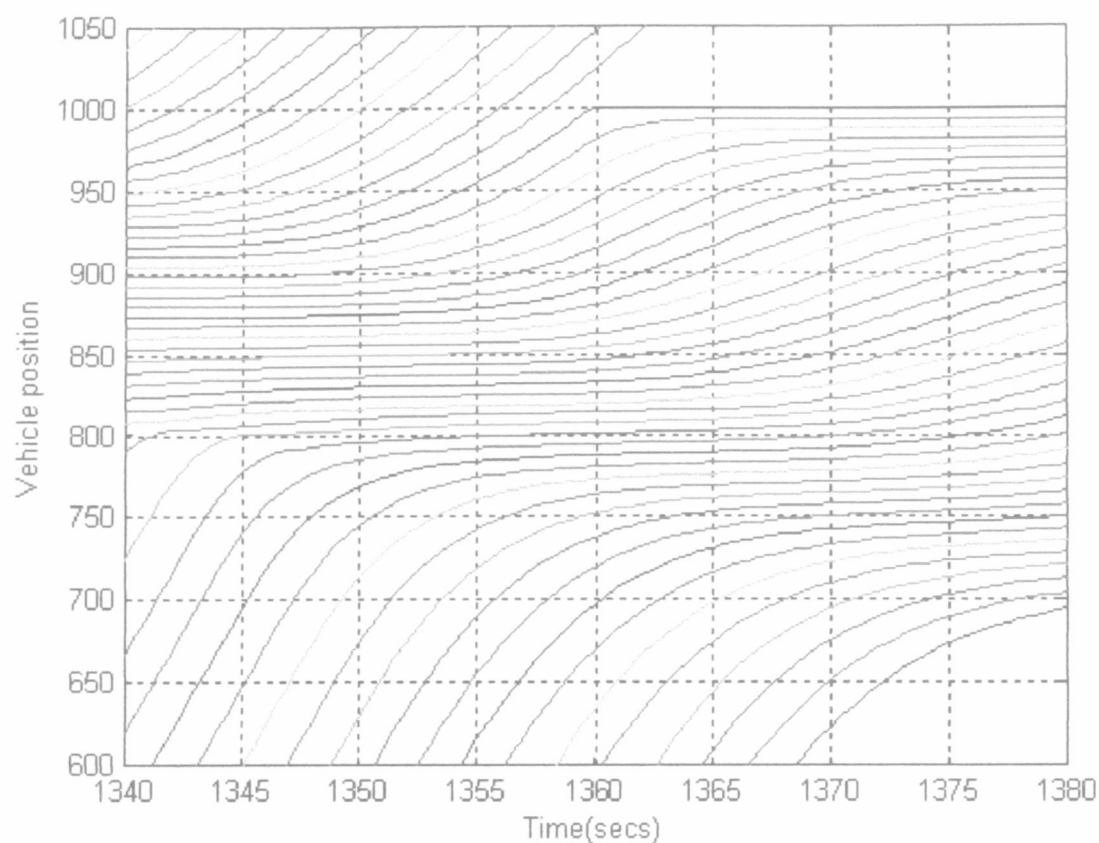
Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πράσινου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.



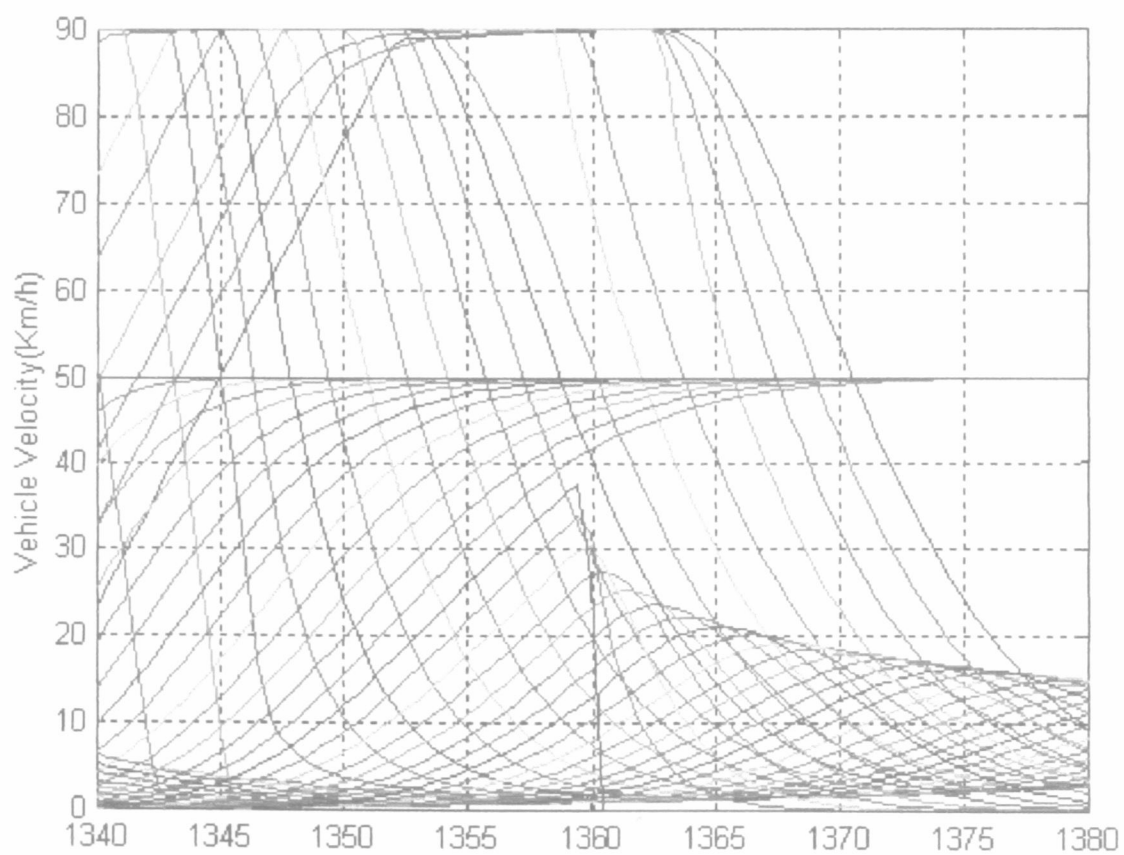
Σχήμα 4.8 Τιμές παραμέτρων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούμε ότι στο χρονικό διάστημα 1340-1360 secs, κάποια οχήματα «βρίσκουν» τον φωτεινό σηματοδότη (που είναι στα 1200 μέτρα), με ένδειξη πράσινο και τον περνούν. Τη χρονική στιγμή 1360 η ένδειξη είναι κόκκινο με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα να παραμένουν για ένα χρονικό διάστημα στην ίδια περίπου θέση. Μάλιστα ερχόμενα οχήματα βλέπουν τα σταματημένα οχήματα και αρχίζουν να ελαττώνουν την ταχύτητά τους. Παρακάτω παρουσιάζονται, εκτός

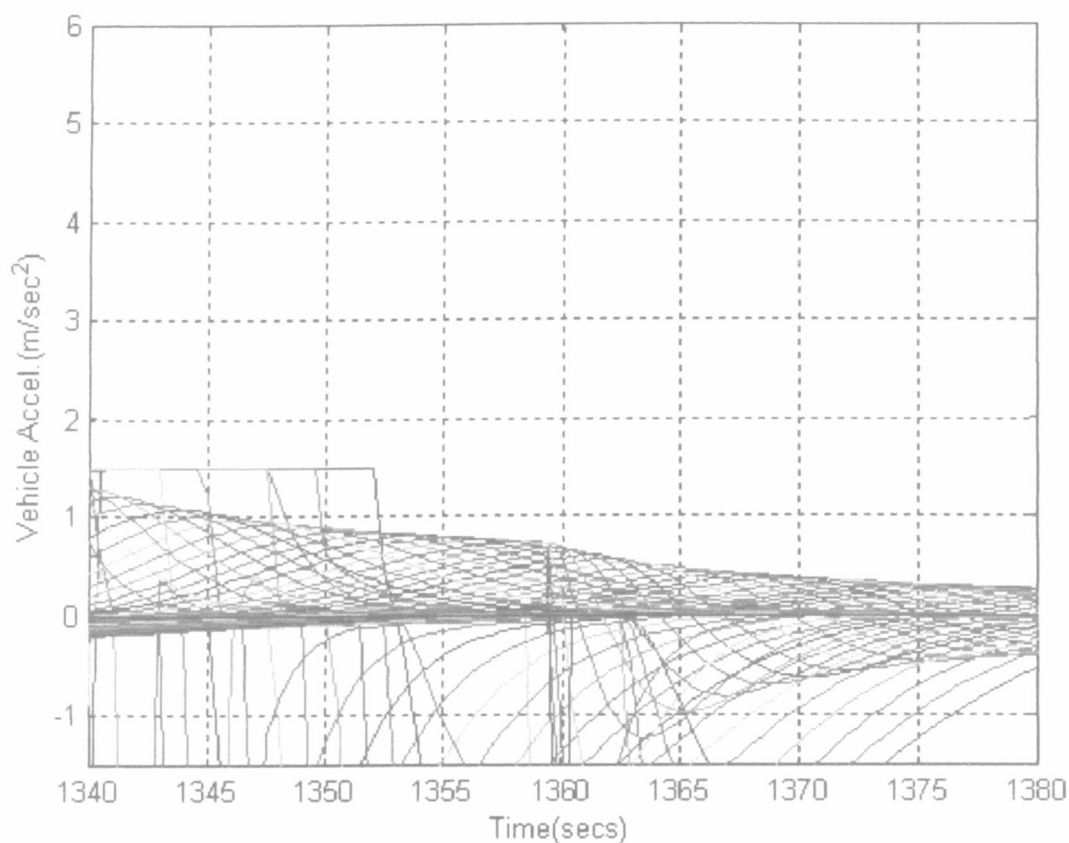
από τη θέση, τόσο η ταχύτητα όσο και η επιτάχυνση/επιβράδυνση των οχημάτων, σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 4.9 Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1340-1380 seconds



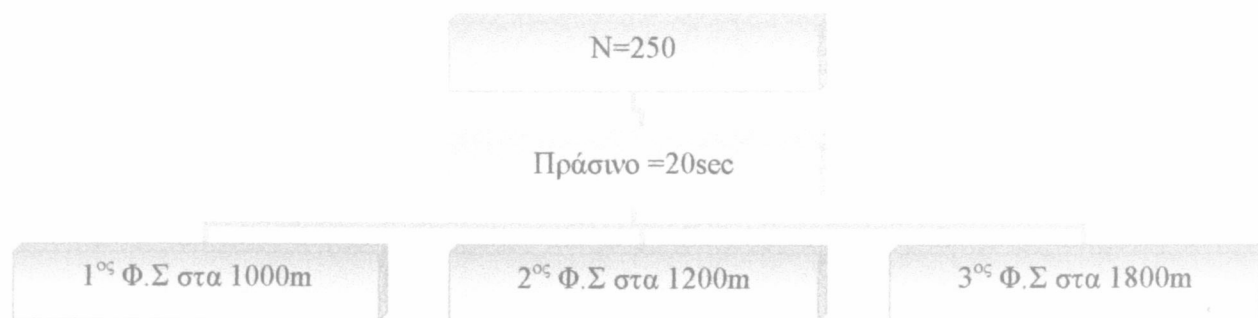
Σχήμα 4.10 Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1340-1380 seconds



Σχήμα 4.11 Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 1340-1380 seconds

4.4.3.3 Περίπτωση εμφάνισης ουράς

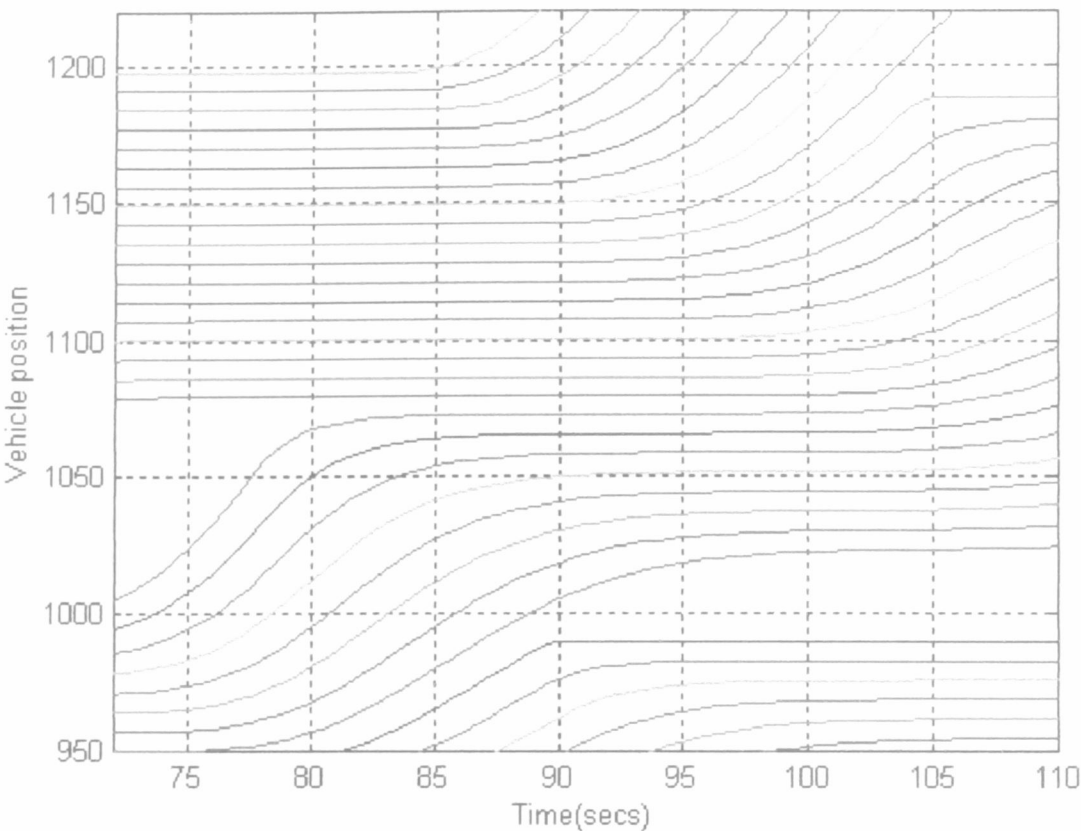
Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πρασίνου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.



