



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη Νέου Μαθηματικού Προσομοιώματος για τον Ελιγμό της Προσέρασης σε Οδούς Δύο Λωρίδων Κυκλοφορίας με Χρήση Πραγματικών Δεδομένων από Οδικό Πείραμα**



**Νικόλαος-Παναγιώτης Τραντάς**

*Επιβλέπων: Σ. Μαυρομάτης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

Αθήνα, Ιούλιος 2021





**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS**  
**SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING**  
DEPT. OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING

Diploma Thesis

**Development of New Mathematical Model for the Overtaking in Two Lane Roads Using Real Data from a Driving Experiment**



**Nikolaos-Panagiotis Trantas**

*Supervisor: S. Mavromatis, Assistant Professor N.T.U.A.*

Athens, July 2021



Ο συγγραφέας βεβαιώνει ότι το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας είναι αποτέλεσμα αποκλειστικά προσωπικού μόχθου και ότι έχει γίνει η κατάλληλη αναφορά στην εργασία τρίτων –όπου κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο- σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

© Copyright 2021: Τραντάς Νικόλαος-Παναγιώτης

Απαγορεύεται η αναδημοσίευση, η αναπαραγωγή, ολική, μερική ή περιληπτική, ή η απόδοση κατά παράφραση ή διασκευή του περιεχομένου της παρούσας εργασίας με οποιονδήποτε τρόπο, μηχανικό, ηλεκτρονικό, φωτοτυπικό, ηχογράφηση ή άλλο, χωρίς προηγούμενη γραπτή άδεια του συγγραφέα.

Νόμος 2121/1993 και κανόνες του Διεθνούς Δικαίου, που ισχύουν στην Ελλάδα.



---

## *ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ*

---

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί το επιστέγασμα της εκπαιδευτικής διαδικασίας και σηματοδοτεί τη λήξη του προπτυχιακού κύκλου σπουδών. Ως εκ τούτου, θέλω να ευχαριστήσω ειλικρινά την οικογένειά μου για την απεριόριστη και πάσης φύσεως στήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια, έτσι ώστε να καταφέρω να φτάσω μέχρι εδώ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Στέργιο Μαυρομάτη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη μεγάλη εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου καθόλη τη διάρκεια αυτού του τελευταίου ακαδημαϊκού έτους, καθώς επίσης και για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης του θέματος. Παράλληλα, οφείλω να ευχαριστήσω τους κ. Βασίλειο Ματράγκο, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και κ. Ευάγγελο Ζαχαρή, της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής Ε.Μ.Π., για την ευχάριστη και εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους και τους φίλους μου, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου και έκαναν την περίοδο αυτή της ζωής μου, παρά τις όποιες δυσκολίες, πραγματικά αξιομνημόνευτη.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να σταθώ στους εθελοντές εκείνους, που παρά το δικό τους βαρύ καθημερινό φόρτο ανταποκρίθηκαν στο κάλεσμα και συνέδραμαν στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας αυτής, χωρίς να προσδοκούν κανένα αντάλλαγμα. Γι' αυτό το λόγο σας ευχαριστώ όλους, αλλά και τον κάθε ένα από εσάς ξεχωριστά.

18 Ιουλίου 2021





*Αν είναι να κάνεις κάτι...*

*καν' το καλά!*



---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

### **Ανάπτυξη Νέου Μαθηματικού Προσομοιώματος για τον Ελιγμό της Προσπέρασης σε Οδούς Δύο Λωρίδων Κυκλοφορίας με Χρήση Πραγματικών Δεδομένων από Οδικό Πείραμα**

**Νικόλαος-Παναγιώτης Τραντάς**

**Επιβλέπων:** Σ. Μαυρομάτης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός νέου μαθηματικού προσομοιώματος για την προτυποποίηση της τροχιάς ενός οχήματος που εκτελεί ελιγμό προσπέρασης σε οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Για την επιλογή του κατάλληλου πυρήνα αυτού του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση της υπάρχουσας Βιβλιογραφίας, προκειμένου να εντοπιστούν οι πλέον καίριες έρευνες και στη συνέχεια να σκιαγραφηθούν οι συνήθειες μεθοδολογίες και να προσδιοριστούν οι υποσχόμενες ερευνητικές κατευθύνσεις. Τελικά, ως μαθηματικό προσομοίωμα επιλέχθηκε μια αλληλουχία διαδοχικών παραμετρικών τόξων κλωθοειδούς.

Στη συνέχεια, διοργανώθηκε και διεξήχθη ένα οδικό πείραμα προσπεράσεων, στο οποίο οι τροχιές των οχημάτων καταγράφηκαν με την τεχνική RTK GPS. Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πείραμα κατασκευάστηκε μια βάση δεδομένων. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ορθή δόμηση της βάσης αυτής, ώστε να μπορεί να επεκταθεί μελλοντικά και να αποτελέσει σημείο αναφοράς για συναφείς επιστημονικές έρευνες.

Οι τροχιές των προσπεράσεων χρησιμοποιήθηκαν για τον αριθμητικό προσδιορισμό των γεωμετρικών παραμέτρων του προτεινόμενου μαθηματικού προσομοιώματος. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε με τη συνδυαστική χρήση του διαγράμματος αζιμούθιων και της πολυωνυμικής παλινδρόμησης. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής αναπτύχθηκε ένα αυτοματοποιημένο πρόγραμμα επεξεργασίας. Έπειτα, οι παράμετροι που εξήχθησαν αποτέλεσαν το στατιστικό δείγμα με το οποίο κατασκευάστηκαν μοντέλα πρόβλεψης για τις κυριότερες συνιστώσες του μαθηματικού προσομοιώματος. Με τα μοντέλα αυτά είναι δυνατή η χάραξη σε πραγματικό χρόνο μιας ιδεατής τροχιάς αναφοράς για διάφορα σενάρια προσπέρασης. Ως εκ τούτου, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε Προηγμένα Συστήματα Υποβοήθησης Οδήγησης (ADAS) και τελικά να βρουν εκτενή εφαρμογή σε αυτόματα οχήματα.

### **Φράσεις-κλειδιά**

Αυτόματα Οχήματα, Οδικό Πείραμα, Προσπέραση, Real Time Kinematics, Βάση Δεδομένων, Διάγραμμα Αζιμούθιων, Παλινδρόμηση, Μοντέλα Πρόβλεψης



---

## *ABSTRACT*

---

### **Development of New Mathematical Model for the Overtaking in Two Lane Roads Using Real Data from a Driving Experiment**

**Trantas Nikolaos-Panagiotis**

**Supervisor:** S. Mavromatis, Assistant Professor N.T.U.A.

The objective of this Diploma Thesis is the development of a new model for the mathematical description of a vehicle's trajectory during overtaking, in a two-lane road. The kernel of this model is a product of extensive Literature review, during which the latest scientific trends were captured and the most promising research recommendations were outlined. Finally, a sequence of successive parametric clothoid arcs was chosen to comprise the mathematical model.

Next, the RTK GPS technique was utilized to record vehicle trajectory data during an overtaking driving experiment that was organized and carried out for this purpose. The collected data were stored in a purpose-built database. A great deal of effort was put in the construction of this database, so as it could be expanded upon and used as reference for future scientific research.

The recorded vehicle trajectories were utilized for the quantification of the various geometric parameters of the proposed mathematical model. The analysis was based on a combined method that made use of the azimuth diagram and polynomial regression and was carried out entirely in a program that was developed in order to fully automate said process. Then, predictive models were formulated for each one of the most critical components of the mathematical model, using as statistical sample the extracted geometric parameters. These predictive models could be used in real time trajectory planning for various overtaking scenarios. As such, they could be incorporated in Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) modules and eventually be deployed in automated vehicles.

#### **Key-phrases**

Automated Vehicles, Driving Experiment, Overtaking, Real Time Kinematics, Database, Azimuth Diagram, Regression, Predictive Models



---

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>i</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>xix</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	2
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
1.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ.....	4
1.4 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	4
1.5 ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	4
<b>2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	<b>6</b>
2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΕΔΙΟΥ .....	7
2.1.1 Next Generation Simulation.....	7
2.1.1.1 Μοντελοποίηση της τροχιάς προσπέρασης μέσω μηχανικής μάθησης	8
2.1.1.2 Επίδραση της κυκλοφορίας στην αλλαγή λωρίδας.....	10
2.1.1.3 Διερεύνηση των προαιρετικών αλλαγών λωρίδας.....	13
2.1.1.4 Μοντέλο για την εγκάρσια συνιστώσα της αλλαγής λωρίδας.....	16
2.1.1.5 Μοντέλο για τη διαμήκη συνιστώσα της αλλαγής λωρίδας.....	19
2.1.2 Καταγραφή αλλαγών λωρίδας με GPS και σαρωτές laser.....	20
2.1.3 Βιντεοσκόπηση προσπεράσεων από εξέδρα πλησίον της οδού.....	23
2.1.4 Βιντεοσκόπηση προσπεράσεων από σημεία παρατήρησης και ελικόπτερο.....	26
2.1.5 Καταγραφή ελιγμών αλλαγής λωρίδας από όχημα εξοπλισμένο με DGPS29	
2.1.6 Καταγραφή προσπεράσεων με τη χρήση Traffic Engineering Logger.....	32
2.1.7 Άλλοι τρόποι καταγραφής προσπεράσεων.....	34
2.1.7.1 Βιντεοσκόπηση από το όχημα που προσπερνάται.....	34
2.1.7.2 Βιντεοσκόπηση από drone.....	35
2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ .....	36

2.2.1 Συνδυασμένη μάθηση της οδηγικής συμπεριφοράς κατά την προσπέραση .....	36
2.2.2 Διερεύνηση της οδηγικής συμπεριφοράς κατά την προσπέραση.....	38
2.2.3 Προτυποποίηση της τροχιάς του οχήματος κατά την προσπέραση.....	40
2.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	44
2.3.1 Γεωμετρική μέθοδος.....	44
2.3.1.1 Πολυώνυμα.....	45
2.3.1.2 Καμπύλες Bezier.....	46
2.3.1.3 Γωνία στροφής των τροχών.....	47
2.3.1.4 Κλωθοειδείς καμπύλες.....	48
2.3.1.5 Σιγμοειδείς καμπύλες.....	50
2.3.2 Δυναμική μέθοδος.....	51
2.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	53
2.4.1 Διακριτοποίηση του ελιγμού της προσπέρασης.....	53
2.4.2 Εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας τροχιάς.....	54
2.4.2.1 Προσαρμογή καμπύλης στο διάγραμμα αζιμούθιων.....	55
2.4.2.2 Προσαρμογή καμπύλης στο διάγραμμα καμπυλότητας.....	56
2.4.2.3 Προσαρμογή καμπύλης στην οριζοντιογραφία.....	57
2.4.3 Διαφορά της ταχύτητας των δύο οχημάτων κατά την προσπέραση.....	58
2.4.4 Εξομάλυνση των δεδομένων που συλλέγονται σε πειράματα πεδίου.....	59
2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	61
<b>3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....</b>	<b>64</b>
3.1 ΚΛΩΘΟΕΙΔΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗ.....	64
3.2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕ ΚΛΩΘΟΕΙΔΕΙΣ.....	70
3.2.1 Τυπική καμπύλη.....	71
3.2.2 S-καμπύλη.....	74
3.2.3 Κλωθοειδής κορυφής.....	77
3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΩΝ.....	78
3.3.1 Περίπτωση συνεχούς συνάρτησης.....	78
3.3.2 Περίπτωση διακριτής συνάρτησης.....	83
3.3.2.1 Προσέγγιση με ευθύγραμμα τμήματα.....	84
3.3.2.2 Προσέγγιση με κυκλικά τόξα.....	87
3.3.3 Εφαρμογές στην Οδοποιία.....	94
3.4 ΔΟΥΦΟΡΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.....	99
3.4.1 Global Navigation Satellite System.....	99



3.4.2 Παράγοντες αύξησης σφαλμάτων στα GNSS.....	100
3.4.3 Differential GNSS.....	104
3.4.4 Real Time Kinematics.....	106
<b>4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....</b>	<b>108</b>
4.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	108
4.1.1 Τοποθεσία.....	110
4.1.1.1 Κριτήρια επιλογής.....	110
4.1.1.2 Τελική επιλογή.....	113
4.1.2 Όργανα συλλογής δεδομένων.....	120
4.1.3 Πρωτόκολλο διεξαγωγής οδικού πειράματος .....	129
4.1.4 Εκτέλεση του οδικού πειράματος.....	136
4.1.5 Προκύπτων δείγμα προσπεράσεων .....	139
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	140
4.2.1 Εφαρμογή της τεχνικής RTK .....	141
4.2.2 Μετασχηματισμός και μετατροπή συντεταγμένων .....	152
4.2.3 Βάση δεδομένων τροχιών.....	157
4.2.4 Διάγραμμα αζιμούθιων .....	161
4.2.5 Μέθοδος κύκλων .....	172
4.2.6 Μέθοδος κλωθοειδών .....	176
4.2.7 Κινηματική Ανάλυση.....	184
4.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	195
4.3.1 Κατασκευή θηκογραμμάτων .....	196
4.3.2 Κατασκευή μοντέλων.....	197
<b>5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>198</b>
<b>6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>208</b>
6.1 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	208
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	210
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....</b>	<b>212</b>



---

## *ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ*

---

**Πίνακας 3.1** Συγκριτικός υπολογισμός των συντεταγμένων μιας κλωθοειδούς, αν ληφθούν υπόψη από ένα έως και επτά πρώτοι όροι. .... 69

**Πίνακας 4.1** Ενδεικτικές τιμές για τα θεωρητικά μήκη των ζωνών προσπέρασης...120

**Πίνακας 4.2** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος των εθελοντών οδηγών ως προς την ηλικία τους. ....137

**Πίνακας 4.3** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος των εθελοντών οδηγών ως προς τα πραγματικά χρόνια οδηγικής εμπειρίας.....137

**Πίνακας 5.1** Οι αριθμητικές τιμές των θηκογραμμάτων όλων των παραμέτρων για το σενάριο 70-90km/h.....201

**Πίνακας 5.2** Οι αριθμητικές τιμές των θηκογραμμάτων όλων των παραμέτρων για το σενάριο 90-110km/h.....202



---

## *EYPETHPIO EIKONΩN*

---

**Εικόνα Εξωφύλλου** (eeNewsEurope, 2017).

**Εικόνα 1.1** Τα έξι επίπεδα αυτοματοποίησης στην οδήγηση (SAE International, 2018).  
..... 2

**Εικόνα 2.1** Το όχημα του πειράματος με τα διάφορα όργανα καταγραφής (αριστερά) και η περιοχή κάλυψης των οργάνων (δεξιά) (Yao et al., 2013, June). ..... 21

**Εικόνα 2.2** Το οπτικό πεδίο των έξι καμερών με την τροχιά των οχημάτων (πάνω) και σκαριφηματική κάτοψη της εξέδρας καταγραφής (Llorca & García, 2011)..... 24

**Εικόνα 2.3** Το όχημα καταγραφής με τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα (Xuan & Coifman, 2006, September). ..... 29

**Εικόνα 2.4** Το όχημα καταγραφής με τις κάμερες τοποθετημένες μέσα στην ειδική βαλίτσα οροφής (αριστερά) και το οπτικό τους πεδίο (δεξιά) (Carlson et al., 2006). 35

**Εικόνα 2.5** Το drone HORUS που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των προσπεράσεων (Vetters & Jaehrig, 2015, October)..... 35

**Εικόνα 2.6** Ο προσομοιωτής του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ (Αλβέρτης, 2020). ..... 42

**Εικόνα 4.1** Η περιοχή της Αττικής στην οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί η τεχνική RTK GNSS. ....111

**Εικόνα 4.2** Η τοποθεσία της διαδρομής του οδικού πειράματος μέσα στην Αττική.  
.....114

**Εικόνα 4.3** Το σημείο εκκίνησης του οδικού πειράματος στο ΣΕΑ Μεσογείων στον Α6. ....114

**Εικόνα 4.4** Η διαδρομή του οδικού πειράματος στο ανατολικό τμήμα του Α6.....115

**Εικόνα 4.5** Μεγεθυμένη άποψη της διαδρομής του οδικού πειράματος. ....116

**Εικόνα 4.6** Αξονομετρική άποψη και μηκοτομή της διαδρομής του οδικού πειράματος.  
.....116

**Εικόνα 4.7** Η τυπική διατομή του Α6 σε τμήμα της διαδρομής του οδικού πειράματος.  
.....117

**Εικόνα 4.8** Οι τέσσερις ζώνες προσπέρασης στη διαδρομή του οδικού πειράματος.  
.....119

**Εικόνα 4.9** Η συσκευή u-blox EVK-6T-0. ....121

**Εικόνα 4.10** Η συσκευή u-blox NEO-7P. ....121

**Εικόνα 4.11** Η συσκευή u-blox C94-M8P-3. ....122

**Εικόνα 4.12** Η αρχική σελίδα της εφαρμογής RTKGPS+ για Android. ....124

**Εικόνα 4.13** Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν στην εφαρμογή RTKGPS+ για σύνδεση με USB. ....124

**Εικόνα 4.14** Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν στην εφαρμογή RTKGPS+ για σύνδεση με Bluetooth.....125