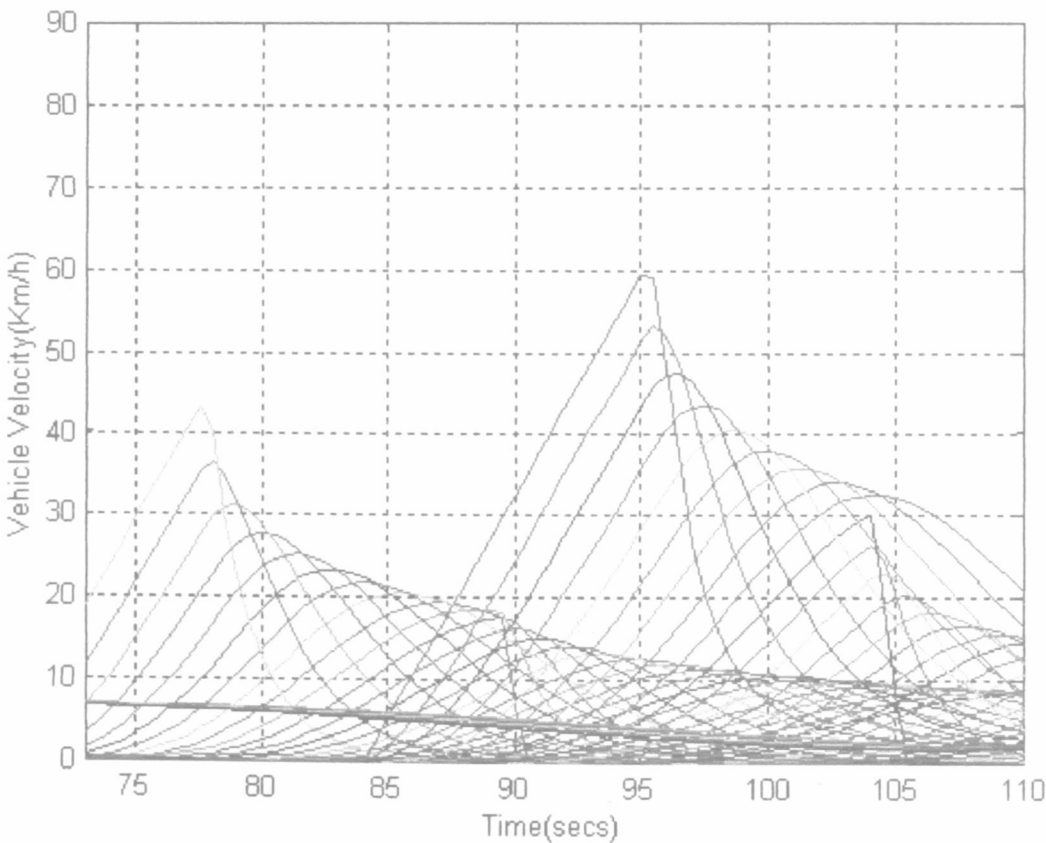
Σχήμα 4.12 Τιμές παραμέτρων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούμε ότι στο σύνδεσμο υπάρχουν ήδη σταματημένα οχήματα μπροστά από το φωτεινό σηματοδότη (που βρίσκεται στα 1200 μέτρα). Ερχόμενα οχήματα βλέπουν τα ήδη σταματημένα και ελαττώνουν ταχύτητα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ουράς στο σύνδεσμο. Παρακάτω

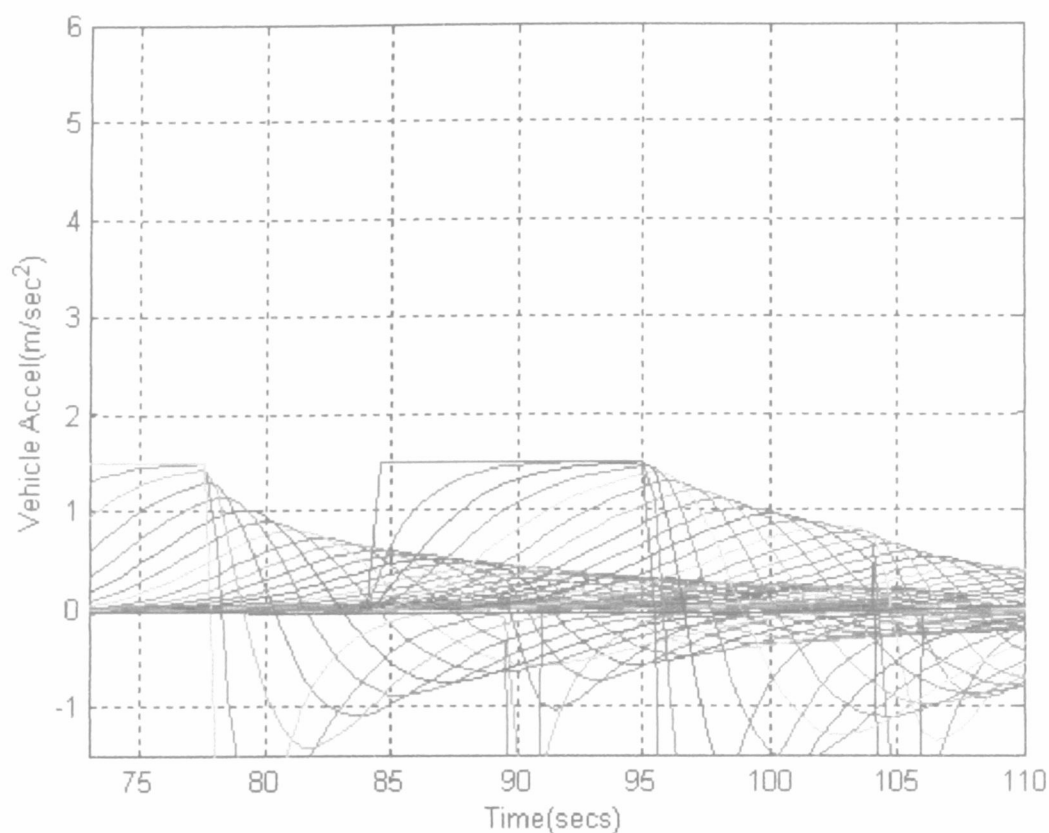
παρουσιάζονται, εκτός από τη θέση, τόσο η ταχύτητα όσο και η επιτάχυνση/επιβράδυνση των οχημάτων, σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 4.13 Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 73-110 seconds



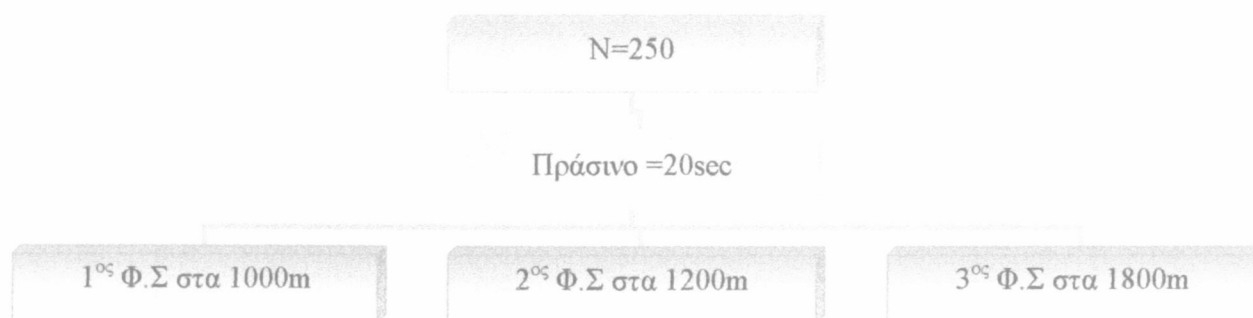
Σχήμα 4.14 Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 73-110 seconds



Σχήμα 4.15 Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 73-110 seconds

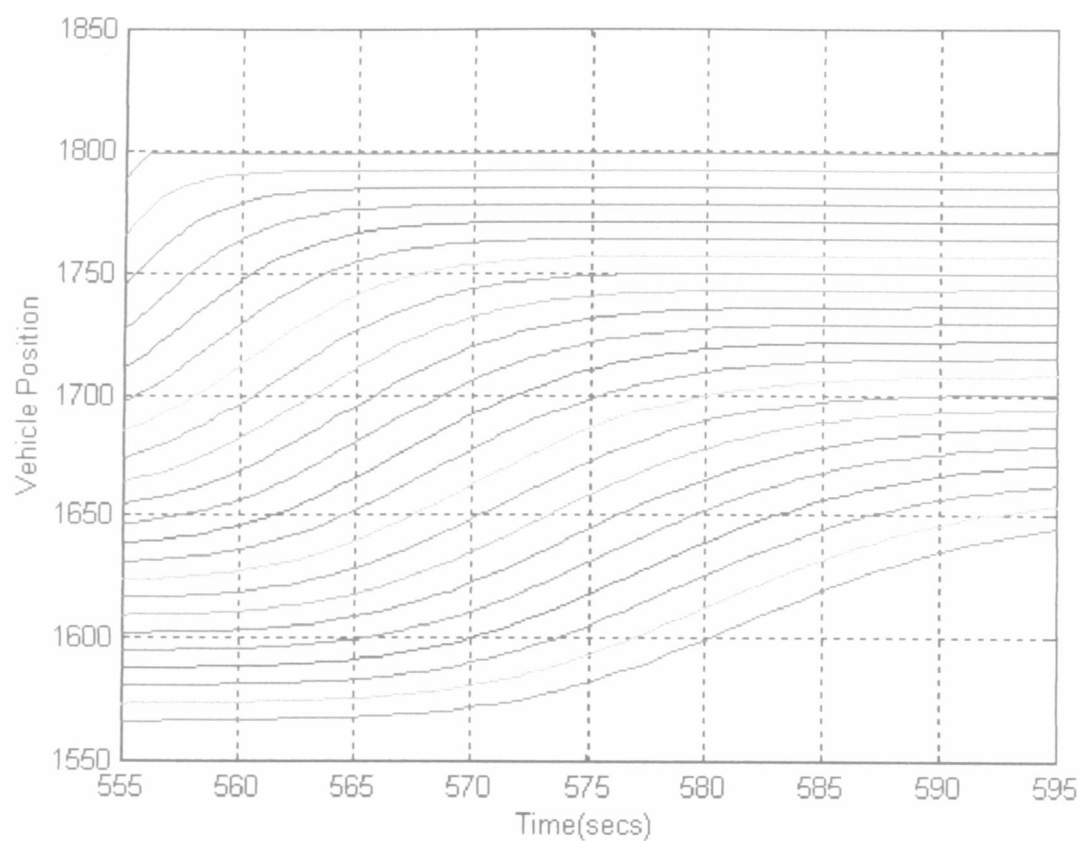
4.4.3.4 Περίπτωση εμφάνισης ουράς στο τέλος του συνδέσμου

Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πρασίνου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.