<b>Εικόνα 4.15</b> Τοποθέτηση του δέκτη GNSS στην οροφή των οχημάτων του πειράματος. ....	126
<b>Εικόνα 4.16</b> Προσδιορισμός του σημείου τοποθέτησης του δέκτη GNSS στη διαμήκη (αριστερά) και την εγκάρσια διεύθυνση (δεξιά). ....	126
<b>Εικόνα 4.17</b> Εναπόθεση του smartphone και του u-blox στα πίσω καθίσματα του οχήματος του πειράματος. ....	127
<b>Εικόνα 4.18</b> Εναπόθεση του tablet και το u-blox στα πίσω καθίσματα του οχήματος του πειράματος. ....	127
<b>Εικόνα 4.19</b> Η συσκευή Vericom VC4000RG. ....	128
<b>Εικόνα 4.20</b> Τοποθέτηση του VC4000RG στο εσωτερικό του ανεμοθώρακα. ....	128
<b>Εικόνα 4.21</b> Η διάταξη του VC4000RG και του laptop με το οποίο ήταν συνεχώς συνδεδεμένο. ....	129
<b>Εικόνα 4.22</b> Το φύλλο ορισμού των ζευγών των οδηγών και ανάθεσης των αυξόντων αριθμών στους συμμετέχοντες. ....	130
<b>Εικόνα 4. 23</b> Το ερωτηματολόγιο που συμπλήρωναν οι εθελοντές οδηγοί. ....	131
<b>Εικόνα 4.24</b> Το πρωτόκολλο καταγραφής F.R.O.U.D.E. που συμπληρωνόταν κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος. ....	134
<b>Εικόνα 4.25</b> Άποψη της διάταξης των οργάνων στο εσωτερικό ενός οχήματος του πειράματος κατά τη διάρκεια μιας καταγραφής. ....	138
<b>Εικόνα 4.26</b> Το οπτικό πεδίο του μέλους της ερευνητικής ομάδας που καθόταν στη θέση του συνοδηγού και ο εξοπλισμός που έπρεπε να διαχειρίζεται. ....	139
<b>Εικόνα 4.27</b> Η εντολή εκτέλεσης του εκτελέσιμου αρχείου TEQC στη γραμμή εντολών των Windows. ....	142
<b>Εικόνα 4.28</b> Το γραφικό περιβάλλον χρήστη του προγράμματος RTKPOST. ....	142
<b>Εικόνα 4.29</b> Οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους του RTKPOST για την παρούσα επεξεργασία. ....	143
<b>Εικόνα 4.30</b> Τα αρχεία εισόδου και το αρχείο εξόδου στο πρόγραμμα RTKPOST. ....	144
<b>Εικόνα 4.31</b> Η απεικόνιση της τροχιάς ενός οχήματος στο RTKPLOT μετά από τη διόρθωσή της με την τεχνική RTK. ....	146
<b>Εικόνα 4.32</b> Η ποιότητα του σήματος GPS υποβαθμίζεται σημαντικά στο σταθμό διοδίων. ....	147
<b>Εικόνα 4.33</b> Η απεικόνιση της τροχιάς ενός οχήματος στο Google Earth Pro μετά την εφαρμογή της τεχνικής RTK. ....	148
<b>Εικόνα 4.34</b> Το αρχείο εξόδου που προκύπτει από την επεξεργασία με το πρόγραμμα RTKPOST. ....	149
<b>Εικόνα 4.35</b> Το αρχείο εξόδου σε μια πιο ευανάγνωστη μορφή. ....	150
<b>Εικόνα 4.36</b> Το τελικό αρχείο εξόδου με τις πληροφορίες χωρισμένες σε στήλες. ....	150
<b>Εικόνα 4.37</b> Η κεντρική σελίδα του προγράμματος COORD_GR. ....	152
<b>Εικόνα 4.38</b> Για τον απευθείας μετασχηματισμό πολλών συντεταγμένων επιλέγεται η δυνατότητα χρήσης αρχείων. ....	153
<b>Εικόνα 4.39</b> Το φύλλο εισαγωγής των παραμέτρων NMEA στο αρχείο μετατροπής των συντεταγμένων. ....	154
<b>Εικόνα 4.40</b> Το φύλλο που εμφανίζονται οι συντεταγμένες στην επιθυμητή για τη μετατροπή τους μορφή. ....	155
<b>Εικόνα 4.41</b> Το αρχείο κειμένου με τις συντεταγμένες της τροχιάς στο σύστημα WGS84 και σε μορφή DMS. ....	155

<b>Εικόνα 4.42</b> Το αρχείο εισόδου στο πρόγραμμα COORD_GR. ....	156
<b>Εικόνα 4.43</b> Η σελίδα μετασχηματισμού συντεταγμένων από αρχείο στο πρόγραμμα COORD_GR. ....	156
<b>Εικόνα 4.44</b> Τα περιεχόμενα του αρχείου εξόδου του προγράμματος COORD_GR. ....	157
<b>Εικόνα 4.45</b> Το ειδικά διαμορφωμένο αρχείο που λειτουργεί ως βάση δεδομένων για τις τροχιές. ....	158
<b>Εικόνα 4.46</b> Οπτικός εντοπισμός μιας προσπέρασης στο Google Earth Pro.....	159
<b>Εικόνα 4.47</b> Μέρος από πρωτόκολλο καταγραφής προσπεράσεων που συμπληρώθηκε επιτόπου στο πείραμα. ....	160
<b>Εικόνα 4.48</b> Τα βέλη που αποτελούν την τροχιά στο Google Earth Pro εμπεριέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το στίγμα GPS. ....	160
<b>Εικόνα 4.49</b> Μέρος από πρωτόκολλο καταγραφής προσπεράσεων που συμπληρώθηκε πλήρως κατά την επεξεργασία. ....	161
<b>Εικόνα 4.50</b> Ο υπολογισμός του διαγράμματος αξιμούθιων στο αυτοματοποιημένο Excel της επεξεργασίας. ....	163
<b>Εικόνα 4.51</b> Ο καθορισμός των επιμέρους φάσεων και η δευτερογενής μείωση δεδομένων στο αρχείο Excel της επεξεργασίας. ....	172
<b>Εικόνα 4.52</b> Η μέθοδος κύκλων στο αρχείο επεξεργασίας Excel. ....	175
<b>Εικόνα 4.53</b> Τμήμα του φύλλου εργασίας με τους υπολογισμούς για τη μέθοδο των κλωθοειδών. ....	183
<b>Εικόνα 4.54</b> Η περιοχή των υπολογισμών της κινηματικής ανάλυσης στο αρχείο Excel της επεξεργασίας. ....	189
<b>Εικόνα 4.55</b> Το φύλλο εργασίας “Data Input”. ....	191
<b>Εικόνα 4.56</b> Το φύλλο εργασίας “Clothoid Analysis”. ....	192
<b>Εικόνα 4.57</b> Το φύλλο εργασίας “Circle Analysis”. ....	193
<b>Εικόνα 4.58</b> Το φύλλο εργασίας “Data Output”. ....	194
<b>Εικόνα 5.1</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 1 και για το σενάριο των 70-90km/h. ....	203
<b>Εικόνα 5.2</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 2 και για το σενάριο των 70-90km/h. ....	203
<b>Εικόνα 5.3</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 4 και για το σενάριο των 70-90km/h. ....	204
<b>Εικόνα 5.4</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 5 και για το σενάριο των 70-90km/h. ....	205
<b>Εικόνα 5.5</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 1 και για το σενάριο των 90-110km/h. ....	205
<b>Εικόνα 5.6</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 2 και για το σενάριο των 90-110km/h. ....	206
<b>Εικόνα 5.7</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 4 και για το σενάριο των 90-110km/h. ....	206
<b>Εικόνα 5.8</b> Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 5 και για το σενάριο των 90-110km/h. ....	207





---

## *ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ*

---

<b>Σχήμα 2.1</b> Αεροφωτογραφίες των οδικών τμημάτων των I-80 (αριστερά) και US-101 (δεξιά) με επισημασμένο το οπτικό πεδίο της κάθε μιας κάμερας και των κτιρίων παρατήρησης (Federal Highway Administration Research and Technology). ....	8
<b>Σχήμα 2.2</b> Το διάγραμμα των εγκάρσιων συντεταγμένων X μιας τροχιάς μοτοσυκλέτας πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου (Ghaffari et al., 2011, November).....	9
<b>Σχήμα 2.3</b> Η γενική περίπτωση μιας αλλαγής λωρίδας σε οδό πολλών λωρίδων κυκλοφορίας μαζί με τις ονομασίες των διάφορων οχημάτων (Moridpour et al., 2010). ....	11
<b>Σχήμα 2.4</b> Ταχύτητες του rear οχήματος (οριζόντιος άξονας) και του lag στην εναλλακτική λωρίδα (κατακόρυφος άξονας) για τους ελιγμούς βαρέων (αριστερά) και επιβατικών οχημάτων (δεξιά) (Moridpour et al., 2010). ....	12
<b>Σχήμα 2.5</b> Το διάγραμμα του κενού χώρου στην αρχική λωρίδα κίνησης μεταξύ του οχήματος ενδιαφέροντος και του μπροστινού (front space gap) και του οχήματος ενδιαφέροντος και του πίσω (rear space gap) οχήματος για τους ελιγμούς βαρέων (αριστερά) και επιβατικών οχημάτων (δεξιά) (Moridpour et al., 2010). ....	12
<b>Σχήμα 2.6</b> Καθορισμός των σημείων αρχής και τέλους του ελιγμού αλλαγής λωρίδας (Wang et al., 2014). ....	15
<b>Σχήμα 2.7</b> Διαγράμματα εγκάρσιας μετατόπισης και προσαρμογή σε αυτά πολυωνύμων πέμπτου βαθμού (Wang et al., 2014). ....	15
<b>Σχήμα 2.8</b> Τα διαγράμματα εγκάρσιας μετατόπισης για CLCE (αριστερά) και DLCE (δεξιά) (Yang et al., 2015). ....	17
<b>Σχήμα 2.9</b> Τυπικές καμπύλες για την εγκάρσια μετατόπιση (αριστερά), την εγκάρσια ταχύτητα (κέντρο) και την εγκάρσια επιτάχυνση (δεξιά) σε μια CLCE (Yang et al., 2015).....	18
<b>Σχήμα 2.10</b> Η τροχιά του οχήματος στην αλλαγή λωρίδας θεωρείται πολώνυμο πέμπτου βαθμού (Yao et al., 2013, June). ....	22
<b>Σχήμα 2.11</b> Η θέση των γύρω οχημάτων ως προς το όχημα καταγραφής κατά τη διάρκεια των αριστερών (αριστερά) και των δεξιών αλλαγών λωρίδας (δεξιά) (Yao et al., 2013, June). ....	22
<b>Σχήμα 2.12</b> Σκαριφηματική απεικόνιση του μοντέλου προσπέρασης μαζί με τις επιμέρους αποστάσεις (Polus et al., 2000). ....	27
<b>Σχήμα 2.13</b> Η μέση τιμή της εγκάρσιας απόστασης των τροχιών από την τροχιά αναφοράς ως συνάρτηση του μήκους της τελευταίας (Xuan & Coifman, 2006, September). ....	31
<b>Σχήμα 2.14</b> Η τροχιά ενός οχήματος που προσπερνάει και τα σημεία αρχής και τέλους των δύο DLC (Xuan & Coifman, 2006, September). ....	32
<b>Σχήμα 2.15</b> Το οδικό τμήμα της προσομοίωσης και ένας τυπικός ελιγμός προσπέρασης (Lu et al., 2018). ....	37
<b>Σχήμα 2.16</b> Η διαδρομή του πειράματος στον προσομοιωτή με το σημείο έναρξης κάτω αριστερά (Jenkins & Rilett, 2004). ....	39
<b>Σχήμα 2.17</b> Προσδιορισμός ακτίνων με γραμμική παλινδρόμηση στο διάγραμμα αζιμούθιων (Αλβέρτης, 2020). ....	42

<b>Σχήμα 2.18</b> Αλλαγή λωρίδας που η εγκάρσια μετατόπιση είναι πολυώνυμο 3 <sup>ου</sup> βαθμού ως προς τη διαμήκη (Yang et al., 2018).	45
<b>Σχήμα 2.19</b> Μια τετραγωνική καμπύλη Bezier που περιγράφει μαθηματικά μια αλλαγή λωρίδας (Chen et al., 2013, July).	47
<b>Σχήμα 2.20</b> Η γωνία στροφής του τιμονιού (κέντρο) και ο προσανατολισμός του οχήματος (κάτω) κατά τη διάρκεια μιας αλλαγής λωρίδας προς τα αριστερά (πάνω) (Godthelp, 1985).	47
<b>Σχήμα 2.21</b> Η γωνία στροφής του τιμονιού (κάτω) κατά τη διάρκεια ενός ελιγμού αλλαγής λωρίδας (πάνω) (Salvucci & Liu, 2002).	48
<b>Σχήμα 2.22</b> Μια τροχιά αλλαγής λωρίδας (όχι υπό κλίμακα) που αποτελείται από τέσσερα διαδοχικά τόξα κλωθοειδούς (Wilde, 2009, October).	49
<b>Σχήμα 2.23</b> Μια τυπική τροχιά αποφυγής εμποδίου που βασίζεται στη σιγμοειδή καμπύλη (Isermann et al., 2012).	51
<b>Σχήμα 2.24</b> Το διάγραμμα της εγκάρσιας επιτάχυνσης σε μια αλλαγή λωρίδας από το οποίο προκύπτει και το lateral jerk συναρτήσεως του χρόνου (Chee et al., 1995, June).	52
<b>Σχήμα 2.25</b> Η τροχιά ενός ελιγμού προσπέρασης και οι τρεις φάσεις από τις οποίες αποτελείται (Zhang et al., 2013, October).	53
<b>Σχήμα 2.26</b> Οι πέντε φάσεις από τις οποίες αποτελείται η τροχιά ενός ελιγμού προσπέρασης (Benedetto et al., 2006).	54
<b>Σχήμα 2.27</b> Τα πέντε σημεία ενδιαφέροντος στη διαδικασία της προσπέρασης (Asaithambi & Shrivani, 2017).	54
<b>Σχήμα 2.28</b> Το διάγραμμα αξιμούθιων ενός οδικού τμήματος και η αντίστοιχη οριζοντιογραφία (Karamanou et al., 2009).	55
<b>Σχήμα 2.29</b> Διαχωρισμός των γεωμετρικών στοιχείων μιας οδού με βάση το διάγραμμα καμπυλότητας (Holgado-Barco et al., 2015).	56
<b>Σχήμα 2.30</b> Παράδειγμα απομόνωσης των τόξων συναρμογής από τα υπόλοιπα στοιχεία ενός οδικού τμήματος (Holgado-Barco et al., 2015).	57
<b>Σχήμα 2.31</b> Εξομάλυνση των δεδομένων στο διάγραμμα αξιμούθιων (Wang et al., 2017).	60
<b>Σχήμα 3.1</b> Τμήμα μιας κλωθοειδούς καμπύλης και ένα τυχόν σημείο Σ πάνω σε αυτή (Κανελλαΐδης και συν., 2017).	65
<b>Σχήμα 3.2</b> Το πλήρες ανάπτυγμα της κλωθοειδούς καμπύλης (Kasper et al., 1956).	66
<b>Σχήμα 3.3</b> Τμήμα κλωθοειδούς καμπύλης με επισημασμένα κάποια βοηθητικά μεγέθη (Μαυρομάτης, 2018).	70
<b>Σχήμα 3.4</b> Μια τυπική καμπύλη με ασύμμετρες κλωθοειδείς εισόδου και εξόδου, με μεγέθυνση στο σημείο αρχής, στο σημείο πέρατος και στην περιοχή του σημείου K (Kasper et al., 1956).	71
<b>Σχήμα 3.5</b> Μια άλλη απεικόνιση τυπικής καμπύλης με ασύμμετρες κλωθοειδείς και μεγέθυνση στην περιοχή της κορυφής της πολυγωνικής (Kasper et al., 1956).	73
<b>Σχήμα 3.6</b> Η τυπική διάταξη μιας S-καμπύλης σε ένα οδικό τμήμα (Κανελλαΐδης και συν., 2017).	75
<b>Σχήμα 3.7</b> Παράδειγμα S-καμπύλης (Κανελλαΐδης και συν., 2017).	75
<b>Σχήμα 3.8</b> Η τυπική διάταξη μιας κλωθοειδούς κορυφής (Κανελλαΐδης και συν., 2017).	77