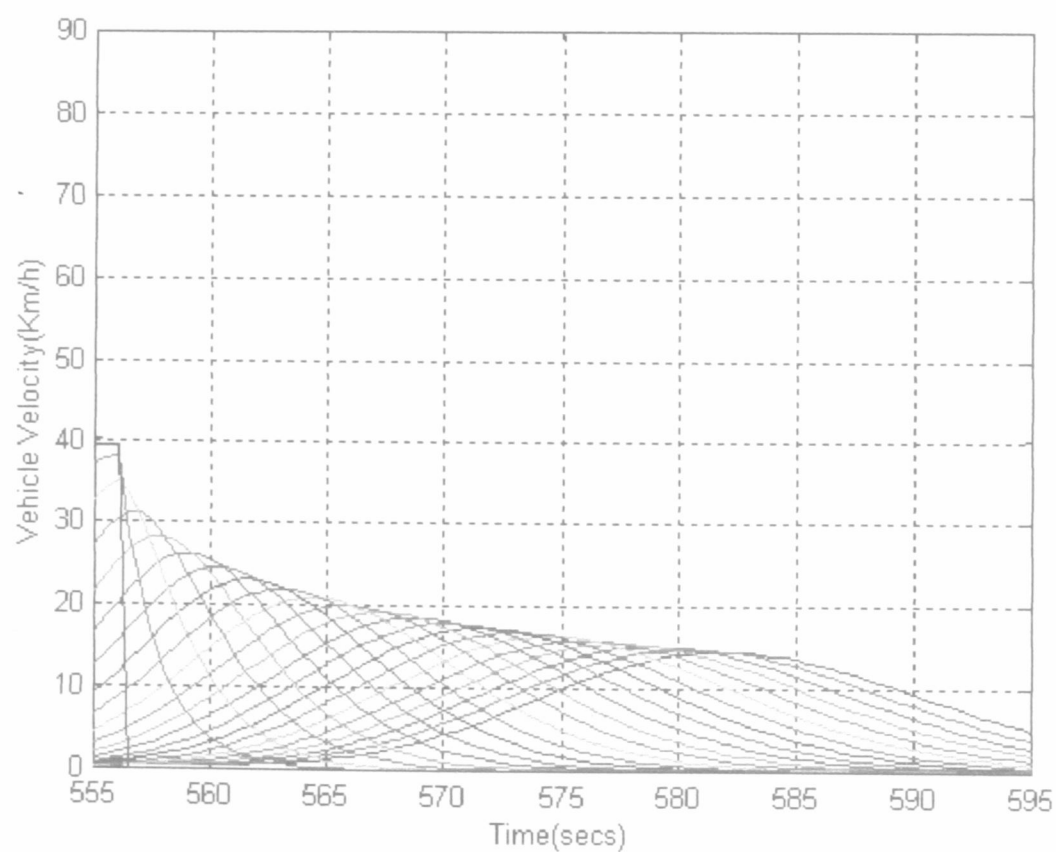


Σχήμα 4.16 Τιμές παραμέτρων

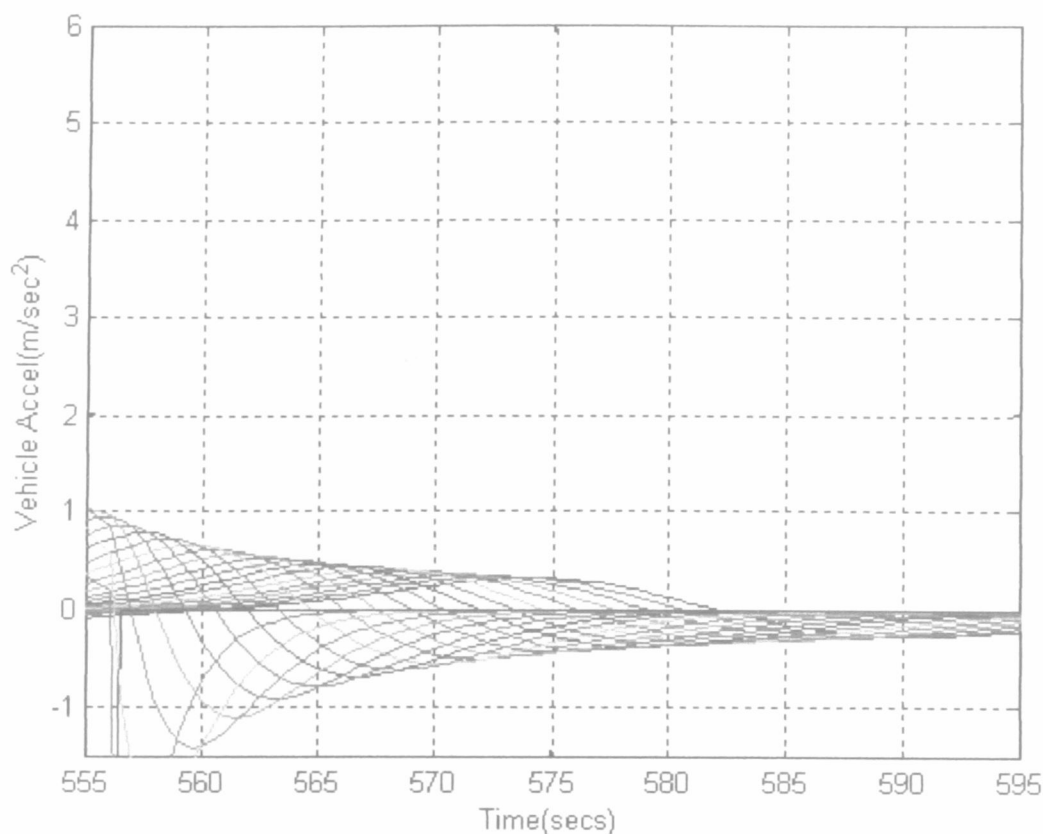
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούμε ότι δημιουργείται ουρά οχημάτων σε περίπτωση ένδειξης κόκκινου στο τέλος του συνδέσμου. Αυτό συμβαίνει διότι ο αριθμός των οχημάτων είναι μεγάλος, ενώ η ένδειξη του πρασίνου μικρή. Έτσι μόλις κάποια οχήματα συναντήσουν κόκκινο, λόγω του μεγάλου αριθμού τους που διασχίζει το σύνδεσμο, θα δημιουργηθεί ουρά. Το φαινόμενο αυτό εξαλείφεται για μεγάλους χρόνους προσομοίωσης όπως θα δούμε και στην επόμενη ενότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται, εκτός από τη θέση, τόσο η ταχύτητα όσο και η επιτάχυνση/επιβράδυνση των οχημάτων, σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 4.17 Θέση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 555-595 seconds



Σχήμα 4.18 Ταχύτητα οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 555-595 seconds



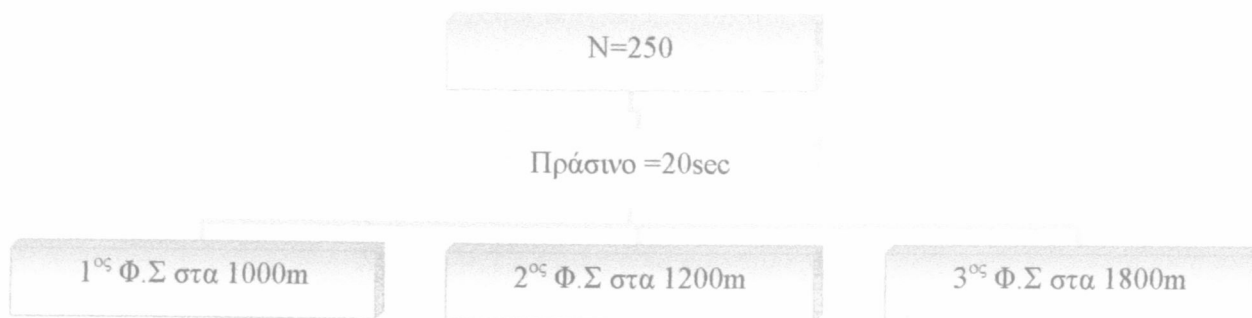
Σχήμα 4.19 Επιτάχυνση οχημάτων κατά το χρονικό διάστημα 555-595 seconds

4.4.3.5 Παρουσίαση της θέσης των οχημάτων καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών προσομοιώσεων της θέσης των οχημάτων καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, με διαφορετική θέση πάντα του 2^{ου} φωτεινού σηματοδότη.

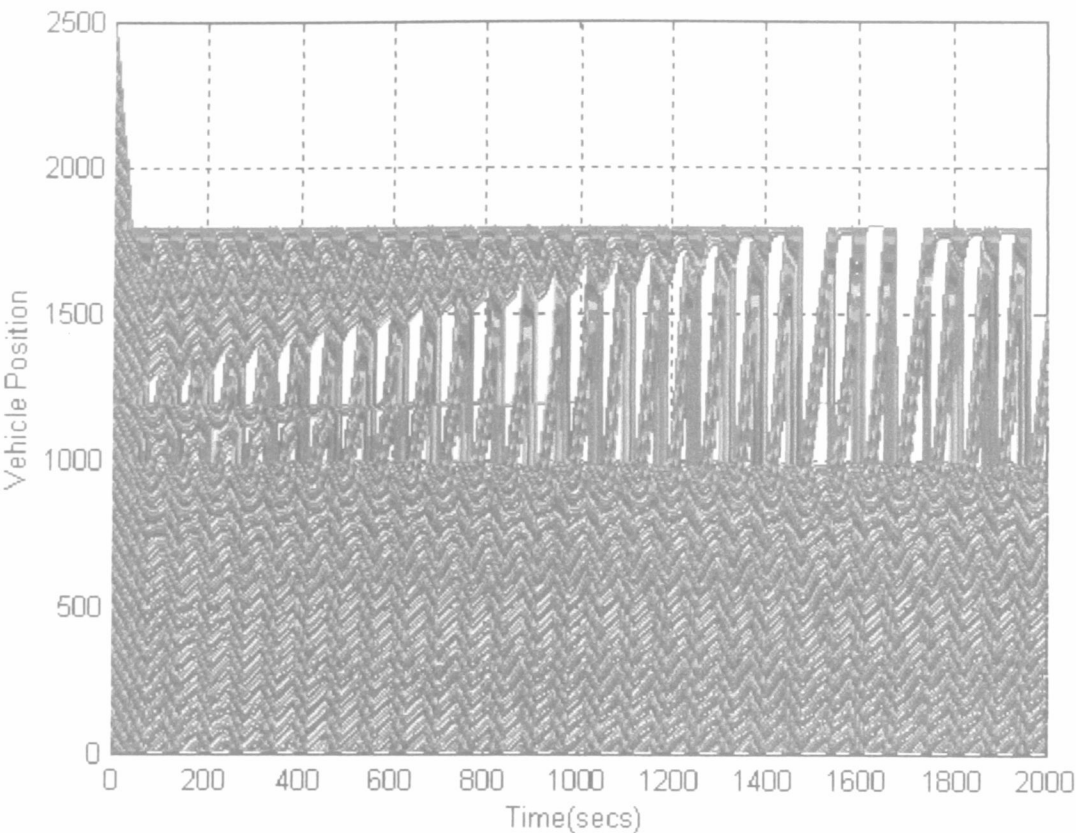
4.4.3.5.1 Θέση φωτεινού σηματοδότη στα 1200 μέτρα

Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πρασίνου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.



Σχήμα 4.20 Τιμές των παραμέτρων

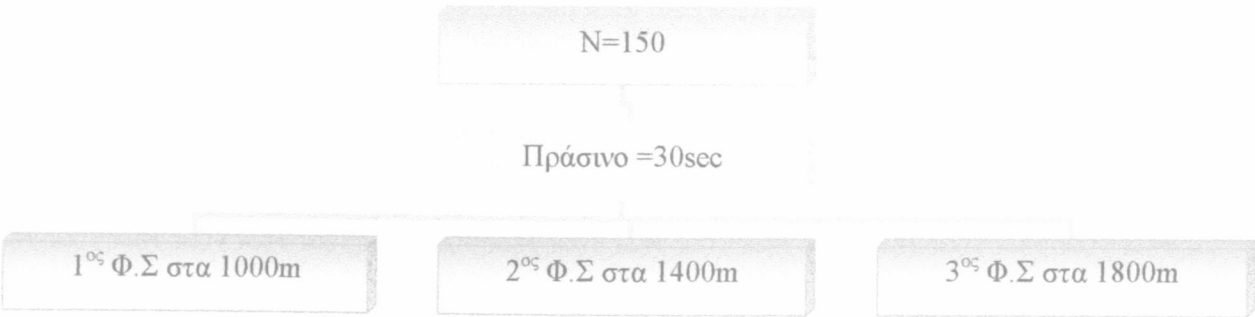
Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 4.21 Θέση οχημάτων

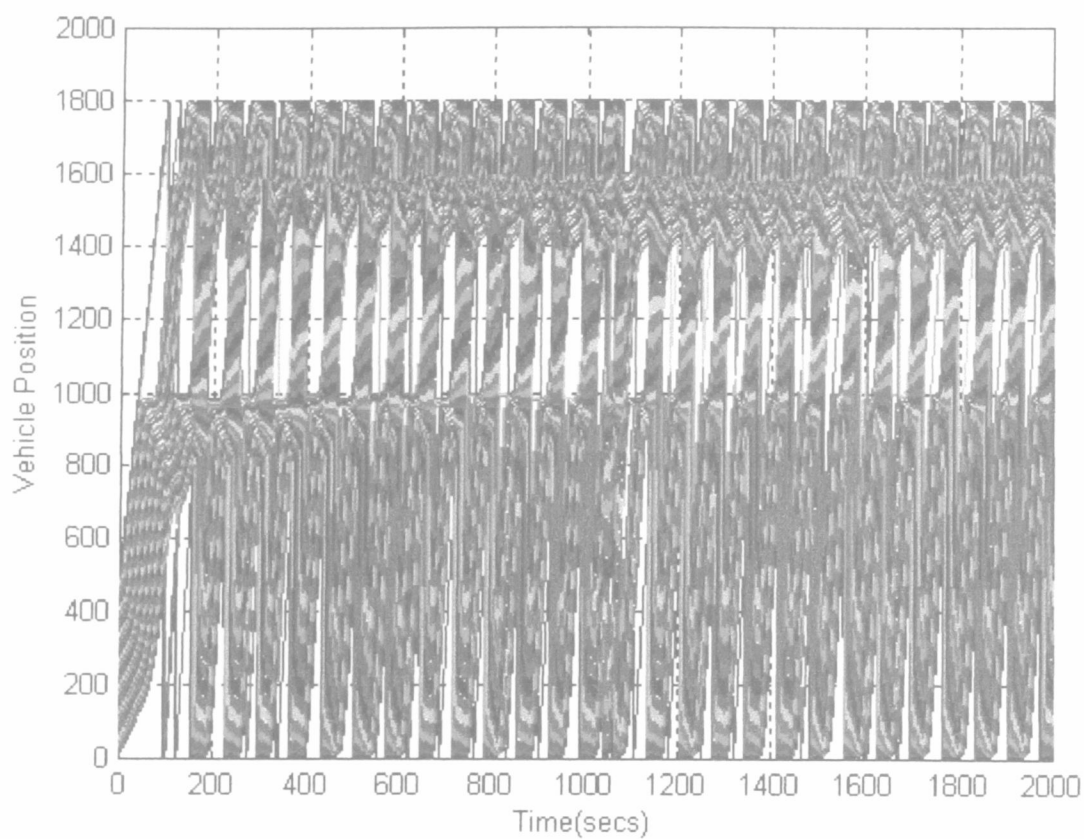
4.4.3.5.2 Θέση φωτεινού σηματοδότη στα 1400 μέτρα

Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πρασίνου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.