<b>Σχήμα 3.9</b> Η γωνία διεύθυνσης ενός ευθύγραμμου τμήματος (αριστερά) και η κλίση του (δεξιά).....	78
<b>Σχήμα 3.10</b> Εύρεση της καμπυλότητας στη γραφική παράσταση μιας συνάρτησης με γεωμετρική επίλυση. ....	79
<b>Σχήμα 3.11</b> Συγκριτική παράθεση της ίδιας συνάρτησης σε διακριτή (αριστερά) και συνεχή μορφή (δεξιά).....	84
<b>Σχήμα 3.12</b> Μεταβολή της απόστασης και της γωνίας διεύθυνσης κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος σε ένα τυχαίο σημείο μιας διακριτής συνάρτησης. ....	85
<b>Σχήμα 3.13</b> Η απόκλιση μεταξύ μιας καμπύλης και μιας τεθλασμένης γραμμής αυξάνεται όσο αραιώνουν τα δεδομένα. ....	86
<b>Σχήμα 3.14</b> Διαφορετική μέθοδος παρεμβολής οδηγεί σε διαφορετικές τιμές για το μήκος της τροχιάς και τη γωνία διεύθυνσης. ....	87
<b>Σχήμα 3.15</b> Από δυο σημεία διέρχονται άπειροι κύκλοι διαφορετικής ακτίνας.....	88
<b>Σχήμα 3.16</b> Σκαρίφημα για την απόδειξη του Θεωρήματος 3.1.....	88
<b>Σχήμα 3.17</b> Τα κυκλικά τόξα που προσαρμόζονται σε διαδοχικά σημεία της διακριτής συνάρτησης πρέπει να αλληλοεπικαλύπτονται.....	90
<b>Σχήμα 3.18</b> Υπολογισμού της μεταβολής της απόστασης και της γωνίας διεύθυνσης κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος σε ένα τυχαίο σημείο μιας διακριτής συνάρτησης.....	90
<b>Σχήμα 3.19</b> Σκαρίφημα για την απόδειξη του Θεωρήματος 3.3.....	92
<b>Σχήμα 3.20</b> Το διάγραμμα αζιμούθιων μιας ευθυγραμμίας είναι μιας οριζόντια γραμμή.....	96
<b>Σχήμα 3.21</b> Το διάγραμμα αζιμούθιων ενός κυκλικού τόξου είναι μια κεκλιμένη γραμμή.....	96
<b>Σχήμα 3.22</b> Το διάγραμμα αζιμούθιων μιας κλωθοειδούς είναι μια παραβολή. ....	97
<b>Σχήμα 3.23</b> Το διάγραμμα αζιμούθιων που αντιστοιχεί σε ένα υφιστάμενο οδικό τμήμα (Βασιλάς, 2013). ....	97
<b>Σχήμα 3.24</b> Το σημείο τομής τεσσάρων σφαιρών στο χώρο αντιπροσωπεύει το σημείο στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης GNSS (GISGeography, 2021).....	99
<b>Σχήμα 3.25</b> Η φαινόμενη απόσταση ενός δέκτη από ένα δορυφόρο GNSS αυξάνεται κατά διάφορες ποσότητες που καλούνται σφάλματα (Clync, 2000). ....	101
<b>Σχήμα 3.26</b> Σε αστικά κέντρα με υψηλά κτίρια το ίδιο σήμα φτάνει στο δέκτη από πολλές διαφορετικές διαδρομές (ARGUS TRACKING, 2020).....	102
<b>Σχήμα 3.27</b> Ένα δορυφορικό σήμα διαθλάται κάθε φορά που εισέρχεται στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας (Wikimedia Commons). ....	103
<b>Σχήμα 3.28</b> Η αρχή λειτουργίας του DGPS (CGS Europe).....	105

<b>Σχήμα 4.1</b> Το διάγραμμα αζιμούθιων (πάνω) και η αντίστοιχη οριζοντιογραφία (κάτω) μιας τυπικής προσπέρασης. ....	163
<b>Σχήμα 4.2</b> Διακριτοποίηση της προσπέρασης σε επιμέρους φάσεις με βάση το διάγραμμα αζιμούθιων. ....	165
<b>Σχήμα 4.3</b> Εντοπισμός προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων. ....	166
<b>Σχήμα 4.4</b> Υποβάθμιση της ποιότητας του διαγράμματος αζιμούθιων που οφείλεται στο GPS.....	166
<b>Σχήμα 4.5</b> Υποβάθμιση της ποιότητας του διαγράμματος αζιμούθιων που οφείλεται στην οδηγική συμπεριφορά. ....	167

<b>Σχήμα 4.6</b> Ένα ακόμη διάγραμμα αζιμούθιων που η μορφή του αποκλίνει από την προσδοκώμενη. ....	168
<b>Σχήμα 4.7</b> Μεγέθυνση της “περιοχής αρχής” για τη Φάση 4 της προσπέρασης. ....	169
<b>Σχήμα 4.8</b> Καθορισμός των επιμέρους φάσεων μιας προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων. ....	170
<b>Σχήμα 4.9</b> Μόρφωση του διαγράμματος αζιμούθιων για τα δευτερογενή δεδομένα με χρήση μετάθεσης των αξόνων. ....	171
<b>Σχήμα 4.10</b> Οι πέντε φάσεις μιας προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων. ....	173
<b>Σχήμα 4.11</b> Εξαγωγή των παραμέτρων από το διάγραμμα αζιμούθιων με τη μέθοδο των κύκλων. ....	173
<b>Σχήμα 4.12</b> Η οριζοντιογραφία μιας προσπέρασης υπό τη θεώρηση ότι κάθε φάση αποτελείται από ένα κυκλικό τόξο. ....	175
<b>Σχήμα 4.13</b> Οι φάσεις και οι υπό-φάσεις μιας προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων. ....	178
<b>Σχήμα 4.14</b> Η επαναληπτική διαδικασία καθορισμού του σημείου μετάβασης από την Υπό-Φάση 4a στην Υπό-Φάση 4b. ....	179
<b>Σχήμα 4.15</b> Τα έξι σημεία μιας φάσης που δε λογίζονται ως εσωτερικά συνοριακά σημεία των δύο υπό-φάσεων. ....	180
<b>Σχήμα 4.16</b> Προσαρμογή πολωνύμων δευτέρου βαθμού στο διάγραμμα αζιμούθιων. ....	180
<b>Σχήμα 4.17</b> Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των δύο οχημάτων τη στιγμή έναρξης της προσπέρασης. ....	187
<b>Σχήμα 4.18</b> Υπολογισμός της θέσης του οχήματος που προσπερνούνται με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. ....	188
<b>Σχήμα 5.1</b> Σύγκριση των ακτίνων που προέκυψαν με τις δύο μεθόδους για το πρώτο σενάριο του οδικού πειράματος. ....	198
<b>Σχήμα 5.2</b> Σύγκριση των ακτίνων που προέκυψαν με τις δύο μεθόδους για το δεύτερο σενάριο του οδικού πειράματος. ....	198
<b>Σχήμα 5.3</b> Σύγκριση του μήκους των επιμέρους υπό-φάσεων για το πρώτο σενάριο του οδικού πειράματος. ....	199
<b>Σχήμα 5.4</b> Σύγκριση του μήκους των επιμέρους υπό-φάσεων για το δεύτερο σενάριο του οδικού πειράματος. ....	199
<b>Σχήμα 5.5</b> Η μέση επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάει κατά τη διάρκεια της εκάστοτε φάσης και για τα δύο σενάρια του οδικού πειράματος. ....	200
<b>Σχήμα 5.6</b> Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού από τη μέθοδο των κλωθοειδών για όλες τις υπό-φάσεις και των δύο σεναρίων. ....	200
<b>Σχήμα 5.7</b> Σύγκριση του συνολικού απαιτούμενου μήκους προσπέρασης για τα δύο σενάρια του οδικού πειράματος. ....	201

---

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

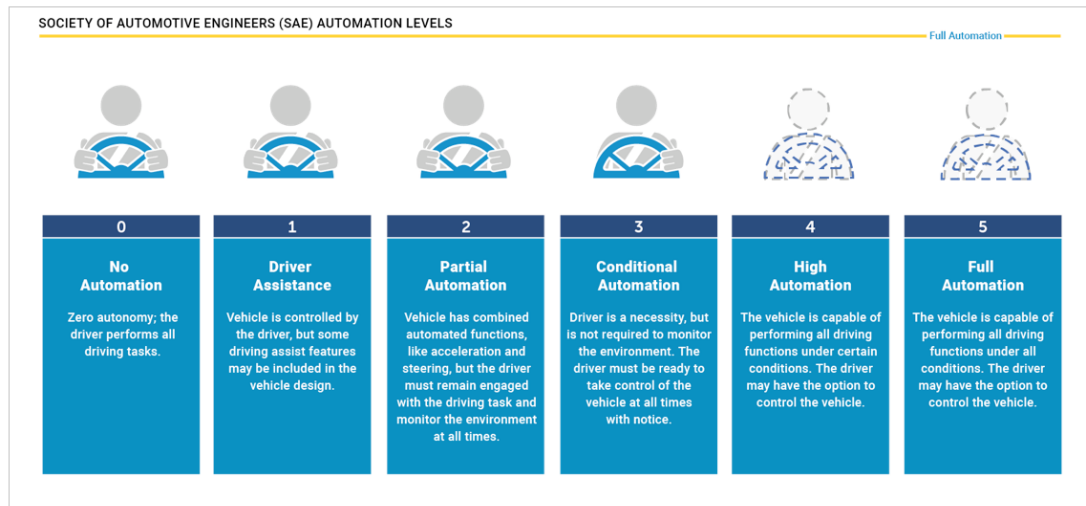
Η συχνή οδήγηση σε υπεραστικό περιβάλλον αποτελεί πραγματικότητα για μια μεγάλη μερίδα του πληθυσμού στην Ευρώπη αλλά και παγκοσμίως. Οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές και η ανάπτυξη των επαρχιακών πόλεων τις καθιστά ελκυστικούς προορισμούς. Παρότι, όμως, με την πάροδο των ετών το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων τείνει να βελτιώνεται και να επεκτείνεται, ένα σημαντικό μέρος των υπεραστικών μετακινήσεων εξακολουθεί να συντελείται στο επαρχιακό και το εθνικό οδικό δίκτυο των χωρών. Οι οδοί αυτοί αρκετές φορές έχουν διατομή δύο λωρίδων κυκλοφορίας, ενώ συνήθως δε διαθέτουν νησίδα ή κεντρικά στηθαία ασφαλείας. Έτσι, η πραγματοποίηση προσπεράσεων προϋποθέτει την είσοδο του οχήματος στη λωρίδα κυκλοφορίας της αντίθετης κατεύθυνσης και την κατάληψή της για μερικά δευτερόλεπτα. Ακόμα και με τον καθορισμό ζωνών προσπέρασης που διασφαλίζουν στους οδηγούς επαρκή ορατότητα, αυτή η δημιουργία πιθανών εμπλοκών εγκυμονεί τον κίνδυνο να πάει κάτι στραβά.

Πιθανές καταστάσεις θα μπορούσαν να είναι, μεταξύ άλλων, η υπερεκτίμηση της απόστασης ή της ταχύτητας του αντίθετα κινούμενου οχήματος, η εκτέλεση ελιγμού και μετά το πέρας της ζώνης προσπέρασης ή ακόμα και η απώλεια ελέγχου του οχήματος εξαιτίας υψηλής ταχύτητας κίνησης. Γίνεται αντιληπτό, επομένως, πως η πραγματοποίηση προσπέρασης σε οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας αποτελεί έναν πολύ ριψοκίνδυνο ελιγμό. Επιπλέον, στην περίπτωση πρόκλησης ατυχήματος κατά τη διάρκεια ελιγμού, οι επιπτώσεις στους επιβάτες αναμένεται να είναι μάλλον σοβαρές, αφού τα ατυχήματα αυτά εμφανίζουν τη μεγαλύτερη σοβαρότητα. Αυτό οφείλεται στην ίδια τη φύση του ελιγμού, που περιλαμβάνει πολύ υψηλές ταχύτητες κίνησης και διασταύρωση με αντίθετα κινούμενα οχήματα, κάτι που ενέχει τον κίνδυνο μετωπικών συγκρούσεων. Για όλους τους παραπάνω λόγους και όχι μόνο, στις οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας πραγματοποιείται ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των συνολικών οδικών ατυχημάτων.

Καθώς όλο και περισσότερες αρμόδιες υπηρεσίες αντιλαμβάνονται τη σοβαρότητα του προβλήματος αυτού, τα διάφορα κράτη εκπονούν στρατηγικούς σχεδιασμούς που στοχεύουν στη συνεχή μείωση των οδικών ατυχημάτων και τελικά στην εξάλειψή τους. Σε αυτό αναμένεται να παίξει καθοριστικό ρόλο η ανάπτυξη και καθιέρωση των αυτόματων οχημάτων.

Η ιδέα της αυτόματης οδήγησης δεν αποτελεί πρόσφατη επιδίωξη. Εδώ και αρκετές δεκαετίες, αρχικά οραματιστές του μέλλοντος, έπειτα συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας και τελικά οι ίδιες οι αυτοκινητοβιομηχανίες έκαναν λόγο για οχήματα, τα οποία κινούνται χωρίς οδηγό. Σήμερα, η κατασκευή ημιαυτόματων οχημάτων βρίσκεται όσο ποτέ στο προσκήνιο και αποτελεί μια ερευνητική ενασχόληση αιχμής, σε παγκόσμιο επίπεδο. Εξίσου σημαντικό πεδίο έρευνας, όμως, αποτελεί και η ομαλή ενσωμάτωση και η διασφάλιση της αρμονικής λειτουργίας της νέας αυτής τεχνολογίας στην ήδη υπάρχουσα συγκοινωνιακή υποδομή. Εξάλλου, και δεδομένου πως η πλήρης αυτοματοποίηση απέχει πολλά χρόνια ακόμα από την εμπορική εκμετάλλευση, θα υπάρξει μια παρατεταμένη περίοδος κατά την οποία όλο και περισσότερο αυτοματοποιημένα οχήματα θα καλούνται να συνυπάρχουν με τα παραδοσιακά οχήματα.

Στην *Εικόνα 1.1* διακρίνονται τα έξι επίπεδα αυτοματοποίησης, όπως προτυποποιήθηκαν από την Εταιρία Μηχανικών Αυτοκινήτου (Society of Automotive Engineers). Σήμερα, το περισσότερο που έχει επιτευχθεί τεχνολογικά είναι ένα επίπεδο αυτοματοποίησης ανάμεσα στο 2 και το 3. Οχήματα που ανήκουν στο επίπεδο 2 κινούνται ήδη στις οδούς του κόσμου και μάλιστα σε όχι ασήμαντους αριθμούς. Αντιλαμβάνεται κανείς, πως υπάρχει πολύς δρόμος ακόμη μέχρι το επίπεδο 5.



*Εικόνα 1.1* Τα έξι επίπεδα αυτοματοποίησης στην οδήγηση (SAE International, 2018).

## 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ήδη τις δύο τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιείται πολύ εντατική έρευνα πάνω στην ανάπτυξη Προηγμένων Συστημάτων Υποβοήθησης της Οδήγησης (ADAS), τα οποία στη συνέχεια ενσωματώνονται σταδιακά στα οχήματα του εμπορίου. Σχετικά με την οδήγηση σε υπεραστικό περιβάλλον, υπάρχουν δύο δυνατές κινήσεις που μπορεί να εκτελέσει ένα όχημα. Η οδήγηση εντός της λωρίδας κυκλοφορίας (lane keeping) και η αλλαγή λωρίδας (lane changing). Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία, αυτή αποτελεί ουσιαστικά κίνηση με ένα βαθμό ελευθερίας και επιτυγχάνεται με την κατάλληλη μεταβολή της ταχύτητας του οχήματος. Αυτό το κομμάτι της οδήγησης όχι μόνο έχει μελετηθεί διεξοδικά, αλλά πλέον βρίσκει εκτενή εφαρμογή σε οχήματα που ήδη κινούνται στους δρόμους εδώ και κάποια χρόνια. Συγκεκριμένα, είναι πολλά πλέον τα μοντέλα των οχημάτων που διαθέτουν αισθητήρες αυτόματης ακινητοποίησης σε περίπτωση που εντοπιστεί εμπόδιο στην οδό, συστήματα υποβοήθησης ακολούθησης λωρίδας και άλλες σχετικές διατάξεις.

Αντίθετα, η αλλαγή λωρίδας συνιστά κίνηση με δύο βαθμούς ελευθερίας και απαιτεί τον έλεγχο του οχήματος τόσο στη διαμήκη διεύθυνση της οδού όσο και στην εγκάρσια. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη μεταβολή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του οχήματος, μέσω της κατάλληλης στροφής του τιμονιού. Γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως αποτελεί έναν αρκετά πιο σύνθετο ελιγμό. Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα ασχολείται ενεργά με την έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο ελιγμό και έχουν προταθεί ήδη διάφορες μέθοδοι με τις οποίες δύναται να πραγματοποιηθεί σε

ρεαλιστικές συνθήκες κυκλοφορίας. Ωστόσο, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμα στη φάση ωρίμανσης και δεν έχει βρει ευρεία εφαρμογή στα οχήματα του εμπορίου.

Ένας σύνθετος ελιγμός, που αποτελεί επέκταση της αλλαγής λωρίδας είναι και η προσπέραση. Αποτελεί επέκταση, επειδή ουσιαστικά η προσπέραση εμπεριέχει δύο αλλαγές λωρίδας. Ενώ έχουν διεξαχθεί αρκετά πειράματα, στο πεδίο και στον προσομοιωτή, που εστιάζουν στη μεμονωμένη αλλαγή λωρίδας, εντούτοις η προσπέραση ως σύνολο δεν έχει λάβει τόσο μεγάλη προσοχή. Ακόμη, τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί ή πραγματοποιήθηκαν σε προσομοιωτή είτε βασίζονταν κυρίως στην αξιολόγηση των υπάρχοντων μοντέλων για την Ορατότητα για Προσπέραση (Passing Sight Distance, PSD). Λίγα ήταν τα πειράματα που είχαν ως πρωταρχικό αντικείμενο τη μελέτη της προσπέρασης από τη σκοπιά της τροχιάς που ακολουθεί το όχημα που προσπερνάει.

Παράλληλα, οι περισσότερες θεωρητικές μέθοδοι προσδιορισμού τροχιών για τον ελιγμό αλλαγής λωρίδας χρησιμοποιούν ως παραμετρική καμπύλη κυρίως πολυωνυμικές εκφράσεις. Παρότι η κλωθοειδής καμπύλη είναι γνωστό πως διαθέτει ευνοϊκές ιδιότητες και έχει προταθεί για χρήση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, καμία επιστημονική μελέτη δεν έχει προσπαθήσει να προτυποποιήσει εξ ολοκλήρου τον ελιγμό της προσπέρασης με τόξα κλωθοειδούς και μάλιστα να χρησιμοποιήσει πραγματικά πειραματικά δεδομένα για τη βαθμονόμηση των παραμετρικών σχέσεων. Το πεδίο αυτό φαίνεται να είναι πολλά υποσχόμενο.

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας είναι η διερεύνηση του ελιγμού προσπέρασης σε επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας και η ανάπτυξη ενός νέου μαθηματικού προσομοιώματος για την περιγραφή της τροχιάς του οχήματος που τον εκτελεί, το οποίο βασίζεται σε διαδοχικά τόξα κλωθοειδούς. Σε δεύτερο χρόνο, η βαθμονόμηση του μαθηματικού αυτού προσομοιώματος και η κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης για τον υπολογισμό των κρίσιμότερων γεωμετρικών παραμέτρων του, ώστε να καταστεί δυνατή η χάραξη σε πραγματικό χρόνο τροχιών προσπέρασης που να ανταποκρίνονται σε διάφορα ρεαλιστικά σενάρια προσπέρασης. Προκειμένου να καταστεί αυτό δυνατό, διοργανώθηκε και πραγματοποιήθηκε ένα οδικό πείραμα προσπεράσεων για τη συλλογή πραγματικών δεδομένων από τροχιές οχημάτων και τη μετέπειτα τροφοδοσία τους στα μοντέλα, ως στατιστικό δείγμα.

Δευτερεύοντες στόχοι της εργασίας αυτής είναι να διερευνήσει και να ανακαλύψει νέες παραμέτρους που επιδρούν πάνω στην τροχιά του οχήματος που προσπερνάει κατά τη διάρκεια του ελιγμού και να δοκιμάσει την εφαρμογή μιας νέας μεθόδου καταγραφής και εξαγωγής της τροχιάς ενός οχήματος. Παράλληλα, στοχεύει να αποτελέσει σημείο αναφοράς για μελλοντικές συναφείς έρευνες, μέσω της κατασκευής μιας βάσης δεδομένων με τροχιές προσπεράσεων και να επεκτείνει την υπάρχουσα Βιβλιογραφία με την πρόταση νέων μοντέλων που αφορούν στον ελιγμό της προσπέρασης. Τέλος, η εργασία έχει στόχο τη σύγκριση του προτεινόμενου μαθηματικού προσομοιώματος με ένα αντίστοιχο προσομοίωμα που βασίζεται στα κυκλικά τόξα και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά του ενός σε σχέση με το άλλο, επιβεβαιώνοντας ή καταρρίπτοντας στην πορεία τις συστάσεις της βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα.

### 1.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία τέθηκαν τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα.

- Η τεχνική RTK GPS διαθέτει ικανή ακρίβεια εντοπισμού θέσης, ώστε να μην είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση εξομάλυνσης των δεδομένων των τροχιών που συλλέχθηκαν κατά το οδικό πείραμα προσπεράσεων και τα τελευταία να δύνανται να χρησιμοποιηθούν αυτούσια στην εφαρμογή της μεθοδολογίας.
- Η χρήση διαδοχικών τόξων κλωθοειδούς περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το οδικό πείραμα προσπεράσεων, από τη χρήση διαδοχικών τόξων κύκλου.
- Η χρήση διαδοχικών τόξων κλωθοειδούς, παρά την πολυπλοκότητα που συνεπάγεται, θα μπορούσε να καθιερωθεί ως ένα μαθηματικό προσομοίωμα για την περιγραφή της τροχιάς ενός οχήματος που εκτελεί ελιγμό προσπέρασης.

### 1.4 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της Διπλωματικής αυτής Εργασίας έρχεται να προστεθεί σε μια μικρή λίστα παρόμοιων ερευνητικών ενασχολήσεων, σε παγκόσμιο επίπεδο. Ως εκ τούτου, αναμένεται να αποτελέσει χρήσιμη προσθήκη στη διεθνή Βιβλιογραφία. Επιπλέον, η εργασία αυτή πραγματεύεται ένα πρόβλημα που μόνο κορεσμένο δεν μπορεί να θεωρηθεί. Αντίθετα, η πρόταση του συγκεκριμένου μαθηματικού προσομοιώματος επιχειρεί να καλύψει ένα βιβλιογραφικό κενό και έτσι να δώσει μια νέα διάσταση στην προσπάθεια μοντελοποίησης του ελιγμού της προσπέρασης.

Την ίδια στιγμή, η εργασία αυτή παρουσιάζει οφέλη ως προς τη γενικότερη προώθηση της οδικής ασφάλειας. Εξάλλου, έχοντας ως στόχο την τελική χάραξη τροχιών για να ακολουθήσουν τα οχήματα κατά την προσπέραση, η ενσωμάτωση στο μαθηματικό παραμέτρων που να ικανοποιούν αυτήν την απαίτηση ήταν μονόδρομος. Τέλος, τα παραγόμενα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα μικρό λιθαράκι στην ευρύτερη προσπάθεια για ανάπτυξη νέων και καλύτερων Προηγμένων Συστημάτων Υποβοήθησης Οδήγησης (ADAS) και γιατί όχι και στην ανάπτυξη αυτόματων οχημάτων.

### 1.5 ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Η έρευνα αυτή έχει και ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να είναι πλήρως κατανοητοί όταν μελετώνται τα αποτελέσματά της. Οι περισσότεροι αφορούν στην εκτέλεση του οδικού πειράματος προσπεράσεων, ενώ σημειώνονται και ορισμένες παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

Όσον αφορά στο οδικό πείραμα:

- διεξήχθη αποκλειστικά κατά τη διάρκεια νυχτερινών ωρών,



- πραγματοποιήθηκε σε αστικό αυτοκινητόδρομο και όχι σε επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας,
- ορισμένοι από τους εθελοντές οδηγούς ήταν αμυδρά προϊδεασμένοι για το αντικείμενο της έρευνας,
- εξετάστηκαν μόνο δύο σενάρια ταχυτήτων κίνησης και συγκεκριμένα τα 70-90km/h και τα 90-110km/h,
- η ανάλυση των τροχιών των οχημάτων πραγματοποιήθηκε στο οριζόντιο επίπεδο και όχι στο χώρο,
- η διακριτοποίηση των επιμέρους φάσεων των προσπεράσεων πραγματοποιήθηκε με μια μη αλγοριθμική μέθοδο.

---

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

Ένα όχημα που κινείται σε υπεραστική οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας, επιτρέπεται να πραγματοποιεί δύο ειδών κινήσεις: οδήγηση εντός της λωρίδας (“Lane Keeping”) και αλλαγή λωρίδας (“Lane Changing”). Στην πρώτη περίπτωση, ο οδηγός αρκείται στο να μεταβάλλει την ταχύτητά του, ώστε να μην προσκρούσει σε κάποιο μπροστινό εμπόδιο, διαδικασία η οποία όχι μόνο έχει μελετηθεί εκτενώς τα προηγούμενα χρόνια, αλλά βρίσκει ήδη εφαρμογή σε πολλά εμπορικά μοντέλα αυτοκινήτων. Αντίθετα, το δεύτερο είδος κίνησης είναι ένα σαφώς πιο σύνθετο πρόβλημα, αφού εκτός της ταχύτητας μεταβάλλεται και η διεύθυνση του οχήματος. Αυτή, πλέον, διαφοροποιείται από τη διεύθυνση της οδού και ο οδηγός έχει την ελευθερία να κινηθεί και εγκαρσίως στον άξονά της. Η εμπορική εφαρμογή της αλλαγής λωρίδας βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, ενώ η πολυπλοκότητα πολλαπλασιάζεται, όταν συνδυάζεται με αποφυγή κάποιου εμποδίου, κινούμενου ή ακίνητου.

Η αποφυγή ενός εμποδίου αποτελεί τη γενεσιουργό αιτία του ελιγμού της προσπέρασης. Παρόλο, όμως, που με μια πρώτη ματιά η προσπέραση και η αλλαγή λωρίδας αποτελούν έννοιες διακριτές, στην τυπική περίπτωση είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει, επειδή ο ίδιος ο ελιγμός της προσπέρασης εμπεριέχει δύο αλλαγές λωρίδας. Για το λόγο αυτό, έρευνες που εστιάζουν αποκλειστικά στην αλλαγή λωρίδας λαμβάνονται εξίσου υπόψη, αφού παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα τόσο στο σκοπό όσο και στη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να μελετώνται ενδελεχώς οι διάφορες πτυχές της προσπέρασης και αυτό αντανακλάται εμφανώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Στις ακόλουθες ενότητες επιχειρείται μια σύνοψη της βιβλιογραφίας, με τις έρευνες που εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία να αναλύονται εκτενέστερα. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 2.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι συλλογής δεδομένων στο πεδίο, που προτείνονται από τους ερευνητές, μαζί με την αντίστοιχη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των στοιχείων. Στην ενότητα 2.2 αναλύονται ορισμένα πειράματα που πραγματοποιούνται σε προσομοιωτή οδήγησης και γίνεται, επίσης, μια αναφορά στη μεθοδολογία που χρησιμοποιούν οι ερευνητές. Στη συνέχεια, στην ενότητα 2.3 η μαθηματική περιγραφή της προσπέρασης προσεγγίζεται θεωρητικά και γίνεται μια σύντομη επισκόπηση κάποιων ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Στην ενότητα 2.4 συνοψίζονται κάποια βασικά στοιχεία, τα οποία εντοπίζονται σε συναφείς έρευνες και μπορούν να βρουν εφαρμογή στη μελέτη της προσπέρασης. Τέλος, η ενότητα 2.5 αποτελεί μια ανακεφαλαίωση των πιο σημαντικών σημείων της ανασκόπησης. Παράλληλα με την ανακεφαλαίωση, αναγνωρίζονται οι επιτυχημένες μεθοδολογίες που έχουν προταθεί καθώς και τα κενά σε αυτές, τα οποία επιδέχονται περαιτέρω έρευνα. Με άλλα λόγια, χαράσσονται οι κατευθυντήριες γραμμές που θα ακολουθήσει η παρούσα εργασία.

## 2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΕΔΙΟΥ

Ένας πολύ συνηθισμένος τρόπος συλλογής στοιχείων είναι η καταγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς στο πεδίο, σε συνθήκες ελεύθερης κυκλοφορίας ή με την οργάνωση κατάλληλων πειραμάτων. Στις επόμενες ενότητες αναλύονται κάποιες έρευνες, οι οποίες αφορούν στον ελιγμό αλλαγής λωρίδας και στον ελιγμό προσπέρασης. Η επιλογή γίνεται με κριτήριο τη σπουδαιότητα και την αποδοχή της κάθε μελέτης, αλλά ταυτόχρονα καταδεικνύονται και οι πολλοί διαφορετικοί τρόποι που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για τη συλλογή δεδομένων.

### 2.1.1 Next Generation Simulation

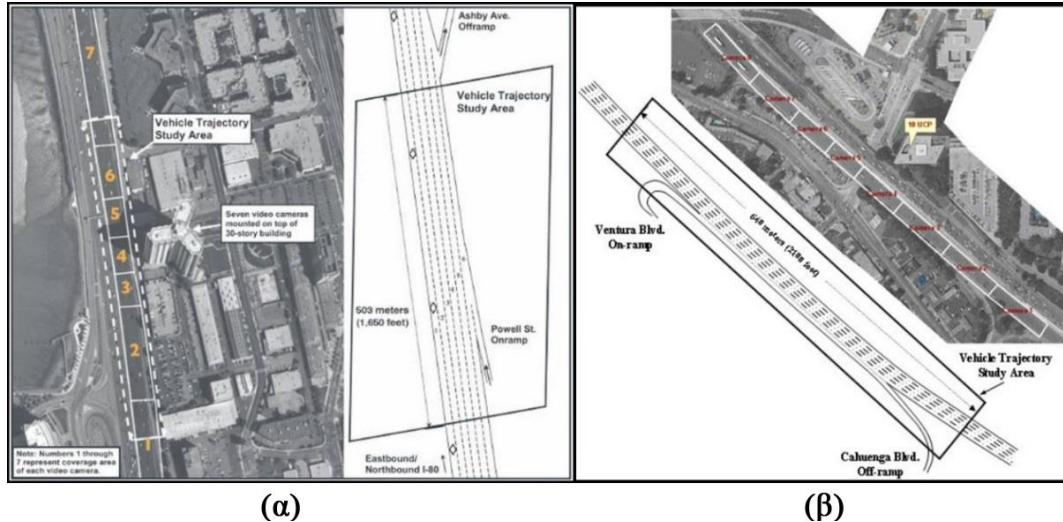
Το πρόγραμμα Next Generation Simulation (NGSIM) της Ομοσπονδιακής Διεύθυνσης Αυτοκινητοδρόμων των ΗΠΑ (Federal Highway Administration) βοηθά στην ανάπτυξη αλγορίθμων μικροσκοπικής οδηγικής συμπεριφοράς, μέσω της συλλογής λεπτομερών και υψηλής ποιότητας κυκλοφοριακών δεδομένων.

Στο πλαίσιο του προγράμματος αυτού, στις 13 Απριλίου 2005 ερευνητές συνέλεξαν δεδομένα που αφορούν στις λεπτομερείς τροχιές των οχημάτων, τα οποία κινούνταν ανατολικά στον “Αυτοκινητόδρομο Berkeley” I-80, στην περιοχή του San Francisco στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Federal Highway Administration Research and Technology, 2017b). Η περιοχή μελέτης ήταν ένα οδικό τμήμα μήκους περίπου 500m, το οποίο περιλάμβανε έξι λωρίδες κυκλοφορίας (πέντε κανονικές και μια λωρίδα υψηλής πληρότητας οχημάτων) και μία ράμπα εισόδου. Ένα κτίριο 30 ορόφων πλευρικά του αυτοκινητοδρόμου χρησίμευσε ως βάση, πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν επτά ψηφιακές κάμερες, μία για κάθε τομέα του οδικού τμήματος, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 2.1(α)*. Οι κάμερες αυτές ήταν συγχρονισμένες μεταξύ τους, βιντεοσκοπούσαν συνεχώς και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (NG-VIDEO) εξήχθησαν από το βίντεο οι ακριβείς θέσεις των οχημάτων με χρονικό βήμα 0.1s.

Με τον τρόπο αυτό, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της θέσης ενός οχήματος μέσα στη λωρίδα κυκλοφορίας του, αλλά και οι αποστάσεις ανάμεσα σε αυτό και άλλα οχήματα γύρω του. Η καταγραφή διήρκεσε συνολικά 45 λεπτά και πραγματοποιήθηκε σε τρία επιμέρους δεκαπεντάλεπτα, με χρόνο έναρξης στις 4:00μ.μ., στις 5:00μ.μ. και στις 5:15μ.μ. αντίστοιχα. Οι ιθύνοντες επέλεξαν αυτά τα χρονικά διαστήματα λόγω του ιδιαίτερου κυκλοφοριακού ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν, καθώς περιλαμβάνουν τη μετάβαση από υψηλό σε χαμηλό επίπεδο εξυπηρέτησης αλλά και συνθήκες πλήρους κορεσμού της οδού κατά την ώρα αιχμής.

Στις 15 Ιουνίου 2005 πραγματοποιήθηκε μία ακόμη παρόμοια συλλογή δεδομένων, αυτή τη φορά στη νότια κατεύθυνση της “Ελεύθερης Λεωφόρου Χόλυγουντ” US-101, στο Λος Άντζελες, επίσης στην Καλιφόρνια (Federal Highway Administration Research and Technology, 2017a). Το εν λόγω οδικό τμήμα έχει μήκος 640m και η διατομή του αποτελείται από πέντε λωρίδες κυκλοφορίας. Στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται μία ράμπα εισόδου και μία εξόδου από τον αυτοκινητόδρομο, ανάμεσα στις οποίες υπάρχει επιπλέον μία βοηθητική λωρίδα. Οκτώ ψηφιακές κάμερες καταγραφής

ήταν τοποθετημένες στην κορυφή ενός κτιρίου 36 ορόφων, το οποίο βρίσκεται πλευρικά στον αυτοκινητόδρομο. Οι ακριβείς θέσεις των οχημάτων εξήχθησαν με τη βοήθεια του λογισμικού NG-VIDEO και με χρονικό βήμα 0.1s. Όλες οι κάμερες ήταν συγχρονισμένες μεταξύ τους και η κάθε μία από αυτές είχε στο οπτικό της πεδίο και ένα μέρος της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.1(β).