Σχήμα 4.22 Τιμές των παραμέτρων

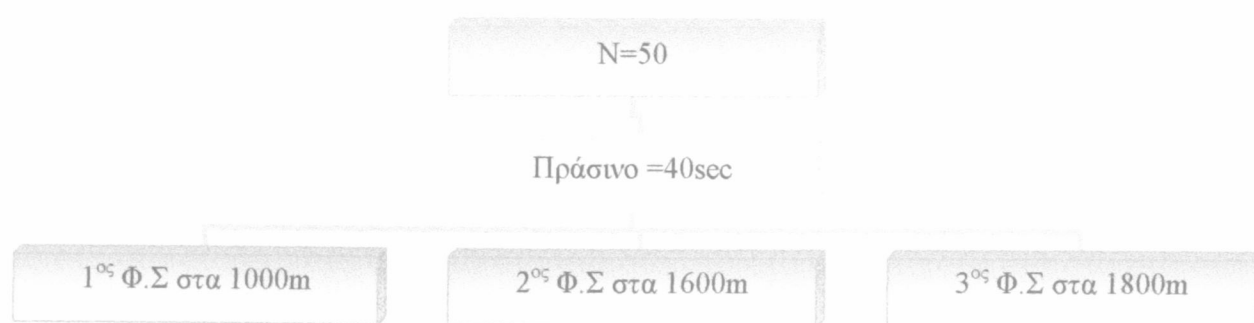
Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 4.23 Θέση οχημάτων

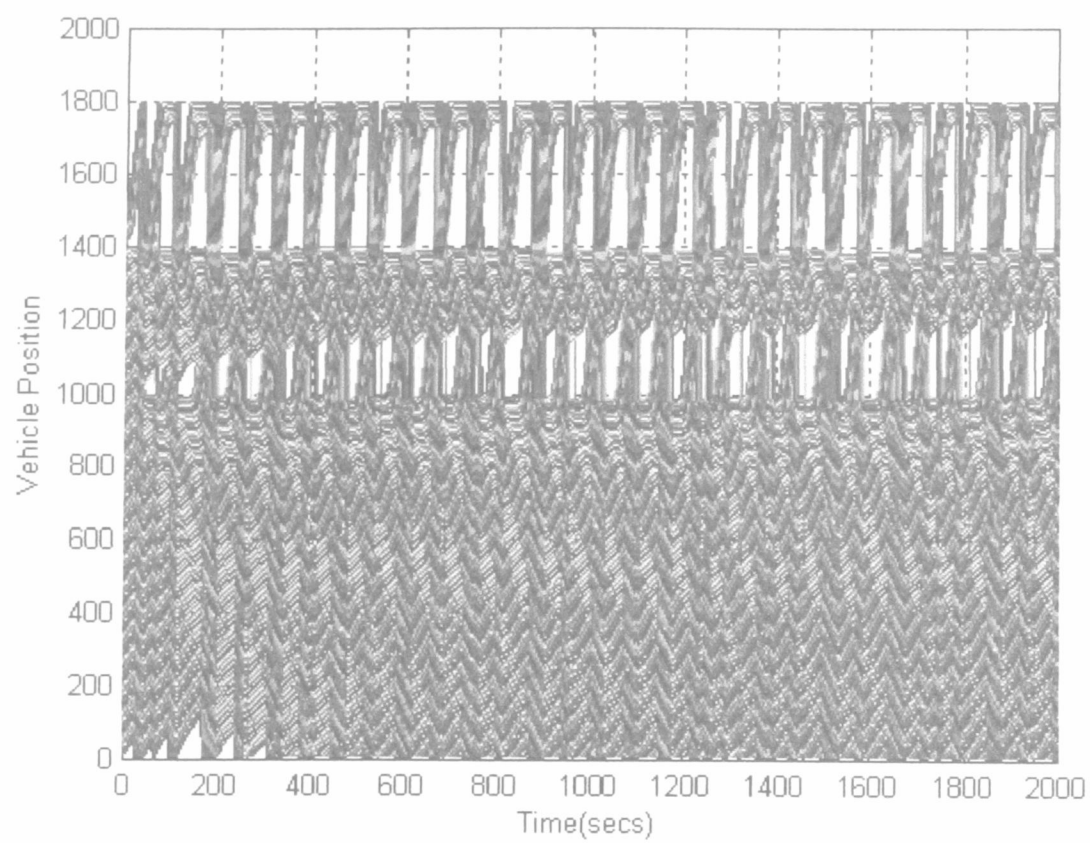
4.4.3.5.3 Θέση φωτεινού σηματοδότη στα 1600 μέτρα

Στην περίπτωση αυτή που εξετάζουμε οι τιμές των παραμέτρων (αριθμός αυτοκινήτων(N), χρόνος πρασίνου, θέση των φωτεινών σηματοδοτών) παίρνουν τις κάτωθι τιμές.



Σχήμα 4.24 Τιμές των παραμέτρων

Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:

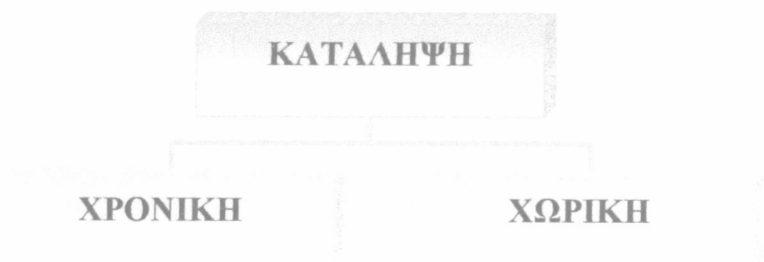


Σχήμα 4.25 Θέση οχημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υπολογισμός χωρικής κατάληψης (Space Occurancy) και χρονικής κατάληψης (Time Occurancy)

5.1 Εκτίμηση του αριθμού των οχημάτων μέσα σε links (συνδέσμους)

Δεν υπάρχει τρόπος ανάκτησης, σε πραγματικό χρόνο, του πραγματικού αριθμού των οχημάτων μέσα σε συνδέσμους, εκτός και αν παρέχεται εντοπισμός οχημάτων μέσω αισθητήρων εικόνας. Όταν χρησιμοποιούνται παραδοσιακοί φωρατές, μόνο μία ένδειξη των συνθηκών της οδικής κυκλοφορίας γύρω από την περιοχή των φωρατών αυτών, μπορεί να αποκτηθεί. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη σχέση ανάμεσα στη χωρική κατάληψη και στη χρονική κατάληψη.



Σχήμα 5.1 Είδη κατάληψης

Με τον όρο χρονική κατάληψη εννοούμε το ποσοστό του χρόνου που ο φωρατής είναι «απασχολημένος» σε έναν χρονικό κύκλο, ενώ με τον όρο χωρική κατάληψη εννοούμε το ποσοστό του μήκους του συνδέσμου που είναι κατειλημμένο από τα οχήματα που το διασχίζουν.

- Χαμηλές τιμές χρονικής κατάληψης (time occurancy) υποδηλώνουν ότι η ουρά στο σύνδεσμο (link) βρίσκεται περίπου κατάντη της θέσης του φωρατή. Σε μια τέτοια περίπτωση , οι τιμές της χρονικής κατάληψης ουσιαστικά εκτιμούν το επίπεδο της εισροής στο σύνδεσμο.
- Μεσαίες τιμές κατάληψης υποδηλώνουν ότι η ουρά στο link βρίσκεται γύρω από τη θέση του φωρατή.
- Μεγάλες τιμές χρονικής κατάληψης υποδηλώνουν ότι η ουρά στο σύνδεσμο βρίσκεται περίπου ανάντη του ρεύματος της θέσης του φωρατή.
- Δεν υπάρχει σχέση ένα-προς-ένα μεταξύ των μέσων τιμών της χρονικής κατάληψης με τις μέσες τιμές του αριθμού των οχημάτων που διασχίζουν το σύνδεσμο. Η χρονική κατάληψη είναι μία τοπική μεταβλητή, η οποία επηρεάζεται από τις καταστάσεις κυκλοφορίας γύρω από τη θέση του φωρατή, ενώ ο αριθμός των οχημάτων είναι μια εκτεταμένου εύρους μεταβλητή. Ας θεωρήσουμε το παράδειγμα του σχήματος 5.2. Υποθέτουμε ότι τα τμήματα a, b, c, and d του σχήματος αυτού παριστάνουν σχηματικά τη μέση τιμή της κυκλοφορίας μέσα σε έναν κανονικοποιημένο σύνδεσμο για 4 συνεχής κύκλους, κάθε ένας ίσος με τον άλλον. Σε όλους τους κύκλους που εξετάζονται ο φωρατής πάντα «βλέπει» αυτοκίνητα να διασχίζουν το σύνδεσμο. Είναι επομένως πιθανό ο φωρατής να

υπολογίζει μέση κατάληψη γύρω στο 100% για όλους τους κύκλους. (βλέπε σχήμα 5.2e) παρόλο, που ο αριθμός των αυτοκινήτων είναι διαφορετικός για κάθε έναν, με αποτέλεσμα η σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης να παίρνει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2f. Αν και αυτή είναι μια ακραία περίπτωση, παρόμοιες καταστάσεις σαν και αυτήν, μπορεί να παρατηρηθούν και για άλλες τιμές κατάληψης.

Σχήμα 5.2

5.2 Μέθοδος υπολογισμού χωρικής και χρονικής κατάληψης

Ο δρόμος χωρίζεται σε τρεις συνδέσμους. Ο 1^{ος} σύνδεσμος έχει μήκος όση είναι η απόσταση από την αρχή της λεωφόρου έως και τον 1^ο φωτεινό σηματοδότη, ο 2^{ος} κόμβος μήκος όσο η απόσταση μεταξύ του 1^{ου} και 2^{ου} φωτεινού σηματοδότη και ο 3^{ος} κόμβος μήκος όσο η απόσταση μεταξύ του 2^{ου} και 3^{ου} φωτεινού σηματοδότη. Η θέση του φωρατή δεν είναι σταθερή σε κάθε κόμβο. Ο φωρατής μπορεί να παίρνει εννέα δυνατές θέσεις μέσα σε αυτόν, οι οποίες βρίσκονται αντίστοιχα σε απόσταση από το φωτεινό σηματοδότη ίση με το 10%, 20%, 30%,..., 90% του μήκους του συνδέσμου. Θεωρούμε την ύπαρξη φωρατών μόνο στο 2^ο και 3^ο σύνδεσμο. Όταν η λεωφόρος διασχίζεται από οχήματα, αν θεωρήσουμε ότι ο φωρατής βρίσκεται στον δεύτερο σύνδεσμο πρίν δηλαδή από τον 2^ο φωτεινό σηματοδότη, και κάποιο όχημα κάποια στιγμή τον περάσει, τότε αυτός το καταμετρά. Το ίδιο ισχύει και στη περίπτωση που ο φωρατής βρίσκεται στον τρίτο σύνδεσμο. Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε ότι ο φωρατής ανιχνεύει τη 'διέλευση' όταν υπάρχει όχημα του οποίου το έμπροσθεν άκρο βρίσκεται σε απόλυτη απόσταση από τη θέση (σημείο) του φωρατή μικρότερη των δύο μέτρων.



Σχήμα 5.3 Θέση φωρατή

Για όλες τις δυνατές περιπτώσεις και για κάθε κόμβο χωριστά υπολογίζεται η χωρική κατάληψη η οποία ορίζεται ως το ποσοστό του μήκους του συνδέσμου που είναι κατειλημμένο από τα οχήματα που το διασχίζουν καθώς και η χρονική κατάληψη που ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που ο φωρατής είναι «απασχολημένος» σε έναν χρονικό κύκλο. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία παρέχουν τη σχέση της χρονικής με τη χωρική κατάληψη για διάφορες τιμές πρασίνου, περιέχονται (σε κάθε διάγραμμα) οι τιμές τους που προέκυψαν για όλες τις δυνατές περιπτώσεις όπου έχουμε ίδιο μήκος κόμβου. Για παράδειγμα στα σχήματα 5.2 και 5.3 φαίνονται οι τιμές της χρονικής και χωρικής κατάληψης για μήκος κόμβου διακοσίων μέτρων. (ας αναφέρουμε εδώ ότι το μήκος κάθε κόμβου είναι μεταβλητό διότι ο 2^{ος} φωτεινός σηματοδότης δε μένει σταθερός. Έτσι για θέση του 2^{ου} Φ.Σ στα 1200 μέτρα ο 2^{ος} κόμβος έχει μήκος 200 μέτρα, ενώ για θέση του 2^{ου} Φ.Σ στα 1600 μέτρα ο 3^{ος} κόμβος έχει μήκος 200 μέτρα).