**Σχήμα 2.1** Αεροφωτογραφίες των οδικών τμημάτων των I-80 (αριστερά) και US-101 (δεξιά) με επισμασμένο το οπτικό πεδίο της κάθε μιας κάμερας και των κυρίων παρατήρησης (Federal Highway Administration Research and Technology).

Η διάρκεια της καταγραφής ήταν συνολικά 45 λεπτά, χωρισμένη σε τρεις επιμέρους και διαδοχικές περιόδους των 15 λεπτών. Συγκεκριμένα, ο χρόνος εκκίνησης των περιόδων ήταν στις 7:50π.μ., στις 8:05π.μ. και στις 8:20π.μ. Τα χρονικά διαστήματα αυτά επιλέχθηκαν ειδικά για το έντονο ενδιαφέρον που παρουσιάζουν από κυκλοφοριακή σκοπιά, καθώς σε αυτά γίνεται η μετάβαση από συνθήκες υψηλού επιπέδου σε συνθήκες χαμηλού επιπέδου εξυπηρέτησης. Επιπλέον, αντιπροσωπεύουν και συνθήκες πλήρους κορεσμού της οδού κατά την πρωινή ώρα αιχμής.

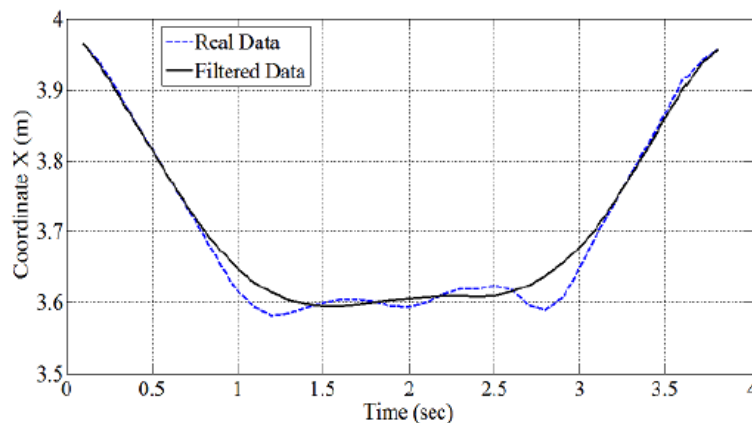
Η Διεύθυνση Αυτοκινητοδρόμων διαθέτει ελεύθερα σε κάθε ενδιαφερόμενο τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και έτσι έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μελέτες, σε διάφορα επιστημονικά πεδία. Ορισμένες από αυτές, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία και για αυτό το λόγο ακολουθεί συνοπτική τους ανάλυση.

### 2.1.1.1 Μοντελοποίηση της τροχιάς προσπέρασης μέσω μηχανικής μάθησης

Οι Ghaffari et al. (2011, November) επιχείρησαν την πρόβλεψη της τροχιάς μιας μοτοσυκλέτας ή ενός οχήματος, καθώς αυτό εκτελεί προσπέραση. Η βάση της μεθόδου τους ήταν ένα Προσαρμοστικό Σύστημα Νευρο-Ασαφών Συμπερασμάτων (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS), το οποίο με τη σειρά του βασίζεται στην Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic) των Takagi και Sugeno. Αρχικά, οι συγγραφείς διακρίτωποιήσαν την προσπέραση σε τρία επιμέρους στάδια, υπό την αλληλουχία ελιγμός αλλαγής λωρίδας-ευθύγραμμη κίνηση στη διπλανή αριστερή λωρίδα-ελιγμός αλλαγής λωρίδας. Αναφέρουν χαρακτηριστικά δε, πως η αλλαγής λωρίδας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της προσπέρασης και πως η σχέση μεταξύ των δύο αυτών ελιγμών είναι

“ιδιαιτέρη”. Το μοντέλο που ανέπτυξαν έχει τη δυνατότητα να μαθαίνει μόνο του, αλλά για να συμβεί αυτό έπρεπε πρώτα να εκπαιδευτεί. Ως στατιστικό δείγμα επιλέχθηκαν δύο από τα πακέτα δεδομένων του NGSIM (I-80 και US-101) και η ανάλυση έγινε χωριστά για τα οχήματα και τις μοτοσυκλέτες. Τελικός στόχος ήταν η δημιουργία δύο διαφορετικών μοντέλων ANFIS.

Τα πηγαία δεδομένα περιλαμβάνουν μόνο τις συντεταγμένες των οχημάτων για κάθε χρονική στιγμή. Επειδή, όμως, εμπεριέχουν “θόρυβο”, πριν την οποιαδήποτε ανάλυσή τους φιλτραρίστηκαν με τη μέθοδο του κινητού μέσου όρου. Στο Σχήμα 2.2 διακρίνεται καθαρά, πως τα δεδομένα εξομαλύνθηκαν σε μεγάλο βαθμό και εξαλείφθηκαν τυχόν απότομες μεταβολές, οι οποίες πιθανότατα οφείλονταν στην ακρίβεια μέτρησης. Ο προσανατολισμός του οχήματος (έστω  $\theta$ ), υπολογίστηκε μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων της τροχιάς του, ως το τόξο εφαπτομένης του ηλίκου της διαφοράς των τετμημένων και της διαφοράς των τεταγμένων. Η γωνία  $\theta$  είναι εν γένει διαφορετική από τη γωνία στροφής των τροχών. Υπολογίστηκαν, επιπλέον, η ταχύτητα και η επιτάχυνση, με τη χρήση απλών κινηματικών εξισώσεων. Στο μοντέλο εισάγονταν πέντε μεταβλητές για κάθε χρονική στιγμή (διαμήκης και εγκάρσια συντεταγμένη, ταχύτητα, επιτάχυνση και γωνία  $\theta$ ) και εξάγονταν οι δύο που αφορούσαν στην εκάστοτε επόμενη χρονική στιγμή (διαμήκης και εγκάρσια συντεταγμένη).



Σχήμα 2.2 Το διάγραμμα των εγκάρσιων συντεταγμένων  $X$  μιας τροχιάς μοτοσυκλέτας πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου (Ghaffari et al., 2011, November).

Όπως συνηθίζεται στις εφαρμογές μηχανικής μάθησης, τα διαθέσιμα δεδομένα χωρίστηκαν τυχαία σε δύο υποσύνολα. Το πρώτο 70% των συνολικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου, ενώ το υπόλοιπο 30% για την επικύρωση της απόδοσής του, μέσω της σύγκρισης των τελευταίων με τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου. Η ποσοτικοποίηση της απόκλισης ανάμεσα στην “πραγματική” (δηλαδή αυτήν που προέκυψε από τα δεδομένα του πειράματος NGSIM) και την υπολογισμένη τροχιά έγινε με τη χρήση δύο κριτηρίων. Το πρώτο είναι η Απόλυτη Οριζόντια Απόκλιση Μετακίνησης (Absolute Horizontal Transport Deviation, AHTD), η οποία δίνει τη μέση απόκλιση ανάμεσα στις δύο τροχιές, για κάθε χρονική στιγμή και υπολογίζεται ως εξής:

$$AHTD(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{[X_n(t) - x_n(t)]^2 + [Y_n(t) - y_n(t)]^2} \quad (2.1)$$

Το δεύτερο κριτήριο είναι η Μέση Σχετική Οριζόντια Απόκλιση (Mean Relative Horizontal Deviation, MRHD), η οποία υπολογίζεται ως ο λόγος της Απόλυτης Οριζόντιας Απόκλισης Μετακίνησης και της Μέσης Συνολικής Απόστασης Ταξιδιού (Mean Total Travel Distance,  $L_H(t)$ ):

$$RHTD(t) = \frac{AHTD}{L_H(t)} \cdot 100 \quad (2.2)$$

, όπου:

$$L_H(t) = \frac{1}{2} \sum_{t_i=1}^t \left\{ \frac{\sqrt{[X_n(t_i) - X_n(t_{i-1})]^2 + [Y_n(t_i) - Y_n(t_{i-1})]^2} + \sqrt{[x_n(t_i) - x_n(t_{i-1})]^2 + [y_n(t_i) - y_n(t_{i-1})]^2}}{2} \right\} \quad (2.3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις,  $X$  (αντίστοιχα  $x$ ) είναι η πραγματική (αντίστοιχα υπολογισμένη από το μοντέλο) τιμή της τετμημένης,  $Y$  (αντίστοιχα  $y$ ) είναι η πραγματική (αντίστοιχα υπολογισμένη από το μοντέλο) τιμή της τεταγμένης και  $N$  είναι ο αριθμός των πειραματικών παρατηρήσεων για χρόνο ταξιδιού του οχήματος  $t$ .

Συνολικά, οι συγγραφείς χαρακτηρίζουν την απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου ως “ικανοποιητική”. Επιπλέον, συμπεραίνουν, πως ένα αυτόνομο όχημα που χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα που εξάγει το μοντέλο ANFIS και είναι εφοδιασμένο με κατάλληλους αισθητήρες, μπορεί να εκτιμήσει την τροχιά που θα ακολουθήσει στη συνέχεια. Τέλος ισχυρίζονται, ότι η μέθοδός τους δύναται να βρει εφαρμογή σε συσκευές υποβοήθησης οδηγού (driver assistant devices), βοηθήματα διατήρησης ασφαλούς απόστασης (safe distance keeping observers), συστήματα αποφυγής σύγκρουσης (collision prevention systems) και διάφορες άλλες διατάξεις ITS (Intelligent Transport Systems).

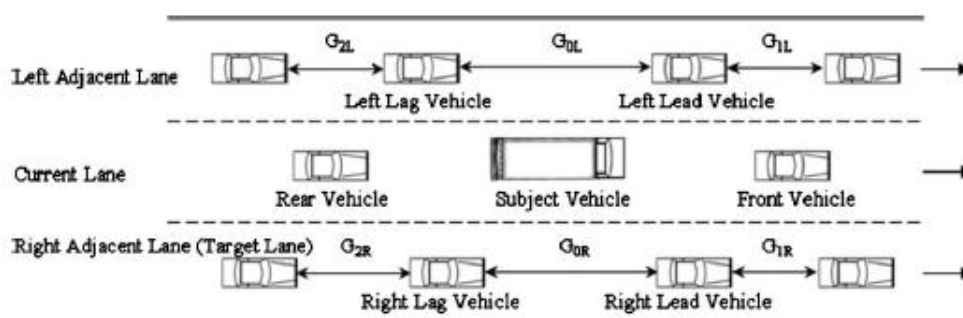
### 2.1.1.2 Επίδραση της κυκλοφορίας στην αλλαγή λωρίδας

Οι Moridpour et al. (2010) χρησιμοποίησαν τη βάση δεδομένων του πειράματος NGSIM, για να εξετάσουν τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά γύρω από ένα όχημα, τη στιγμή που εκείνο εκτελεί ελιγμό αλλαγής λωρίδας. Η μεθοδολογία αφορούσε στην ανάλυση 56 τροχιών σε συνθήκες χαμηλής στάθμης εξυπηρέτησης (Στ.Ε. Ε), εκ των οποίων οι μισές ανήκαν σε επιβατικά και οι υπόλοιπες σε βαρέα οχήματα. Σκοπός της μελέτης ήταν ο εντοπισμός διαφορών στις συνθήκες που επικρατούν γύρω από την κάθε κατηγορία οχήματος, όταν εκείνο αλλάζει λωρίδα. Οι συγγραφείς υπέθεσαν, πως εξαιτίας του μεγάλου μήκους και όγκου αλλά και της μικρότερης ευελιξίας τους, τα βαρέα οχήματα επηρεάζουν περισσότερο την περιρρέουσα κυκλοφορία από ότι τα επιβατικά. Για λόγους αξιοπιστίας, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο να είναι οι ελιγμοί των δύο δειγμάτων κατά το δυνατόν όμοιοι, δηλαδή να λαμβάνουν χώρα περίπου την ίδια ώρα και να πραγματοποιούνται μεταξύ των ίδιων δύο λωρίδων.

Η αρχή του ελιγμού προσδιοριζόταν ως το σημείο, στο οποίο η εγκάρσια μετατόπιση του υπό μελέτη οχήματος ξεκινούσε να γίνεται διάφορη του μηδενός. Αντίστοιχα, το πέρασ τοποθετούνταν στο σημείο εκείνο, στο οποίο η εγκάρσια μετατόπιση γινόταν και πάλι ίση με μηδέν. Οι ερευνητές, όμως, παρατήρησαν, πως όταν τα βαρέα οχήματα επιχειρούσαν να αλλάξουν λωρίδα, η μελέτη της περιρρέουσας κυκλοφορίας γινόταν

πολύ περίπλοκη, επειδή αρκετά από τα γύρω οχήματα άλλαζαν και εκείνα λωρίδα ταυτόχρονα. Αυτό τους ώθησε να ορίσουν την εκκίνηση του ελιγμού 8 δευτερόλεπτα πιο πριν, που η οδηγική συμπεριφορά των γύρω οχημάτων ήταν περισσότερο σταθερή. Η αλλαγή λωρίδας καθεαυτή χωρίστηκε σε τρεις, χρονικά διαδοχικές φάσεις: πρώτα εκδηλώνεται το κίνητρο για την πραγματοποίηση του ελιγμού, έπειτα επιλέγεται η λωρίδα προορισμού και τέλος εκτελείται ο ίδιος ο ελιγμός. Στη μελέτη διερευνήθηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν το κάθε ένα από τα τρία αυτά στάδια. Κατόπιν, οι παράμετροι αυτοί συγκρίθηκαν για τις δύο κατηγορίες οχημάτων.

Οι αλλαγές λωρίδας, ως προς το κίνητρο του οδηγού να τις εκτελέσει, κατηγοριοποιήθηκαν σε υποχρεωτικές (Mandatory Lane Changing, MLC) και προαιρετικές (Discretionary Lane Changing, DLC). Μια τυπική περίπτωση MLC είναι η αλλαγή λωρίδας στο πέρας μιας λωρίδας επιταχύνσεως σε κόμβο. Αντίθετα, οι DLC εκτελούνται όταν ο οδηγός δεν είναι ευχαριστημένος από τις συνθήκες οδήγησης, αλλά παρόλα αυτά θα μπορούσε να συνεχίσει το ταξίδι του και χωρίς να αλλάξει λωρίδα. Για την πρώτη φάση του ελιγμού, στη μελέτη αναλύθηκαν μόνο DLC και εξετάστηκαν δύο μεταβλητές. Η μία είναι η ταχύτητα του μπροστινού (front) και του ακολουθούντος (rear) οχήματος στη λωρίδα κίνησης. Η άλλη μεταβλητή είναι η απόσταση από το μπροστινό (front) ή το πίσω (rear) όχημα στη λωρίδα κίνησης ή οι αποστάσεις ανάμεσα στα οχήματα (lead space gap ή lag space gap) στη λωρίδα προορισμού. Μια τυπική διάταξη οχημάτων στις τρεις λωρίδες ενδιαφέροντος, μαζί με τις ονομασίες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

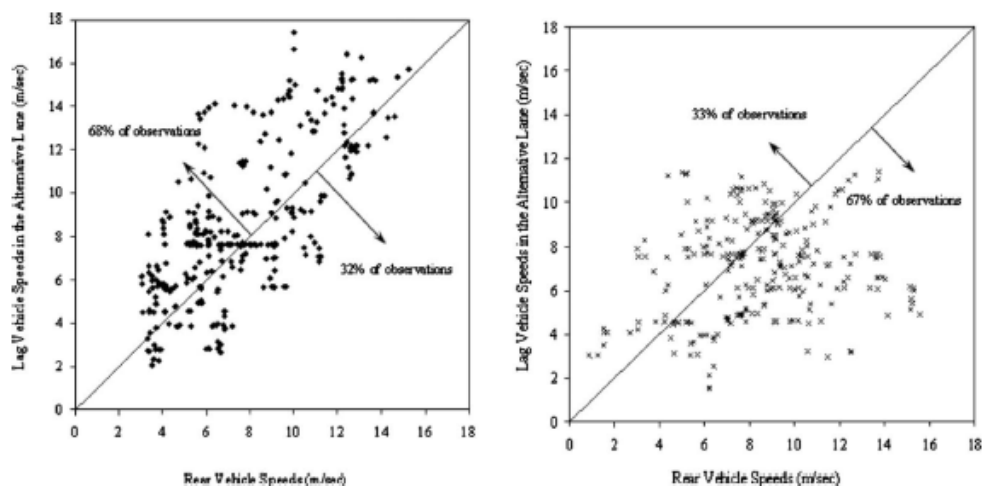


Σχήμα 2.3 Η γενική περίπτωση μιας αλλαγής λωρίδας σε οδό πολλών λωρίδων κυκλοφορίας μαζί με τις ονομασίες των διάφορων οχημάτων (Moridpour et al., 2010).

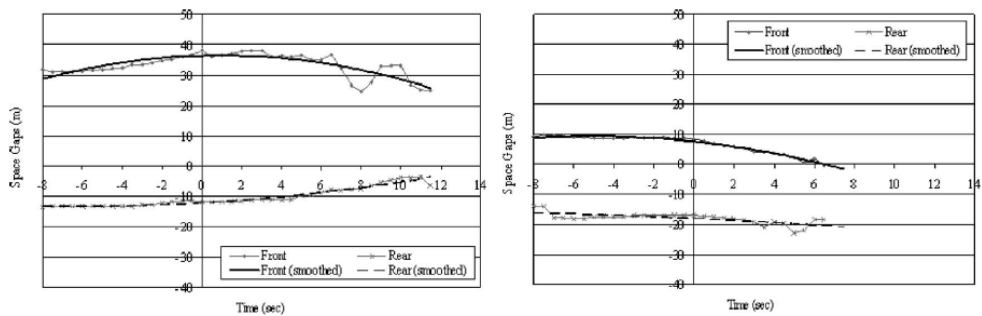
Όσον αφορά στην επιλογή της λωρίδας προορισμού, πάλι υπάρχει διαφοροποίηση για την κάθε μία από τις δύο κατηγορίες ελιγμών. Όταν ο οδηγός εκτελεί MLC, η επιλογή αυτή δεν είναι δική του, αλλά του επιβάλλεται από τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας, τη γεωμετρία της οδού ή κάποιο χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας. Αντίθετα, κατά την εκτέλεση μιας DLC, ο οδηγός έχει την ευχέρεια να επιλέξει αν θα εκτρέψει το όχημά του στην αριστερή ή τη δεξιά λωρίδα. Για τη δεύτερη φάση του ελιγμού, οι ερευνητές εργάστηκαν επίσης μόνο με τις DLC. Η μία μεταβλητή που επέλεξαν είναι οι ταχύτητες των γύρω οχημάτων στην αρχική (οχήματα front και rear), τη λωρίδα προορισμού αλλά και την εναλλακτική λωρίδα που απορρίφθηκε από τον οδηγό (οχήματα lead και lag). Συγκρίθηκαν οι ταχύτητες μόνο μεταξύ όμοιων οχημάτων κάθε φορά, δηλαδή των εκάστοτε δύο μπροστινών (lead και front) ή των εκάστοτε δύο ακολουθούντων (read και lag). Ως δεύτερη μεταβλητή επιλέχτηκε η διαφορά των ταχυτήτων μεταξύ του μπροστινού και του πίσω οχήματος στην κάθε μια από τις τρεις λωρίδες (front και rear, left lead και left lag, right lead και right lag).

Για την τελευταία φάση, δηλαδή την εκτέλεση της αλλαγής λωρίδας, αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των γύρω οχημάτων, από 8s πριν την έναρξη, έως και τη στιγμή ολοκλήρωσης του ελιγμού. Οι ερευνητές τοποθέτησαν την έναρξη του ελιγμού στη στιγμή που το όχημα ενδιαφέροντος ξεκινά να εισέρχεται στη λωρίδα προορισμού. Η στιγμή αυτή αναγνωρίστηκε από τη διαφοροποίηση της εγκάρσιας κίνησης του οχήματος και συγκεκριμένα από την αύξηση αυτής. Η πρώτη μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε είναι το διάγραμμα των ταχυτήτων του οχήματος ενδιαφέροντος και των front, rear, target-lane lead και target-lane lag οχημάτων, κατά την εκτέλεση του ελιγμού αλλαγής λωρίδας. Η δεύτερη είναι το διάγραμμα του διαθέσιμου κενού χώρου ανάμεσα στα οχήματα, τόσο στην αρχική λωρίδα (front και rear space gap) όσο και στη λωρίδα προορισμού (target lead και target lag space gap), κατά τη διάρκεια του ελιγμού.

Η ανάλυση έγινε με τη βοήθεια διαγραμμάτων, για λόγους καλύτερης εποπτείας και πιο εύκολης εξαγωγής συμπερασμάτων. Τα επιβατικά και τα βαρέα οχήματα αναλύθηκαν σε κάθε περίπτωση χωριστά. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν διαγράμματα όπως το Σχήμα 2.4, τα οποία απεικονίζουν τους συνδυασμούς που παρατηρήθηκαν μεταξύ δύο οχημάτων. Χρησιμοποίησαν, επιπλέον, και άλλης μορφής διαγράμματα, όπως το Σχήμα 2.5, στα οποία απεικονίζονται οι διάφορες τιμές για ολόκληρο τον ελιγμό, με τις καμπύλες να προκύπτουν ως η μέση τιμή των 28 προσπεράσεων.



Σχήμα 2.4 Ταχύτητες του rear οχήματος (οριζόντιος άξονας) και του lag στην εναλλακτική λωρίδα (κατακόρυφος άξονας) για τους ελιγμούς βαρέων (αριστερά) και επιβατικών οχημάτων (δεξιά) (Moridpour et al., 2010).



Σχήμα 2.5 Το διάγραμμα του κενού χώρου στην αρχική λωρίδα κίνησης μεταξύ του οχήματος ενδιαφέροντος και του μπροστινού (front space gap) και του οχήματος ενδιαφέροντος και του πίσω (rear space gap) οχήματος για τους ελιγμούς βαρέων (αριστερά) και επιβατικών οχημάτων (δεξιά) (Moridpour et al., 2010).



Η μελέτη αποκάλυψε θεμελιώδεις διαφορές στη δομή της διαδικασίας αλλαγής λωρίδας των επιβατικών από αυτή των βαρέων οχημάτων. Συνεπώς, θα έπρεπε να υπάρχει διαχωρισμός των μοντέλων που περιγράφουν τον ελιγμό για την κάθε κατηγορία οχημάτων και να μην διαφοροποιούνται απλώς οι χρησιμοποιούμενες κάθε φορά μεταβλητές. Εξάλλου, τα βαρέα οχήματα αποτελούν έως και το 25% της συνολικής κυκλοφορίας σε κεντρικές αρτηρίες (Al-Kaisy et al., 2002). Η ανάπτυξη ενός μοντέλου αλλαγής λωρίδας αποκλειστικά για βαρέα οχήματα, σύμφωνα με τους ερευνητές, θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια της προσομοίωσης της κυκλοφορίας σε μικροσκοπικό επίπεδο και αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα.

### *2.1.1.3 Διερεύνηση των προαιρετικών αλλαγών λωρίδας*

Οι Wang et al. (2014) χρησιμοποίησαν τα δεδομένα του πειράματος NGSIM, για να μελετήσουν τις προαιρετικές αλλαγές λωρίδας (DLC). Επειδή τα πηγαία δεδομένα των τροχιών εμπεριέχουν “θόρυβο” και σφάλματα, φιλτραρίστηκαν με τη χρήση ορισμένων ευρετικών κανόνων (heuristic rules) και αποκλείστηκαν συστηματικές περιπτώσεις ελιγμών, οι οποίες δεν αποτελούσαν αντικείμενο της συγκεκριμένης έρευνας. Οι κανόνες αυτοί απέκλεισαν από το δείγμα τα μη επιβατικά οχήματα (οχήματα μεγαλύτερα από 7m ή μικρότερα από 3m) και τις αλλαγές λωρίδας που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ελεύθερης ροής ή κορεσμού. Επιπλέον, δε λήφθηκαν υπόψη τυχόν ελιγμοί που πραγματοποιήθηκαν στη βοηθητική ή τη λωρίδα εισόδου/εξόδου, καθώς αποτελούσαν πιθανότατα MLC. Τέλος, δε μελετήθηκαν καθόλου διαδοχικές αλλαγές σε περισσότερες από μία λωρίδες, ελιγμοί που ματαιώθηκαν λόγω κυκλοφοριακών συνθηκών και ελιγμοί στους οποίους ο οδηγός παρέμενε πολλή ώρα πάνω στη διαχωριστική διακεκομμένη γραμμή.

Στη συνέχεια, οι ερευνητές μετέτρεψαν όλες τις αριστερές αλλαγές λωρίδας σε δεξιές, μέσω καθρεπτισμού της τροχιάς (mirror image). Με τον τρόπο αυτό, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά και των δύο ελιγμών στη γενική περίπτωση. Αναγνώρισαν δε, πως τα πηγαία δεδομένα εμφανίζουν δύο μεγάλα προβλήματα, η επίλυση των οποίων έπρεπε να προηγηθεί της ανάλυσης. Το πρώτο είναι ο καθορισμός κριτηρίων για τον αποκλεισμό των “αφύσικων” (abnormal) τροχιών, ενώ το δεύτερο πρόβλημα αφορά στον ορισμό των σημείων αρχής και πέρατος του ελιγμού αλλαγής λωρίδας καθεαυτού. Μιας και το στατιστικό δείγμα των τροχιών είναι τεράστιο, απαιτήθηκε μια αλγοριθμική προσέγγιση και αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Το πρώτο πρόβλημα, επιλύθηκε εν μέρει με την εισαγωγή των ευρετικών κανόνων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, ομαδοποιήθηκαν οι τροχιές (clustering) και ελέγχθηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις ανά δύο μεταξύ τους, με τη δημιουργία ενός πίνακα αποστάσεων. Αν ένα στοιχείο του πίνακα αυτού προέκυπτε αρκετά μεγαλύτερο από τα υπόλοιπα, τότε η αλλαγή λωρίδας που του αντιστοιχούσε θεωρούνταν αφύσικη. Η μέθοδος της ομαδοποίησης προτιμήθηκε, επειδή δεν απαιτούσε ανθρώπινη ανάμιξη στη διαδικασία και έτσι εξαλείφθηκαν τα υποκειμενικά σφάλματα. Ακόμη, η όλη διαδικασία ολοκληρώθηκε πολύ γρήγορα και έτσι εξοικονομήθηκε πολύτιμος χρόνος.

Για να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους οι αλλαγές λωρίδας, έπρεπε όλες να έχουν ομοιόμορφη χρονική διάρκεια. Για το λόγο αυτό, απομονώθηκε ο εκάστοτε ελιγμός του

οχήματος, μαζί με ένα χρονικό διάστημα εκατέρωθεν της αρχής και του πέρατός του. Σύμφωνα με τους ερευνητές του πειράματος NGSIM, μια αλλαγή λωρίδας θεωρείται πως πραγματοποιείται την ακριβή στιγμή (έστω  $T$ ) που το όχημα ξεκινά να εισέρχεται στη λωρίδα προορισμού. Η χρονική διάρκεια ανάλυσης για κάθε ελιγμό επιλέχθηκε με εμπειρικά κριτήρια από τους συγγραφείς της μελέτης να είναι 20s, ώστε να έχει προλάβει να ολοκληρωθεί ο ελιγμός και να υπάρχει και ένα περιθώριο ασφαλείας. Επομένως, για κάθε αλλαγή λωρίδας μελετούνταν οι χρονικές στιγμές ( $T-10s$ ,  $T+10s$ ). Καμία από τις αλλαγές λωρίδας στο δείγμα δεν “εξείχε” χρονικά από το διάστημα αυτό.

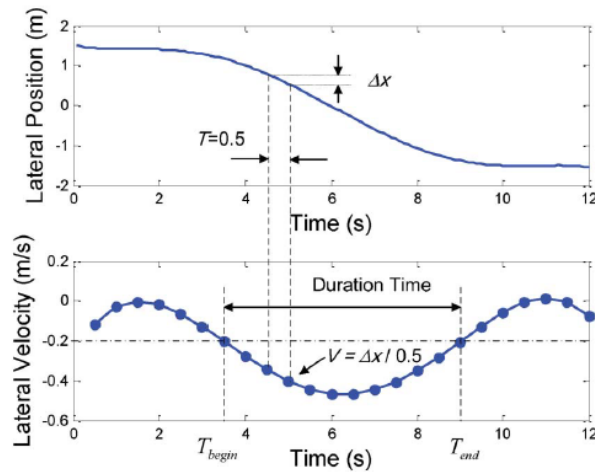
Η απόσταση που απείχαν μεταξύ τους τα ζεύγη των τροχιών, μετρούνταν εγκάρσιως στον άξονα της οδού. Συνολικά, πάρθηκε ίση με το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς των δύο εγκάρσιων μετατοπίσεων, για κάθε χρονική στιγμή του ελιγμού. Τελικά, βρέθηκαν όλες οι αφύσικες αλλαγές και αποκλείστηκαν από το δείγμα, κάτι που φανέρωσε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής.

Όσον αφορά στο δεύτερο πρόβλημα, συνήθως το σημείο εκκίνησης (αντίστοιχα πέρατος) της αλλαγής λωρίδας ήταν αυτό, στο οποίο η εγκάρσια μετατόπιση γινόταν για πρώτη διάφορη (αντίστοιχα ίση) του μηδενός. Επειδή, όμως, η κλίση της καμπύλης της εγκάρσιας μετατόπισης στην αρχή και το τέλος της αλλαγής λωρίδας γενικά είναι πολύ μικρή, τα σημεία αυτά ήταν δυσδιάκριτα. Υπήρχε, λοιπόν, το ενδεχόμενο να προκύψουν μεγάλες διαφοροποιήσεις από ελιγμό σε ελιγμό. Εξάλλου, είναι γνωστό, πως τα δεδομένα που προκύπτουν από μετρήσεις GPS ή βιντεοσκόπηση (όπως στην παρούσα μελέτη) εμπεριέχουν αρκετό θόρυβο. Συνεπώς, δεν θα ήταν σαφές αν μια μικρή διαφοροποίηση στην εγκάρσια μετατόπιση θα υποδήλωνε την έναρξη (αντίστοιχα ολοκλήρωση) του ελιγμού ή απλώς μια διαταραχή των δεδομένων, η οποία θα οφειλόταν στην ακρίβεια της μέτρησης.

Οι ερευνητές αντιπαρήλθαν αυτές τις ασάφειες υπολογίζοντας από τις καταγεγραμμένες τροχιές τη διακριτή εγκάρσια ταχύτητα, με χρονικό όμως βήμα 0.5s αντί κάθε 0.1s που ήταν και η συχνότητα καταγραφής. Πραγματοποίησαν, δηλαδή, μείωση της “ευκρίνειας” ή αλλιώς “αραίωση” των δεδομένων, μέσω της σχέσης:

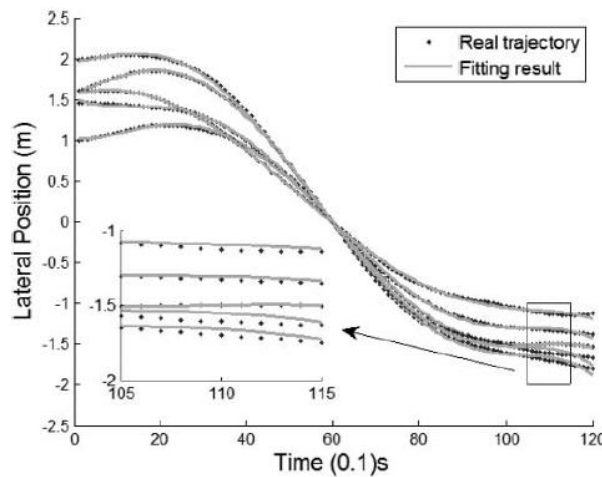
$$\bar{v}(t) = \frac{x_i(t) - x_i(t - 0.5)}{0.5} \quad (2.4)$$

, όπου  $x$  η εγκάρσια συντεταγμένη του οχήματος για κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Με σημείο εκκίνησης το (γνωστό) χρονικό σημείο  $T$ , αναζητήθηκε το πρώτο σημείο στο θετικό ημιάξονα του χρόνου, το οποίο είχε απόλυτη τιμή εγκάρσιας ταχύτητας μεγαλύτερη από  $-0.2m/s$  και ονομάστηκε  $T_{end}$ . Ομοίως, αναζητήθηκε το πρώτο σημείο στον αρνητικό ημιάξονα του χρόνου, το οποίο είχε απόλυτη τιμή εγκάρσιας ταχύτητας μεγαλύτερη από  $-0.2m/s$  και ονομάστηκε  $T_{begin}$ . Τα παραπάνω απεικονίζονται στο *Σχήμα 2.6*. Ο χρόνος που μεσολαβούσε ανάμεσα στα δύο σημεία αποτέλεσε τη διάρκεια του ελιγμού. Η απόκλιση 0.2m/s επιλέχθηκε ως συμβιβασμός ανάμεσα στο να μη μικρύνει πολύ ο χρόνος του καθαρού ελιγμού και στο να αγνοηθούν κατά το δυνατόν διαταραχές της εγκάρσιας ταχύτητας που οφειλόνταν στο σφάλμα μέτρησης. Σύμφωνα με τα ευρήματα, το 99.7% των οχημάτων ολοκλήρωνε μια αλλαγή λωρίδας σε 12s.



Σχήμα 2.6 Καθορισμός των σημείων αρχής και τέλους του ελιγμού αλλαγής λωρίδας (Wang et al., 2014).