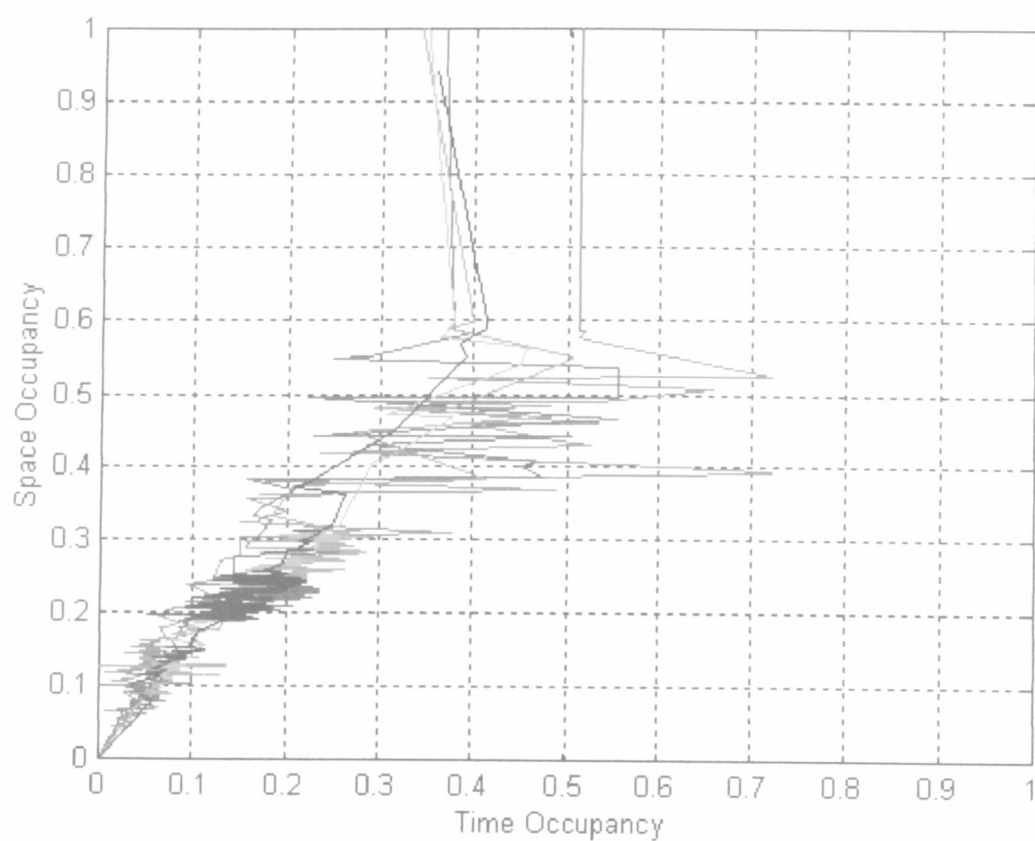
5.3 Επίδραση του χρόνου πρασίνου

Ανάλογα με το χρόνο πρασίνου που ορίζουμε να έχει ο φωτεινός σηματοδότης και τη θέση του φωρατή σε κάθε περίπτωση οι τιμές της χρονικής και της χωρικής κατάληψης ποικίλουν.

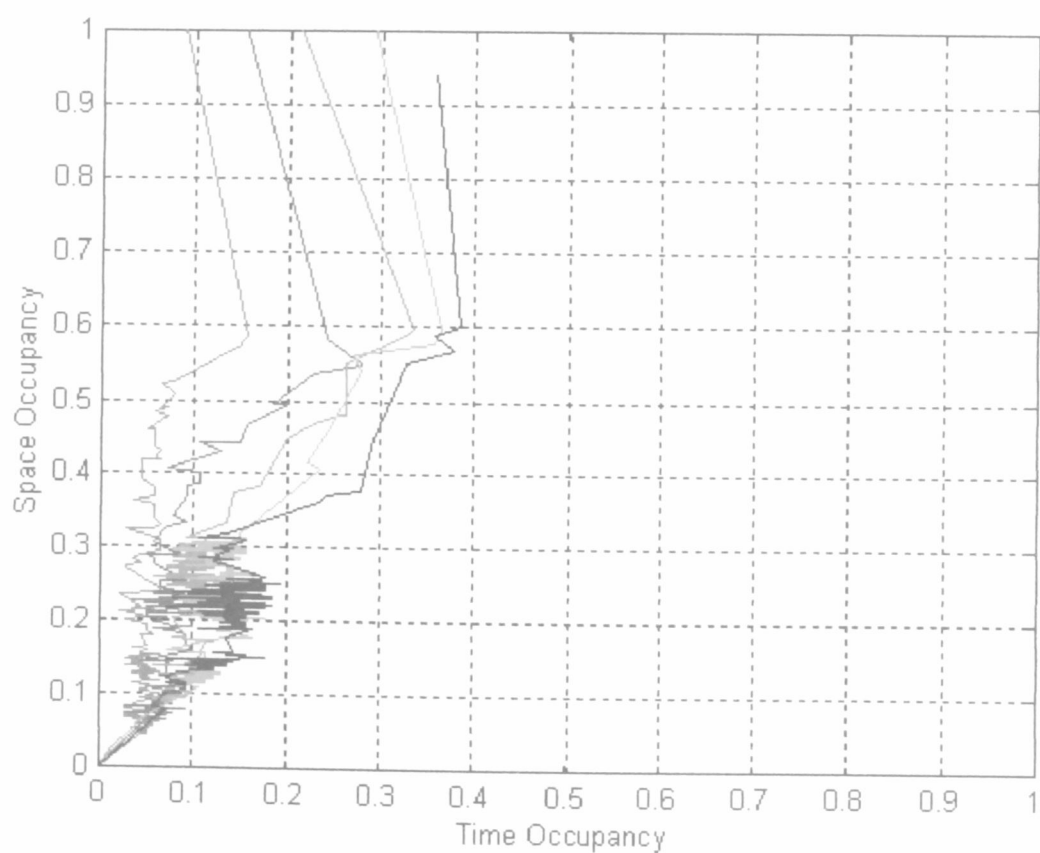
Στα διαγράμματα που ακολουθούν κάθε χρόνος πρασίνου συμβολίζεται με διαφορετικό χρώμα. Συγκεκριμένα:

Χρόνος Πρασίνου	Χρώμα
20 seconds	Magenta(ροζ)
30 seconds	Red(κόκκινο)
40 seconds	Green(πράσινο)
50 seconds	Cyan(γαλάζιο)
60 seconds	Black(μαύρο)

- Στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου φωτεινού σηματοδότη (Φ.Σ) είναι στα διακόσια μέτρα (length=200), όταν η θέση του φωρατή είναι μέχρι και 40% μακριά από τον 2^ο Φ.Σ παρατηρούνται μεγάλες τιμές κατάληψης για τιμές πρασίνου στα 20 seconds. Όταν όμως ο φωρατής βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον 2^ο Φ.Σ και σε περίπτωση υψηλής χωρικής κατάληψης, για παράδειγμα σε απόσταση 90% παρατηρούνται μεγάλες τιμές χρονικής κατάληψης για τιμές πρασίνου στα 60 seconds, τη μεγαλύτερη δηλαδή τιμή πρασίνου που εξετάζουμε. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται καλύτερα στα παρακάτω διαγράμματα.

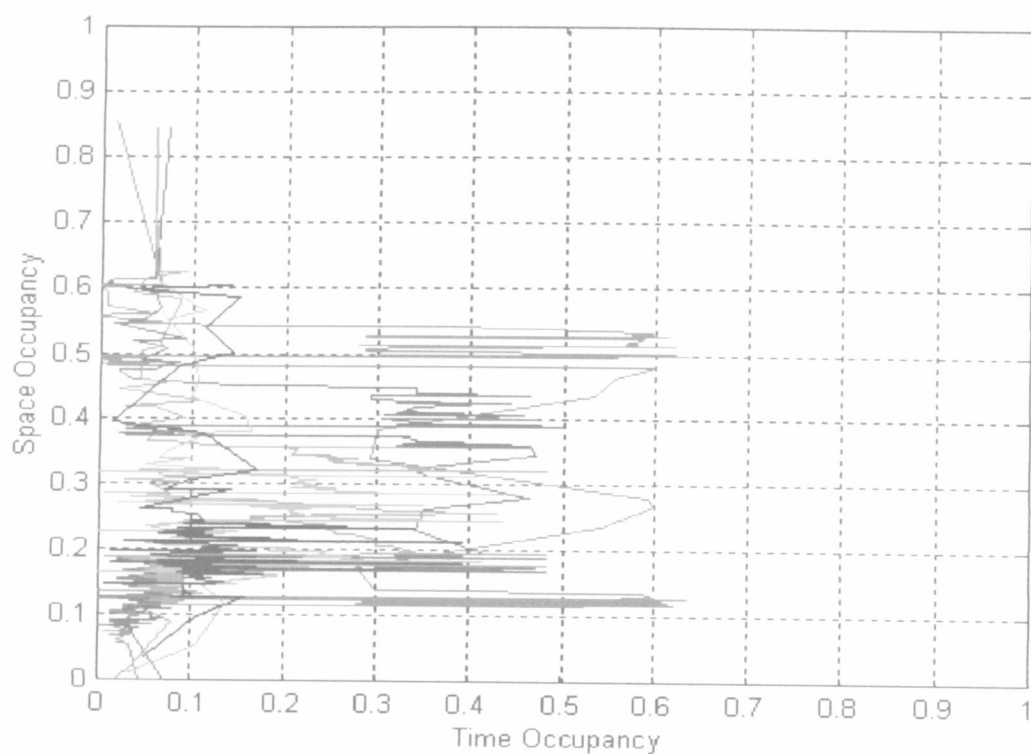


Σχήμα 5.4 Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου

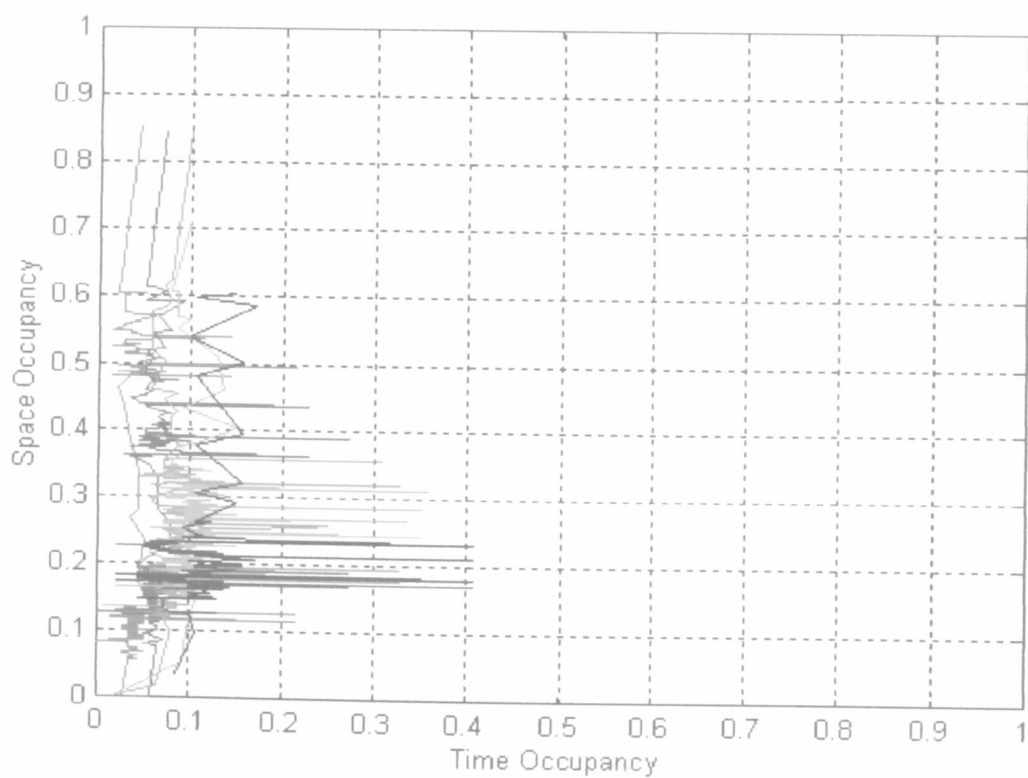


Σχήμα 5.5 Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου

- Στην περίπτωση που το length είναι 400 μέτρα παρατηρούνται ανάλογα φαινόμενα με αυτά που αναφέρονται παραπάνω. Και εδώ τα διαγράμματα που ακολουθούν επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα.