Από τα δεδομένα του πειράματος, μόνο το διάγραμμα των εγκάρσιων μετατοπίσεων χρησιμοποιήθηκε για τη μαθηματική περιγραφή της τροχιάς. Ύστερα από δοκιμές, ο πυρήνας του μαθηματικού μοντέλου για το διάγραμμα αυτό επιλέχθηκε να είναι πολυώνυμο πέμπτου βαθμού, με τις κατάλληλες βέβαια συνοριακές συνθήκες. Οι DLC που προέκυπταν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω χωρίζονταν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν διαρκούσαν ή όχι περισσότερο από 12s. Στην πρώτη περίπτωση, ολόκληρη η καμπύλη του διαγράμματος περιγραφόταν από ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού, το οποίο προσαρμοζόταν στα δεδομένα με στατιστικές μεθόδους. Ένα παράδειγμα προσαρμογής τέτοιων πολυωνύμων σε πραγματικά δεδομένα, φαίνεται στο Σχήμα 2.7, όπου η μηδενική τιμή του κατακόρυφου άξονα αντιστοιχεί στη διακεκομμένη διαχωριστική γραμμή των δύο λωρίδων στο οδόστρωμα.



Σχήμα 2.7 Διαγράμματα εγκάρσιας μετατόπισης και προσαρμογή σε αυτά πολυωνύμων πέμπτου βαθμού (Wang et al., 2014).

Όταν, όμως, η αλλαγή λωρίδας διαρκούσε περισσότερο από 12s, η εγκάρσια μετατόπιση περιγραφόταν με τη βοήθεια μιας τρίκλαδης συνάρτησης. Ο κεντρικός κλάδος της συνάρτησης αυτής, ήταν και πάλι ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού, αλλά η διαφοροποίηση έγκειτο στο αρχικό και το τελικό τμήμα του ελιγμού, όπου οι τροχιές απεικονίζονται ως ήπιες κλίσεις ευθείες. Με τον τρόπο αυτό, διατηρούνταν σε αποδεκτά επί-

πεδα η πολυπλοκότητα της καμπύλης, αλλά ταυτόχρονα επιτεύχθηκε πολύ καλή προσαρμογή στα δεδομένα. Το όριο των 12s επιλέχθηκε κατόπιν δοκιμών και τελικά αποτέλεσε καλή παραδοχή, αφού οι περισσότεροι ελιγμοί είχαν προλάβει να ολοκληρωθούν. Επιπλέον, για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αυξανόταν σημαντικά το σφάλμα προσαρμογής στα δεδομένα.

Οι συντελεστές των πολυωνύμων υπολογίζονταν με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων των Σφαλμάτων (Least Square of Errors). Η αξιολόγηση της προσαρμογής των μαθηματικών καμπυλών στα πραγματικά δεδομένα, πραγματοποιούνταν με τη χρήση διάφορων δεικτών στατιστικής απόδοσης. Αυτοί ήταν η Μέση Απόλυτη Απόκλιση (Mean Absolute Deviation, MAD), η Ρίζα Μέσου Τετραγώνου Αποκλίσεων (Root Mean Square Deviation, RMSD) και η Μέση Σχετική Απόκλιση (Mean Relative Deviation, MRD).

Οι ερευνητές εξήγαγαν το συμπέρασμα, πως ο πυρήνας κάθε “κανονικής” (όχι δηλαδή “αφύσικης”) τροχιάς αλλαγής λωρίδας δύναται να περιγραφεί ως πολυώνυμο πέμπτου βαθμού, με την επιλογή κατάλληλων συντελεστών. Επιπλέον, πρότειναν ως φυσική συνέχεια της εργασίας τους τη μελέτη της τροχιάς που εκτελεί ένα όχημα, όταν αλλάζει διαδοχικά περισσότερες από μία λωρίδες.

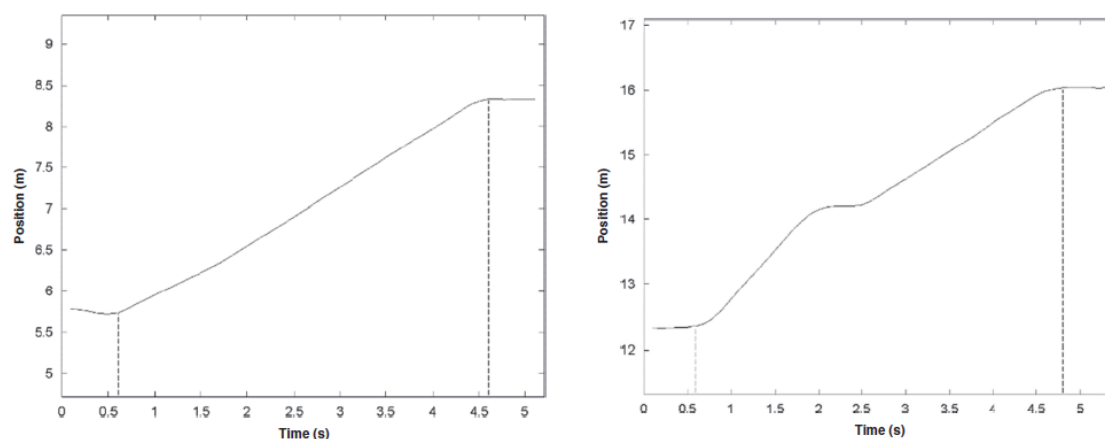
#### 2.1.1.4 Μοντέλο για την εγκάρσια συνιστώσα της αλλαγής λωρίδας

Οι Yang et al. (2015) ανέλυσαν η οδηγική συμπεριφορά κατά την αλλαγή λωρίδας και πρότειναν ένα μοντέλο για την εγκάρσια συνιστώσα της κίνησης του οχήματος. Οι ερευνητές εστίασαν μόνο στο στάδιο της εκτέλεσης του ελιγμού (Lane Changing Execution, LCE) και όχι σε ολόκληρη τη διαδικασία. Το στάδιο αυτό πραγματοποιείται, αφότου ο οδηγός έχει αποφασίσει να αλλάξει λωρίδα και έχει εντοπίσει ένα αποδεκτό κενό στη λωρίδα προορισμού. Ως στατιστικό δείγμα χρησιμοποίησαν τα δεδομένα του πειράματος NGSIM, τα οποία όμως πρώτα υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία.

Αρχικά, ορίστηκε το χρονικό διάστημα ανάλυσης για κάθε ελιγμό, ίσο με 5s εκατέρωθεν του χρόνου εκτέλεσης της αλλαγής λωρίδας (έστω  $t_{lc}$ ) και εξήχθη η τροχιά του οχήματος σε αυτό. Το διάστημα ( $t_{lc}-5s$ ,  $t_{lc}+5s$ ), λοιπόν, επιλέχθηκε κατόπιν δοκιμών, ώστε να εμπεριέχει ολόκληρο τον ελιγμό. Έπειτα εντοπίστηκαν τα σημεία που η LCE ξεκινούσε και ολοκληρωνόταν, παρατηρώντας στα διαγράμματα της εγκάρσιας μετατόπισης τα σημεία στα οποία η κλίση της καμπύλης γινόταν διάφορη του μηδενός. Συγκεκριμένα, στις αλλαγές προς την αριστερή λωρίδα η γραμμή θα είχε θετική κλίση, ενώ στις αλλαγές προς τη δεξιά αρνητική. Προφανώς, όσο το όχημα κινούνταν στη λωρίδα του, η εγκάρσια μετατόπιση θα παρέμενε σταθερή (ισοδυναμεί με ευθεία γραμμή μηδενικής κλίσης στο διάγραμμα). Το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο αυτών σημείων, αποτελούσε τη διάρκεια της εκτέλεσης της αλλαγής λωρίδας. Στη συνέχεια, εξάγονταν τα δεδομένα θέσης του οχήματος ενδιαφέροντος, τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση και χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό των ταχυτήτων και επιταχύνσεων του οχήματος. Ταυτόχρονα, εξάγονταν για το ίδιο χρονικό διάστημα τα δεδομένα αυτά και για τα οχήματα που κινούνται γύρω από το όχημα που αλλάζει λωρίδα (μπροστινό και πίσω όχημα στην αρχική και τη λωρίδα προορισμού). Τέλος, χρησιμοποιούνταν ο αλγόριθμος LOWESS (LOcally WEighted Scatterplot

Smother) για την εξομάλυνση των δεδομένων. Από την παραπάνω διαδικασία, εξήχθησαν συνολικά 692 τροχιές αλλαγής λωρίδας, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του ελιγμού.

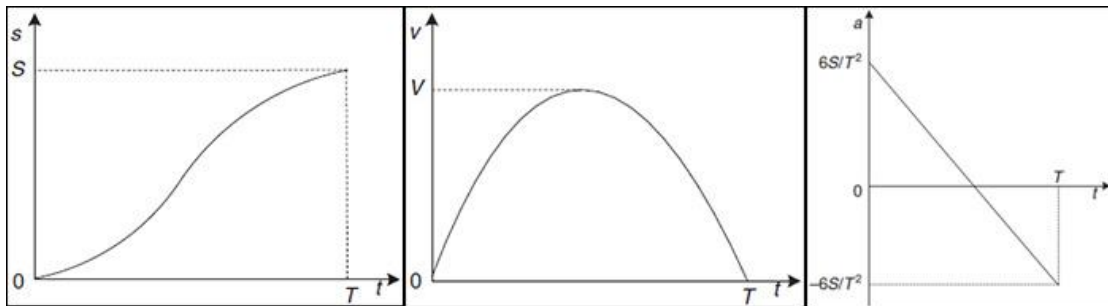
Οι ερευνητές προσδιόρισαν δύο τύπους LCE. Στις συνεχείς (Continuous LCE, CLCE), τα οχήματα περνούν στη διπλανή λωρίδα απευθείας και αποφασιστικά. Αντίθετα, στις ασυνεχείς (Discontinuous LCE, DLCE) τα οχήματα σταματούν για λίγο, πριν εισέλθουν στη διπλανή λωρίδα, σαν να διστάζουν. Αυτό συμβαίνει, ενδεχομένως επειδή ο οδηγός χρειάζεται να αποκτήσει καλύτερη ορατότητα για να αποφασίσει αν θα πραγματοποιήσει τον ελιγμό ή επειδή θέλει να δείξει στα γύρω του οχήματα ότι αλλάζει λωρίδα και έτσι να τα αναγκάσει να του παραχωρήσουν προτεραιότητα. Αυτός ο τύπος ελιγμού, χρησιμοποιείται κυρίως σε πιο επιβαρυνμένες συνθήκες κυκλοφορίας. Το 74% των τροχιών ήταν CLCE, ενώ το υπόλοιπο 26% DLCE. Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται η εγκάρσια μετατόπιση του οχήματος σε συνάρτηση με το χρόνο και είναι εμφανής η διαφοροποίηση των δύο τύπων αλλαγής λωρίδας. Συγκεκριμένα, οι DLCE παρουσιάζουν μια καμπή για περίπου 0.5s. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, το όχημα κινείται ανάμεσα στις δύο λωρίδες και ο οδηγός διστάζει να εκτελέσει τον ελιγμό.



Σχήμα 2.8 Τα διαγράμματα εγκάρσιας μετατόπισης για CLCE (αριστερά) και DLCE (δεξιά) (Yang et al., 2015).

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι δύο τύποι ελιγμών και επεξηγήθηκαν τα σενάρια στα οποία εμφανίζεται ο κάθε ένας από αυτούς. Οι CLCE και DLCE μελετούνταν με βάση τα κινηματικά τους χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα από τη σκοπιά της εγκάρσιας ταχύτητας, της εγκάρσιας επιτάχυνσης και της συνολικής διάρκειας. Τα διαγράμματα των μεταβλητών αυτών παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα και οι ερευνητές επεσήμαναν τη βασική μορφή που φαίνεται να έχει η εκάστοτε καμπύλη. Κατόπιν, μορφώθηκαν τα ιστογράμματα της συχνότητας εμφάνισης των μεγίστων και ελαχίστων τιμών τους. Η κατανομή της εγκάρσιας μέγιστης ταχύτητας βρέθηκε πως ακολουθεί την κατανομή Γάμμα στις CLCE και την Κανονική στις DLCE. Η κατανομή της μέγιστης εγκάρσιας επιτάχυνσης ακολουθεί την κατανομή Γάμμα και στους δύο τύπους ελιγμών, ενώ όταν εξεταζόταν η κατανομή της εγκάρσιας ελάχιστης επιτάχυνσης, τα δεδομένα βρέθηκε πως περιγράφονται από την Κατανομή Πυρήνα (Kernel Distribution) στις CLCE και από την Κανονική Κατανομή στις DLCE. Εξετάστηκε, επιπλέον, η διάρκεια της εκτέλεσης της αλλαγής λωρίδας και κατασκευάστηκαν τα σχετικά ιστογράμματα συχνότητας, ξεχωριστά για την εκάστοτε λωρίδα προορισμού (αριστερά, δεξιά ή συνολικά) και για τον τύπο του ελιγμού (CLCE ή DLCE). Όλες αυτές οι κατανομές, σύμφωνα με τους ερευνητές, ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για τις συνεχείς αλλαγές λωρίδας (CLCE), μαθηματικοποιήθηκε η μορφή που έχουν οι ιδανικές καμπύλες των διαγραμμάτων, για τις μεταβλητές που αναλύθηκαν παραπάνω και που διακρίνονται στο Σχήμα 2.9. Έγινε η παραδοχή, πως η εγκάρσια ταχύτητα είναι πολυώνυμο δευτέρου βαθμού ως προς το χρόνο και με απλή ολοκλήρωση προέκυψε η εγκάρσια μετατόπιση του οχήματος κάθε χρονική στιγμή. Αντίστοιχα, με παραγώγιση προέκυψε η εγκάρσια επιτάχυνση. Οι συντελεστές του πολυωνύμου υπολογίστηκαν με βάση τις συνοριακές συνθήκες της κίνησης. Τελικά, οι ερευνητές κατέληξαν σε μια διπαραμετρική έκφραση της εγκάρσιας επιτάχυνσης, ως προς τη διάρκεια της CLCE και τη διανυόμενη εγκάρσια απόσταση. Η τελευταία, ισούται προσεγγιστικά με το πλάτος μιας λωρίδας κυκλοφορίας, επομένως η τιμή της ήταν γνωστή. Αντίθετα, για την επιβεβαίωση της διάρκειας ενός συνεχούς ελιγμού αλλαγής λωρίδας, χρησιμοποιήθηκε μια παραμετρική εξίσωση από μια άλλη μελέτη, η οποία είναι εμπειρική και εμπεριέχει πληροφορίες για ορισμένα μεγέθη της κυκλοφορίας. Συνδυαστικά, οι δύο εξισώσεις (εγκάρσια επιτάχυνση και διάρκεια του ελιγμού) αποτέλεσαν το μαθηματικό μοντέλο της CLCE. Οι ερευνητές πρότειναν και ένα μοντέλο εγκάρσιων επιταχύνσεων, για τις ασυνεχείς αλλαγές λωρίδας (DLCE), το οποίο προέκυψε εμπειρικά από την παρατήρηση των δεδομένων.



**Σχήμα 2.9** Τυπικές καμπύλες για την εγκάρσια μετατόπιση (αριστερά), την εγκάρσια ταχύτητα (κέντρο) και την εγκάρσια επιτάχυνση (δεξιά) σε μια CLCE (Yang et al., 2015).

Τα μοντέλα που περιγράφονται παραπάνω εμπεριέχουν αρκετές παραμέτρους και ως εκ τούτου έπρεπε να βαθμονομηθούν. Η διαδικασία αποτέλεσε ένα πρόβλημα αριθμητικής βελτιστοποίησης, με τη συνάρτηση κόστους (objective function) να είναι η απόκλιση των υπολογισμένων τιμών των μεταβλητών και των πραγματικών τιμών τους από τις καταγραφές. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, κατόπιν, προέκυψαν με τη χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου στο να αναπαράγει μια ρεαλιστική LCE, επικυρώθηκε με διάφορους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν το Μέσο Σφάλμα (Mean Error), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error), το Μέσο Απόλυτο Σχετικό Σφάλμα (Mean Absolute Relative Error, MARE) και η Ρίζα Μέσου Τετραγώνου Σφαλμάτων (Root Mean Square Error, RMSE).

Συμπερασματικά, αναγνωρίστηκαν δύο τύποι ελιγμών αλλαγής λωρίδας, οι συνεχείς (CLCE) και οι ασυνεχείς (DLCE). Οι ερευνητές κατέληξαν, πως ο οδηγός σε μια CLCE ίσως αναπτύξει μεγαλύτερη εγκάρσια ταχύτητα, αφού έχει περισσότερο χρόνο να επιταχύνει και είναι πιθανό να επιβραδύνει πιο γρήγορα, για να προλάβει να μηδενίσει την εγκάρσια ταχύτητά του στο τέλος του ελιγμού. Τέλος θεώρησαν, πως τα προτεινόμενα μοντέλα για τις CLCE και DLCE, με ένα αποδεκτό εύρος σφάλματος, δύνανται να αναπαράγουν ρεαλιστική οδηγική συμπεριφορά σε μια εκτέλεση αλλαγής λωρίδας.