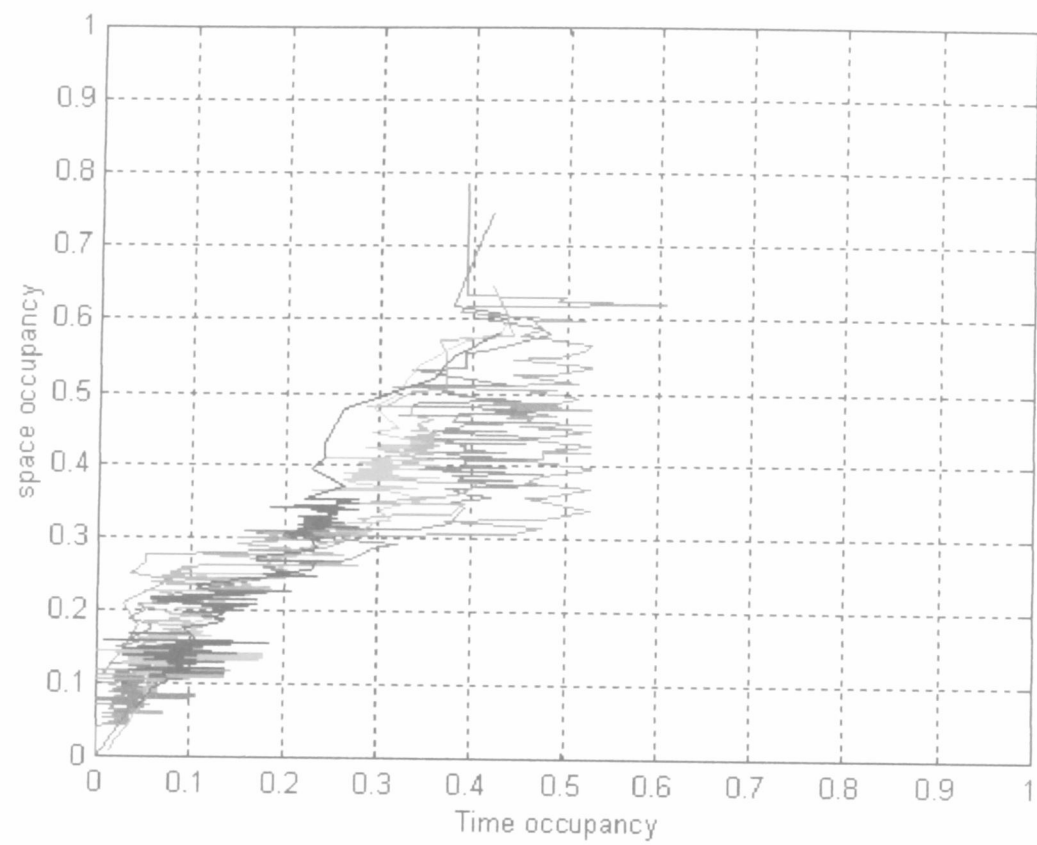


Σχήμα 5.6 Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου

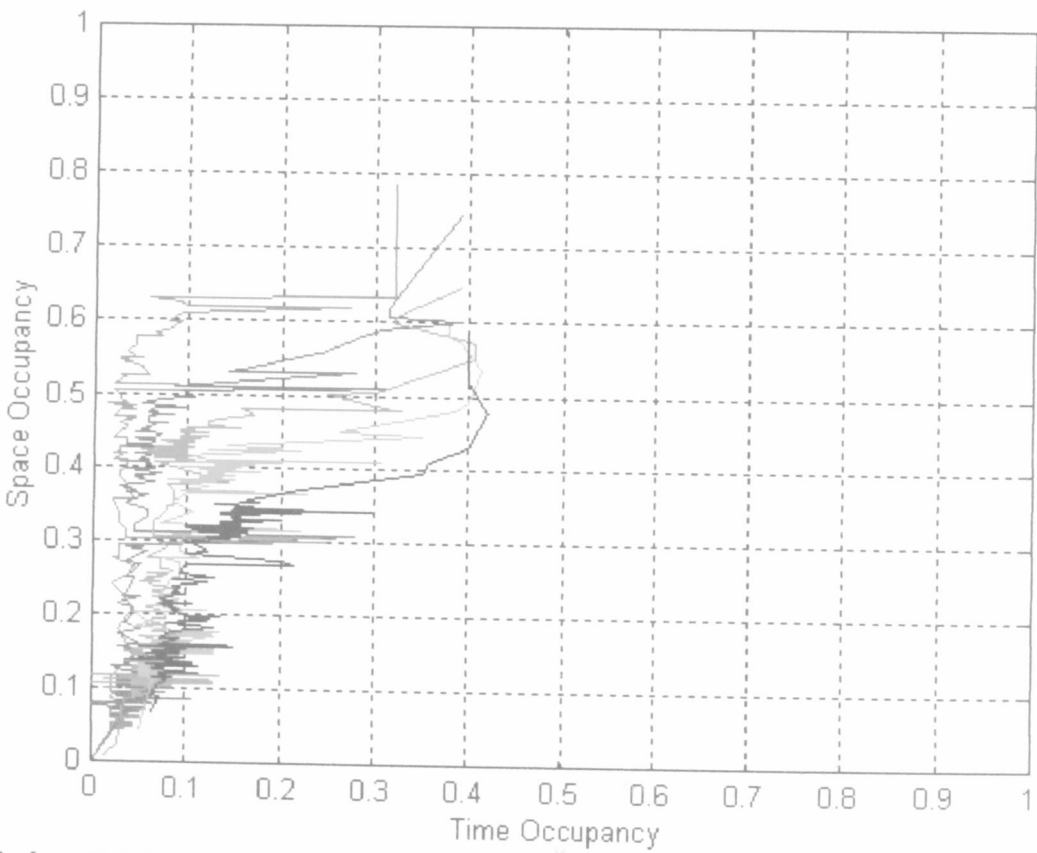


Σχήμα 5.7 Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου

- Όμοια όταν το length είναι ίσο με 600 μέτρα παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα και τα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:



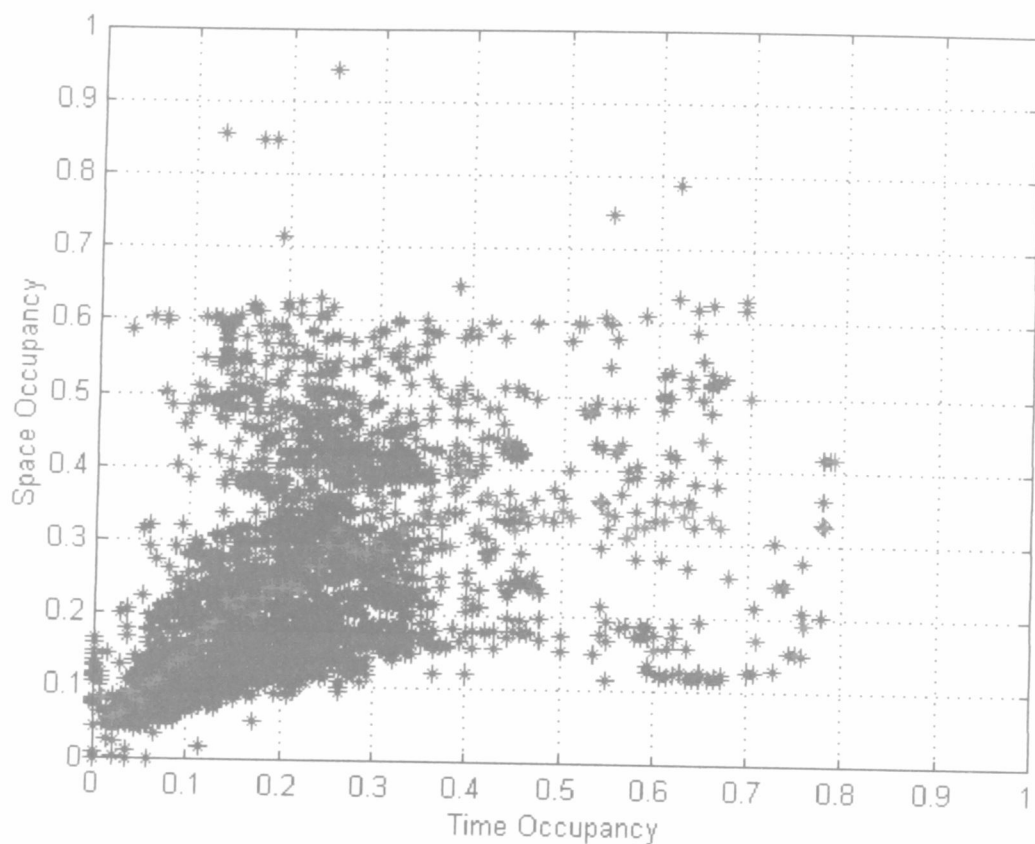
Σχήμα 5.8 Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου



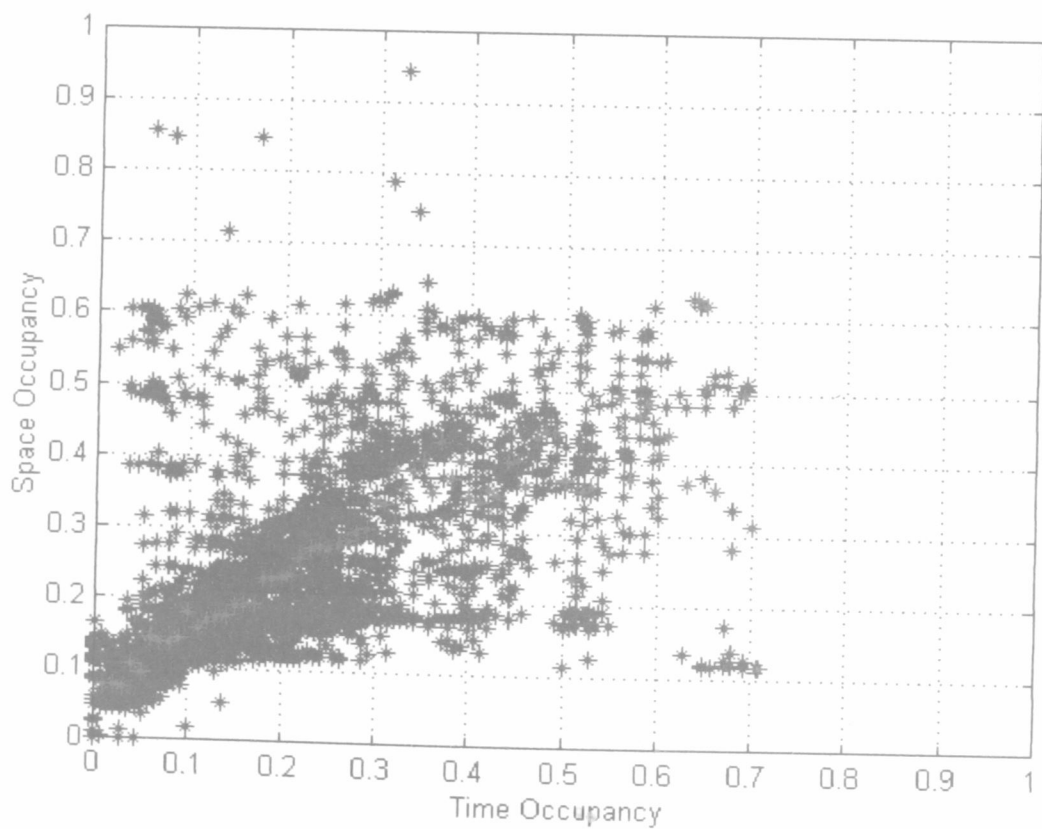
Σχήμα 5.9 Σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης για διάφορες τιμές πρασίνου

5.4 Αναζήτηση ενός απλού μοντέλου

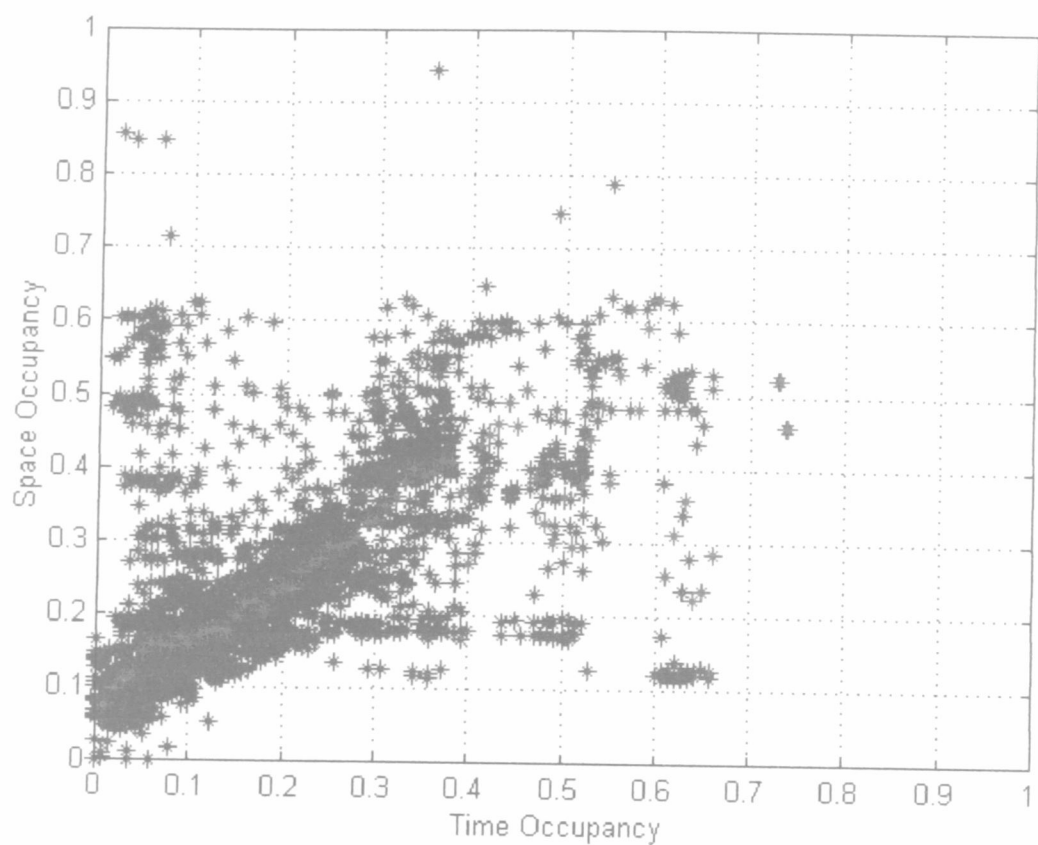
Το πρόβλημα όπως εύκολα καταλαβαίνει κανείς είναι αρκετά πολύπλοκο για την εξαγωγή συμπερασμάτων, διότι έχουμε πολλές παράμετρους εισόδου, όπως είναι οι διαφορετικές τιμές των χρόνων πρασίνου και οι διάφορες καταστάσεις στο παρελθόν. Γι' αυτό είναι εμφανής η ανάγκη αναζήτησης ενός απλού μοντέλου το οποίο θα εξαρτάται μόνο από τη χρονική κατάληψη, και το λόγο θέση φωρατή/μήκος συνδέσμου. Το απλό μοντέλο που χρησιμοποιούμε πληρεί τις προϋποθέσεις που θέλουμε και τα αποτελέσματα που μας δίνει έχουν νόημα. Διαφορετικά μήκη των συνδέσμων από ότι φαίνεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δεν επηρεάζουν κατά κάποιο σαφή τρόπο τη σχέση χρονικής-χωρικής κατάληψης, αλλά αντιθέτως η σχέση αυτή φαίνεται να επηρεάζεται από το λόγο θέση φωρατή/μήκος συνδέσμου. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



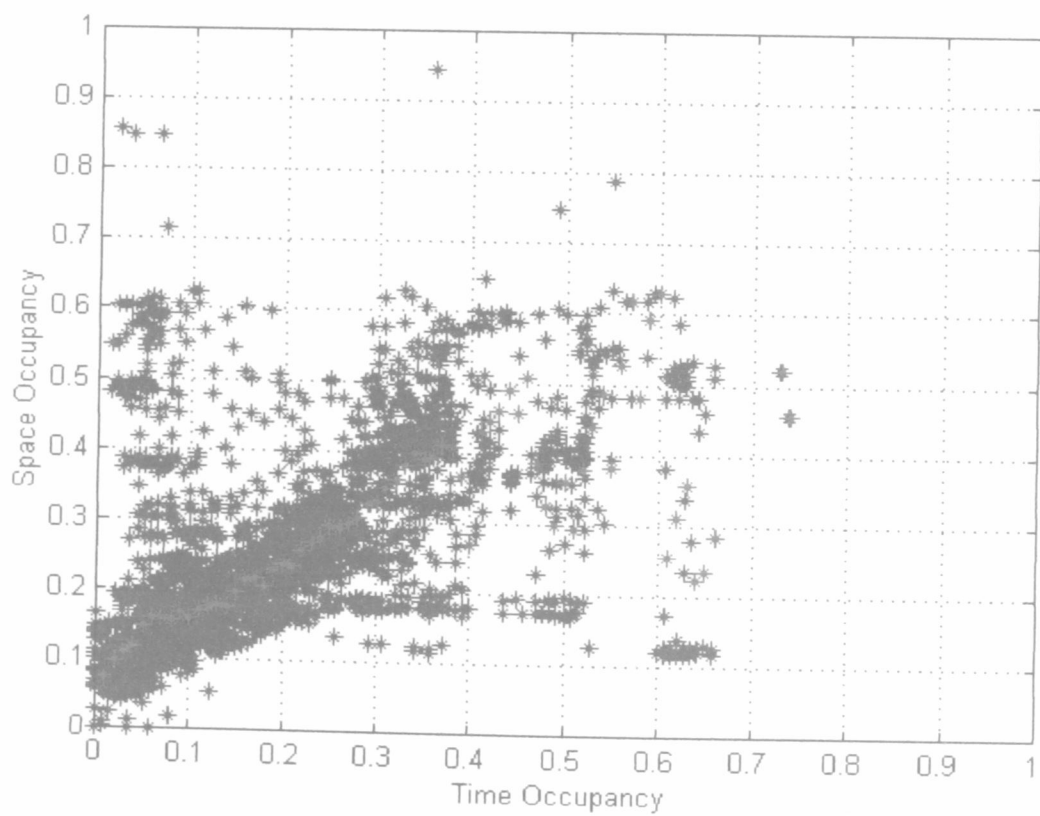
Σχήμα 5.10 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 10% του length του link



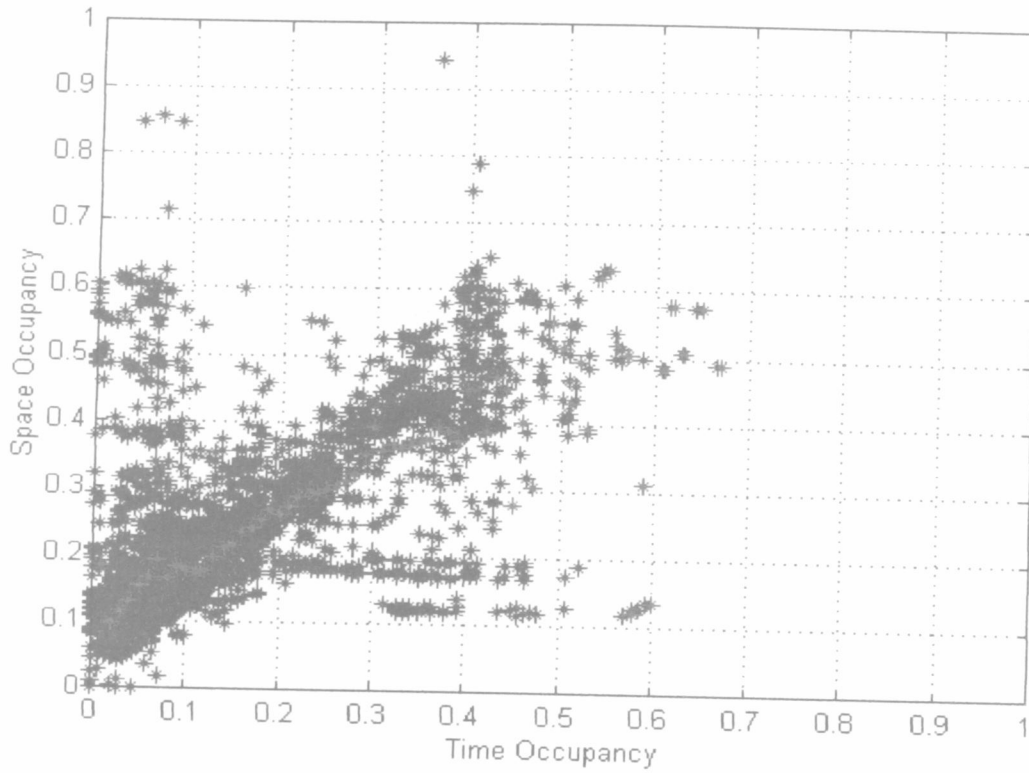
Σχήμα 5.11 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 20% του length του link



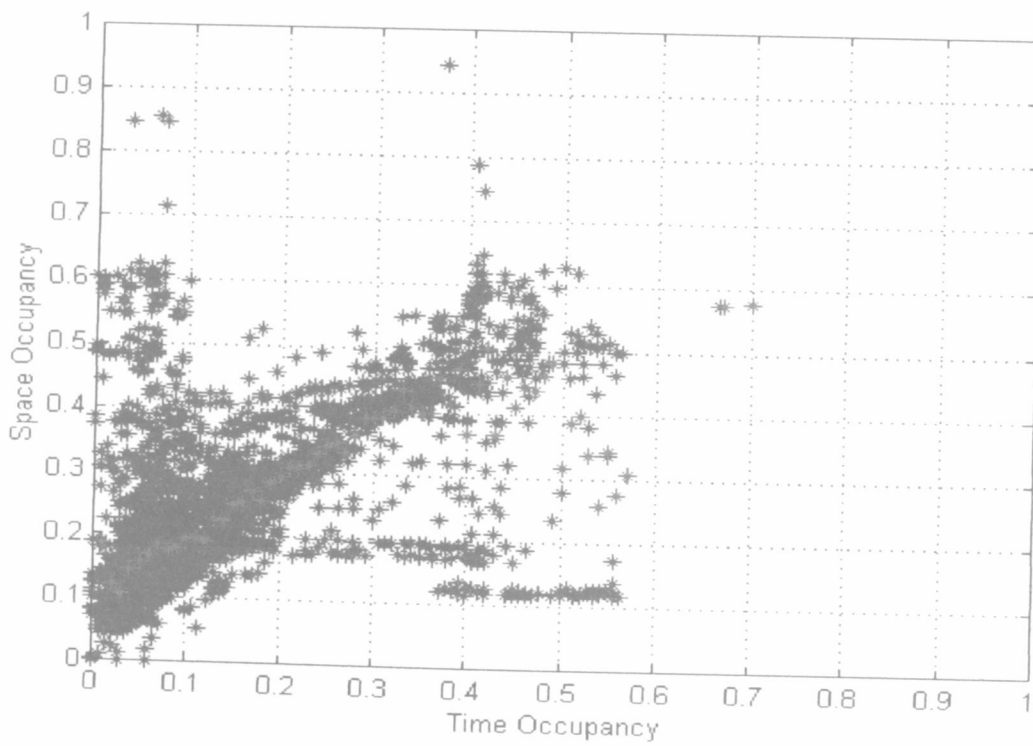
Σχήμα 5.12 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 30% του length του link



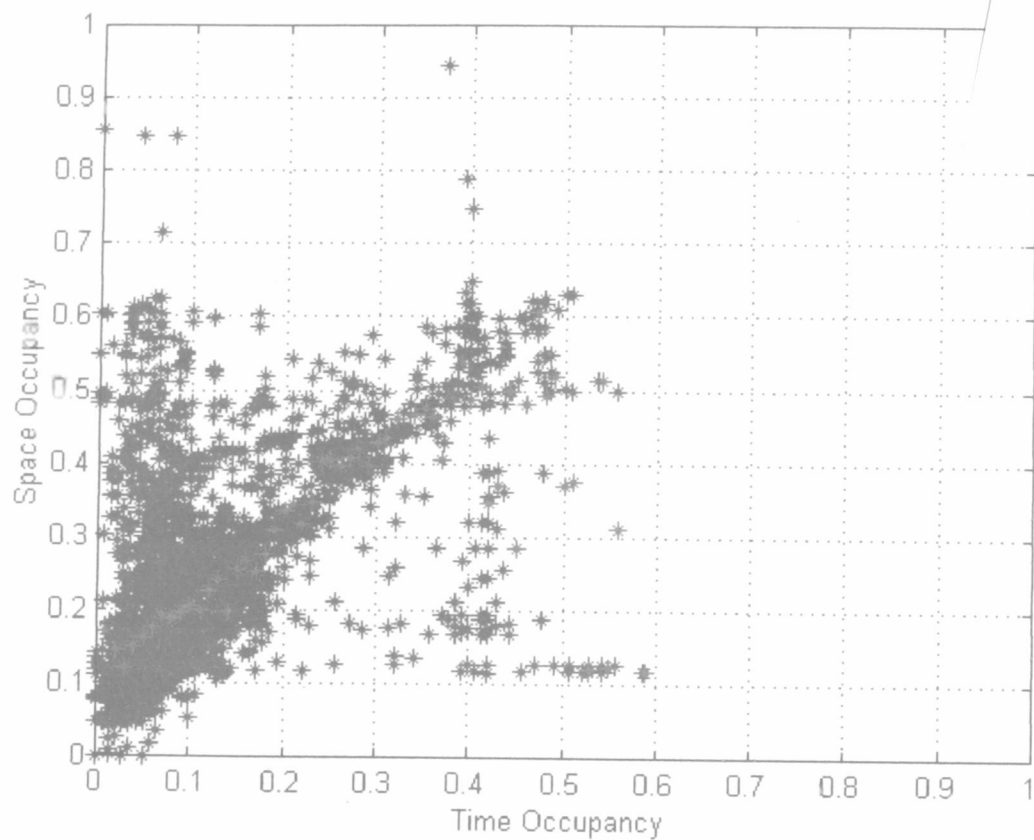
Σχήμα 5.13 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 40% του length του link



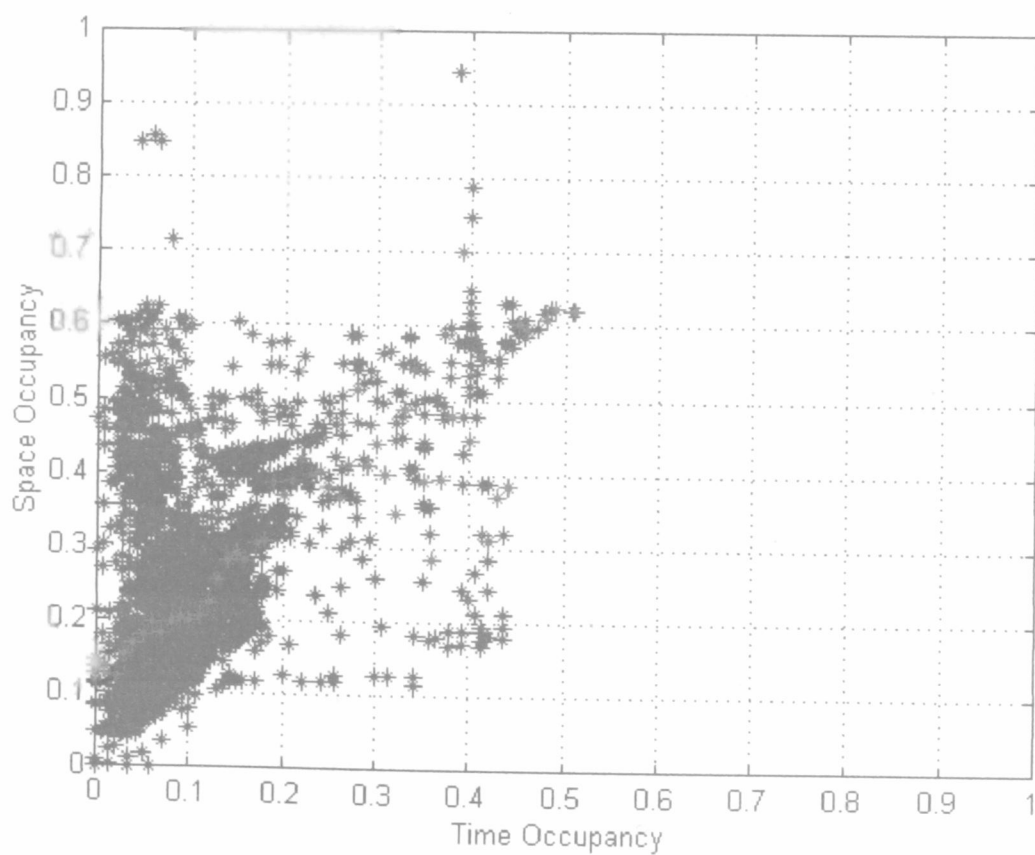
Σχήμα 5.14 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 50% του length του link.



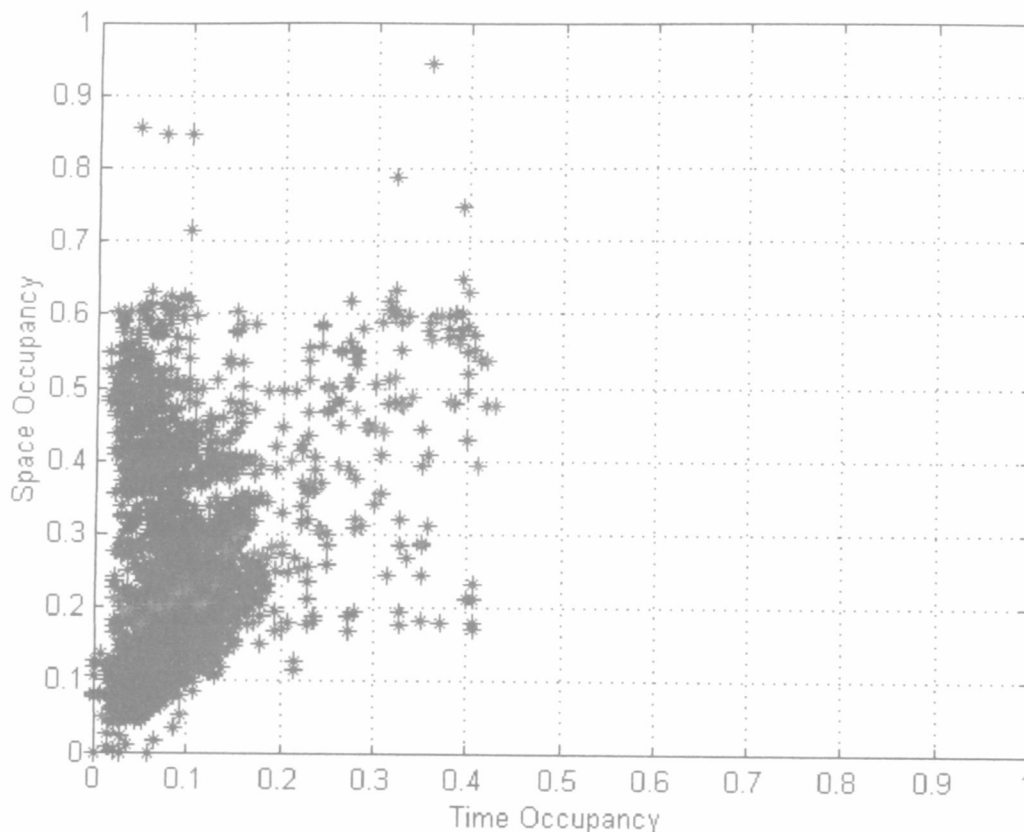
Σχήμα 5.15 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 60% του length του link



Σχήμα 5.16 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 70% του length του link



Σχήμα 5.17 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 80% του length του link



Σχήμα 5.18 Θέση του φωρατή σε απόσταση από το Φ.Σ ίση με το 90% του length του link

Με μπλε αστεράκι παρουσιάζεται το ίχνος που αντιστοιχεί στην τιμή της χωρικής κατάληψης σε σχέση με τη χρονική κατάληψη σε κάθε περίπτωση, ενώ με κόκκινο αστεράκι παρουσιάζεται η μέση τιμή της χωρικής κατάληψης για συγκεκριμένες τιμές της χρονικής κατάληψης. Κάθε διάγραμμα αναφέρεται σε συγκεκριμένη θέση του φωρατή στο σύνδεσμο και περιλαμβάνει όλες τις δυνατές περιπτώσεις αριθμού οχημάτων (από 50 έως 250 με βήμα 50), διαφορετικών θέσεων του 2^{ου} φωτεινού σηματοδότη (1200m-1400m-1600m), και διαφορετικών τιμών πρασίνου (από 20 έως 60 με βήμα 10)

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγουμε τα κάτωθι συμπεράσματα:

- ✦ Παρατηρούμε ότι όταν ο φωρατής βρίσκεται σε απόσταση 10% από το φωτεινό σηματοδότη, υπάρχει μια αναλογία στις τιμές της χρονικής κατάληψης και της χωρικής κατάληψης. Μάλιστα υπολογίζοντας τη μέση τιμή (φαίνεται σε κάθε σχήμα με κόκκινο χρώμα) μπορούμε να πούμε ότι η αναλογία αυτή παρατηρείται έως και για τις τιμές 0,3 και για τις δύο καταλήψεις, και μάλιστα παίρνει την μορφή κώνου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται για τις διάφορες περιπτώσεις θέσεως του φωρατή και μάλιστα όσο αυτός απομακρύνεται από το φωτεινό σηματοδότη τόσο ο λόγος αναλογίας μεγαλώνει.
- ✦ Παρατηρείται το φαινόμενο σε διάφορες περιπτώσεις ο φωρατής να είναι κατειλημένος για ένα μεγάλο ποσοστό του κύκλου (μεγάλες δηλαδή τιμές της χρονικής κατάληψης), αλλά το τμήμα του δρόμου που εξετάζουμε να διασχίζεται από μικρό αριθμό οχημάτων (μικρές τιμές της χωρικής

κατάληψης). Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί να έχει δημιουργηθεί σε κάποιο τμήμα του δρόμου κάποια ουρά με αποτέλεσμα να έχει σταματήσει η κυκλοφορία, με άμεση συνέπεια το τμήμα του υπό εξέταση δρόμου να μην διασχίζεται από αυτοκίνητα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν ο φωρατής είναι μόλις 10% μακριά από το φωτεινό σηματοδότη (Σχήμα 5.10: βλέπουμε ότι για χρονική κατάληψη γύρω στο 0,6-0,7 η τιμή της χωρικής κατάληψης φτάνει μόλις λίγο πιο πάνω από 0,1. Σε περιπτώσεις τώρα που ο φωρατής βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το φωτεινό σηματοδότη απέχει δηλαδή πάνω από 50% από αυτόν παρατηρούνται παρόμοια φαινόμενα, αλλά όχι τόσο έντονα με το παραπάνω. Τέτοιο φαινόμενο για παράδειγμα παρατηρείται για απόσταση 60% (Σχήμα 5.15: για τιμές χρονικής κατάληψης γύρω στα 0,4-0,6, η χωρική κατάληψη ξεπερνά μόλις το 10%.

- ✦ Συμβαίνει επίσης σε αρκετές περιπτώσεις ο φωρατής να έχει απασχοληθεί (καταμετρήσει αυτοκίνητα) για πολύ λίγο χρονικό διάστημα στον κύκλο, πράγμα που σημαίνει ότι τον διέσχισαν πολύ λίγα αυτοκίνητα και το link να διασχίζεται από μεγάλο ποσοστό οχημάτων (ψηλές τιμές της space occupancy). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται διότι, προφανώς έχει δημιουργηθεί ουρά σε τμήμα του link λίγο μετά το φωρατή, με αποτέλεσμα, ενώ υπάρχουν αυτοκίνητα που θέλουν να διασχίσουν το φωρατή να μην μπορούν λόγω της ουράς. Έτσι ενώ το link είναι κατειλημμένο από αυτοκίνητα ο φωρατής απασχολείται για μικρό χρονικό διάστημα λόγω της σχηματιζόμενης ουράς. Ένα τέτοιο φαινόμενο παρατηρείται στο Σχήμα 5.18 όπου ενώ η τιμή της time occupancy είναι μόλις στο 0,1, η τιμή της space occupancy φτάνει περίπου το 0,9. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται σχηματικά το φαινόμενο που περιγράφεται. Το μεσαίο αυτοκίνητο λόγω της ουράς που έχει δημιουργηθεί, έχει σταματήσει στην περιοχή που ο φωρατής μετράει τα οχήματα (η απόσταση των 4 μέτρων). Το συγκεκριμένο όχημα έχει μετρηθεί, διότι έχει περάσει το μπροστινό του μέρος-έχουμε θεωρήσει ότι ένα αυτοκίνητο καταγράφεται από το φωρατή όταν περάσει το μπροστινό του μέρος από αυτόν. Άμεση συνέπεια η διακοπή της κυκλοφορίας και η δημιουργία ουράς.



Σχήμα 5.19 Περίπτωση δημιουργίας ουράς στο φωρατή

- ✦ Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε επίσης ότι όσο πιο κοντά είναι ο φωρατής στο φωτεινό σηματοδότη, τόσο πιο πολλά αυτοκίνητα περνούν από αυτόν. Όταν βρίσκεται στο μέσον του link, ο αριθμός των αυτοκινήτων μειώνεται, ενώ όταν απομακρύνεται ακόμα περισσότερο, ο αριθμός των αυτοκινήτων μειώνεται και άλλο. Συγκεκριμένα όταν ο φωρατής βρίσκεται στις θέσεις από 10% έως 30%, απασχολείται κατά μέσο όρο γύρω στο 0.7 του κύκλου, στις θέσεις από 40% έως 60% απασχολείται κατά μέσο όρο γύρω στο

0.6 του κύκλου, και τέλος στις θέσεις από 70% έως 90% απασχολείται κατά μέσο όρο γύρω στο 0.45 του κύκλου.

- ✦ Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχει μια αναλογία μεταξύ των τιμών της time occupancy και της space occupancy, ανάλογα με τη θέση του φωρατή. Μάλιστα όσο πιο κοντά είναι στο φωτεινό σηματοδότη ο φωρατής, τόσο περισσότερο διατηρείται η αναλογία. Αρκεί να αναφέρουμε ότι για θέση του φωρατή στο 10% η αναλογία διατηρείται μέχρι το 0,4 περίπου, ενώ για θέση αυτού στο 90% δεν υπάρχει σχεδόν καμία αναλογία.
- ✦ Όταν ο φωρατής βρίσκεται σε μεσαίες θέσεις, περίπου στο 50% του μήκους του link, είναι δυνατό να έχουμε μια πιο σαφή ένδειξη για την κατάσταση των οχημάτων που βρίσκονται στο link. Σε περιπτώσεις όμως που παρατηρούνται μεγάλες ή πολύ μικρές καταλήψεις στο link, ο φωρατής στις ακραίες θέσεις είτε πολύ κοντά είτε πολύ μακριά στο φωτεινό σηματοδότη, μπορεί να δώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- Diakaki, C. (1999). *Integrated Control of Traffic Flow in Corridor Networks*. PhD Thesis, Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management, Chania, Greece.
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., and McLean, T. (1999). Application and evaluation of the integrated traffic-responsive urban corridor control strategy IN-TUC in Glasgow. *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA, paper no. 990310.
- Gazis D C 1974 *Traffic Science*. Wiley, New York
- Gazis D C, Herman R C, Potts R B 1959 Car-following theory of steady state flow. *Oper. Res.* 7, 499-505
- Gipps P G 1981 A behavioural car-following model for computer simulation. *Transp. Res. B* 15, 105-11
- Gipps P G 1985 A model for the structure of lane-changing decisions. *Transp. Res. B* 20, 403-14
- Helly W 1961 Simulation of bottlenecks in single-lane traffic flow. In: Herman R C (ed.) *Theory of Traffic Flow*. Elsevier, Amsterdam, pp. 207-38
- Herman R C, Montroll E W, Potts R B, Rothery R W 1959 Traffic Dynamics: Analysis of stability in car-following. *Oper. Res.* 7, 86-106.

Pipes L A 1953 An operational analysis of traffic dynamics. *J. Appl. Phys.* **24**, 274-81.

Reuschel R 1950 Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. *Z. Osterr. Ing. Arch. Ver.* **95**, 52-62; 73—7

J. Kamata and T. Oda [Matsushita Com. Ind. Co., Yokohama, Japan]