### 2.1.1.5 Μοντέλο για τη διαμήκη συνιστώσα της αλλαγής λωρίδας

Στη μελέτη των Yang et al. (2016) αναλύθηκε η οδηγική συμπεριφορά κατά την αλλαγή λωρίδας και προτάθηκε ένα μοντέλο για τη διαμήκη συνιστώσα της κίνησης του οχήματος. Οι ερευνητές εστίασαν μόνο στο στάδιο της εκτέλεσης και όχι σε ολόκληρο τον ελιγμό και χρησιμοποίησαν τα δεδομένα του πειράματος NGSIM ως στατιστικό δείγμα για την εκπαίδευση και αξιολόγηση του μοντέλου τους. Πριν την ανάλυση, τα δεδομένα υπέστησαν μια πρότερη επεξεργασία. Αρχικά, απομονώθηκαν οι θέσεις του οχήματος ενδιαφέροντος για ένα χρονικό διάστημα 10s, τοποθετημένο συμμετρικά εκατέρωθεν του χρόνου αλλαγής λωρίδας. Στη συνέχεια εντοπίστηκαν τα σημεία, στα οποία η κλίση της καμπύλης της εγκάρσιας μετατόπισης του οχήματος αποκλίνει και επανέρχεται στη μηδενική τιμή. Αυτά αντιστοιχίστηκαν στα σημεία εκκίνησης και ολοκλήρωσης του ελιγμού. Τέλος, εξήχθησαν από τις καταγραφές οι θέσεις και των γύρω οχημάτων και υπολογίστηκαν οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις, για όλα τα οχήματα που συμμετέχουν στις LCE.

Οι αλλαγές λωρίδας, χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, τις συνεργατικές (Cooperative Lane Changing Execution, CLCE) και τις επιβεβλημένες (Forced Lane Changing Execution, FLCE). Κριτήριο αποτέλεσε το κατά πόσο ο οδηγός του οχήματος που θα βρεθεί να ακολουθεί το όχημα ενδιαφέροντος στη λωρίδα προορισμού (lag vehicle σύμφωνα με το Σχήμα 2.3) συνεργάζεται και “επιτρέπει” στο τελευταίο να πραγματοποιήσει την αλλαγή λωρίδας ή επιταχύνει και προσπαθεί να την αποτρέψει. Στη δεύτερη περίπτωση, ο οδηγός κινεί το όχημα ενδιαφέροντος με κατάλληλο τρόπο, ώστε να δημιουργήσει από μόνος του το απαραίτητο κενό στη λωρίδα προορισμού, για την ολοκλήρωση του ελιγμού.

Μια εκτέλεση αλλαγής λωρίδας θεωρήθηκε CLCE, αν ο χρονικός διαχωρισμός ανάμεσα στα δύο οχήματα (lag και subject vehicle) αυξανόταν κατά τη διάρκεια του ελιγμού. Αντίθετα, αν ο χρονικός διαχωρισμός μεταξύ των δύο οχημάτων παρέμενε σταθερός ή μειωνόταν, τότε η εκτέλεση της αλλαγής λωρίδας θεωρήθηκε FLCE. Με αυτήν την αλγοριθμική μέθοδο, προέκυψαν 452 CLCE και 321 FLCE από τα δεδομένα που καταγράφηκαν στο πείραμα NGSIM.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν τα δύο μοντέλα ξεχωριστά για τους δύο τύπους της LCE, τα οποία είχαν σκοπό να αναπαράγουν τη ρεαλιστική διαμήκη κίνηση ενός οχήματος κατά την εκτέλεση αλλαγής λωρίδας. Οι εξισώσεις είναι παραμετρικές και οι συντελεστές υπολογίστηκαν μέσω της βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης κόστους, η οποία είχε ως μεταβλητή το υπολογιστικό σφάλμα ανάμεσα στο εκάστοτε μοντέλο και τα πραγματικά δεδομένα του πειράματος. Το μη γραμμικό πρόβλημα που προέκυψε επιλύθηκε με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγόριθμου. Η αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων που προτάθηκαν πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια διάφορων στατιστικών δεικτών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error), το Μέσο Απόλυτο Σχετικό Σφάλμα (Mean Absolute Relative Error) και ο Συντελεστής Προσδιορισμού ( $R^2$ ). Οι παραπάνω έλεγχοι εκτελέστηκαν τρεις φορές, για την επιτάχυνση, την ταχύτητα και τη θέση του οχήματος.

Συμπερασματικά, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν έδειξαν να αναπαράγουν καλά τη συμπεριφορά ενός οχήματος στην LCE. Μάλιστα, η απόδοσή τους βρέθηκε καλύτερη από

το προγενέστερο μοντέλο των Moridpour et al. (2010). Οι ερευνητές παρατήρησαν, πως όταν ο οδηγός του οχήματος ενδιαφέροντος αποφασίζει να πραγματοποιήσει LCE, έχει ήδη επιλέξει τον τρόπο που θα χειριστεί την ύπαρξη των οχημάτων στη λωρίδα προορισμού. Επιπλέον υποστήριξαν, πως κατά τη διάρκεια του ελιγμού, η προσοχή του οδηγού που αλλάζει λωρίδα μεταπίπτει ταχύτατα από το όχημα που βρίσκεται στη λωρίδα του, στα οχήματα που κινούνται στη λωρίδα προορισμού. Τέλος, στις FLCE οι οδηγοί του οχήματος ενδιαφέροντος, από όλα τα οχήματα της λωρίδας προορισμού δίνουν μεγαλύτερη προσοχή στο προπορευόμενο όχημα και όχι σε αυτό που έπεται.

### 2.1.2 Καταγραφή αλλαγών λωρίδας με GPS και σαρωτές laser

Οι Yao et al. (2013, June) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για την πρόβλεψη της τροχιάς που πρόκειται να ακολουθήσει ένα όχημα κατά την εκτέλεση αλλαγής λωρίδας, μέσα από την ανάλυση πολλών δειγμάτων τέτοιων ελιγμών. Για το σκοπό αυτό, πρώτα δημιούργησαν μια εκτενή βάση δεδομένων από τροχιές, που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια πραγματικής οδήγησης. Έπειτα, σχεδιάστηκε μια παραμετρική τροχιά αλλαγής λωρίδας, βασισμένη στις  $k$  πιο συναφείς τροχιές που εντοπίζονταν στη βάση δεδομένων, με κριτήριο να επικρατούν όμοιες συνθήκες τη στιγμή εκκίνησης του ελιγμού. Το εύρος απόκλισης για τη θεώρηση ή μη της ομοιότητας, λήφθηκε υπόψη ως παράμετρος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε προβλέπει την τροχιά μόνο για εκείνες τις αλλαγές λωρίδας, που πρόκειται να πραγματοποιηθούν σε ευθύγραμμα οδικά τμήματα.

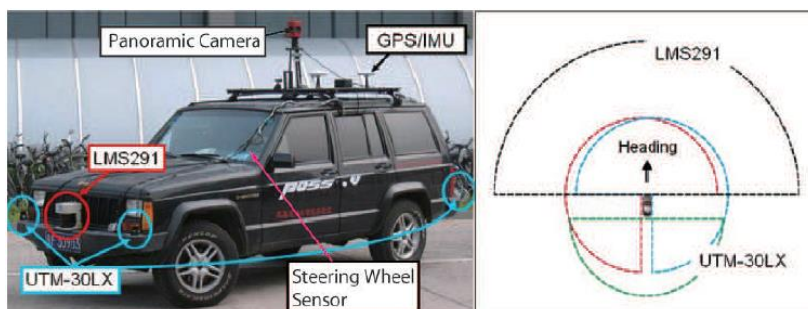
Τα απαιτούμενα δεδομένα συλλέχθηκαν με τη χρήση ενός κατάλληλα εξοπλισμένου οχήματος, καθώς εκείνο κινούνταν στην 4<sup>η</sup> Περιφερειακή Οδό του Πεκίνου, στην Κίνα. Η συγκεκριμένη οδός επιλέχθηκε, επειδή αποτελεί μια πολύ σημαντική αρτηρία στην ευρύτερη περιοχή, διαθέτει ομοιόμορφη διατομή και παρουσιάζει ως επί το πλείστον ευθύγραμμη χάραξη, ώστε να μην επηρεάζεται η μορφή των καταγραφόμενων τροχιών. Παρατηρήθηκαν σημαντικοί κυκλοφοριακοί φόρτοι κατά τη διάρκεια των καταγραφών, όχι όμως σε βαθμό που να επηρεαζόταν η συλλογή στοιχείων. Η ταχύτητα του οχήματος καταγραφής ήταν περίπου 80km/h, όσο και το όριο ταχύτητας της υπόψη αρτηρίας και η οδήγηση πραγματοποιούνταν κυκλικά σε όλο το μήκος της (85.3km). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν στη διαδρομή έξι γύροι κατανεμημένοι σε διάφορες ημερομηνίες, ενώ καταγράφηκαν περισσότερες από 700 τροχιές αλλαγής λωρίδας.

Για την ανάλυση δε χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τροχιές του οχήματος που εκτελούσε την αλλαγή λωρίδας (“ego vehicle”), αλλά και οι τροχιές των οχημάτων που κινούνταν πλησίον αυτού, στις διπλανές λωρίδες. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές διατάξεις οργάνων για τη συλλογή των δύο πακέτων δεδομένων, αλλά όλα ήταν τοποθετημένα στο όχημα του πειράματος. Αυτό κινούνταν ανεξάρτητα μέσα στη ροή της κυκλοφορίας, χωρίς να απαιτείται καμία εκ των προτέρων συνεννόηση με άλλους οδηγούς. Με τον τρόπο αυτό, αυξήθηκε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μελέτης. Για το πρώτο πακέτο δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένας ενσωματωμένος δέκτης GPS, συνδυασμένος με μια Μονάδα Αδρανειακής Μέτρησης (Inertial Measurement Unit, IMU) και καταγραφόταν η γωνία προσανατολισμού (yaw angle) και η θέση του οχήματος σε παγκόσμιες συντεταγμένες, με συχνότητα καταγραφής ίση με 10Hz. Επιπλέον, μια μικρότερη IMU, συγχρονισμένη με το GPS ήταν προσαρμοσμένη στο τιμόνι και κατέγραφε την



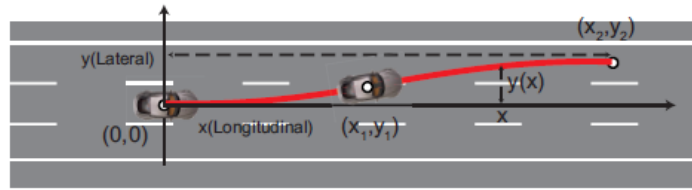
οδηγική συμπεριφορά, σε όρους γωνίας στροφής του τιμονιού. Για την οπτική εποπτεία των αλλαγών λωρίδας, μια πανοραμική κάμερα κατέγραφε σε βίντεο τον περιβάλλοντα χώρο του οχήματος. Τέλος, για διευκόλυνση και γρηγορότερη προσβασιμότητα του μεγάλου όγκου δεδομένων, σημειωνόταν χειροκίνητα και κατά προσέγγιση ο χρόνος εκκίνησης και πέρατος του κάθε ελιγμού.

Όσον αφορά στο δεύτερο πακέτο δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν οριζόντιοι σαρωτές laser τοποθετημένοι σε διάφορες θέσεις περιμετρικά του οχήματος, έτσι ώστε να καλύπτεται ο χώρος προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ακτίνα εντοπισμού κινούμενων αντικειμένων ήταν 25m στο πλαϊνό και πίσω μέρος και έως 45m στο μπροστινό μέρος του οχήματος του πειράματος. Με την ανάπτυξη ενός συστήματος εγκλωβισμού και καταγραφής στόχων κατέστη δυνατή η εξαγωγή των τροχιών των οχημάτων που κινούνταν στο άμεσο περιβάλλον του οχήματος του πειράματος. Το σύστημα αυτό λειτουργούσε σε συνδυασμό με τους αισθητήρες, καθώς ο οδηγός εκτελούσε τις αλλαγές λωρίδας. Συνολικά η διάταξη αυτή αποτελούνταν από τέσσερις αισθητήρες. Το όχημα καταγραφής με όλα τα όργανα και η περιοχή που αυτά κάλυπταν απεικονίζονται στην *Εικόνα 2.1*.



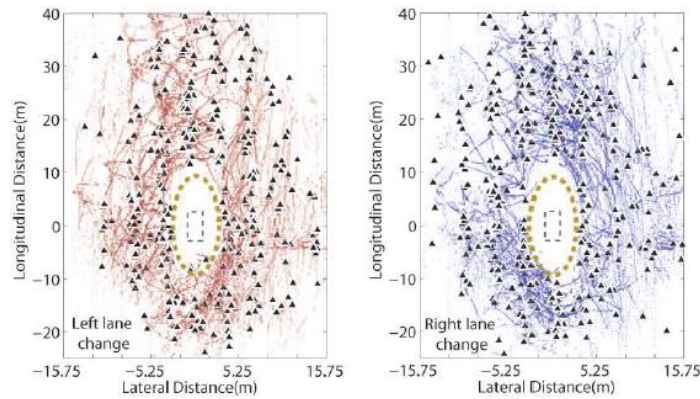
*Εικόνα 2.1* Το όχημα του πειράματος με τα διάφορα όργανα καταγραφής (αριστερά) και η περιοχή κάλυψης των οργάνων (δεξιά) (Yao et al., 2013, June).

Το σύστημα πρόβλεψης της τροχιάς αλλαγής λωρίδας αναπτύχθηκε να λειτουργεί online και σε πραγματικό χρόνο. Με γνωστή την κατάσταση (χωρική και κινηματική) στην οποία βρίσκονται κάθε στιγμή το όχημα του πειράματος και αυτά που κινούνται γύρω του, αναζητούνται στη βάση δεδομένων οι  $k$  ελιγμοί με τις πιο όμοιες αρχικές συνθήκες. Οι ελιγμοί αυτοί συνδυάζονται μεταξύ τους με παρεμβολή και υπολογίζεται αδρά το σημείο εκείνο του χώρου στο οποίο συγκλίνουν. Αυτό το σημείο θεωρείται από το σύστημα ως το σημείο στόχος, στο οποίο πρέπει να καταλήγει το όχημα στο τέλος του ελιγμού του. Ακολούθως, υπολογίζεται η παραμετρική καμπύλη της αλλαγής λωρίδας, η οποία συνδέει τα σημεία αρχής και τέλους του ελιγμού. Η μαθηματική της έκφραση επιλέχθηκε να είναι ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού, με ανεξάρτητη μεταβλητή τη διαμήκη μετατόπιση και εξαρτημένη την εγκάρσια μετατόπιση. Οι συντελεστές του πολυωνύμου υπολογίστηκαν με εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών. Η καμπύλη που προκύπτει, απεικονίζεται στο *Σχήμα 2.10* και σύμφωνα με τους ερευνητές είναι το ανάπτυγμα Taylor πέμπτης τάξης μιας κλωθοειδούς καμπύλης.



**Σχήμα 2.10** Η τροχιά του οχήματος στην αλλαγή λωρίδας θεωρείται πολυώνυμο πέμπτου βαθμού (Yao et al., 2013, June).

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός κινούμενου τοπικού συστήματος συντεταγμένων, το οποίο τοποθετήθηκε στο κέντρο βάρους του οχήματος καταγραφής και ήταν προσανατολισμένο στην κίνησή του. Στη συνέχεια, απεικονίστηκαν ολόκληρες οι τροχιές των γύρω οχημάτων πάνω σε αυτό το σύστημα αναφοράς και συντέθηκαν σε ένα ενιαίο γράφημα. Είναι εμφανές, πως λαμβάνονταν υπόψη μόνο τροχιές οι οποίες πραγματοποιούνταν όταν το όχημα του πειράματος εκτελούσε αλλαγή λωρίδας. Μάλιστα, για καλύτερη οπτικοποίηση του χώρου γύρω από το όχημα καταγραφής, οι ερευνητές τοποθέτησαν στο γράφημα αυτό όλες τις τροχιές που καταγράφηκαν κατά την τελευταία ημέρα του πειράματος. Αμέσως έγινε εμφανές, πως γύρω από αυτό το όχημα καταγραφής υπάρχει μια ζώνη κενή από κινούμενα εμπόδια. Αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μια ζώνη ασφαλείας, την οποία φροντίζει να διατηρεί ο οδηγός κατά την οδήγηση. Για απλότητα και υπέρ της ασφαλείας, η περιοχή αυτή περιγράφηκε μαθηματικά από μια παραμετρική εξίσωση έλλειψης. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 2.11, όπου τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν το σημείο αρχής της τροχιάς του κάθε οχήματος, το μαύρο παραλληλόγραμμο είναι το όχημα του πειράματος και με κίτρινο οριοθετείται η ζώνη ασφαλείας.



**Σχήμα 2.11** Η θέση των γύρω οχημάτων ως προς το όχημα καταγραφής κατά τη διάρκεια των αριστερών (αριστερά) και των δεξιών αλλαγών λωρίδας (δεξιά) (Yao et al., 2013, June).

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης, αποκλείστηκαν δειγματοληπτικά από τη βάση δεδομένων ορισμένες τροχιές. Κατόπιν, έγινε μια προσομοίωση και υπολογίστηκε η τροχιά που θα ακολουθούσε ένα φανταστικό όχημα όταν καλούνταν να αλλάξει λωρίδα. Οι αρχικές συνθήκες ορίστηκαν να είναι ίδιες με τις συνθήκες που επικρατούσαν σε μια από τις τροχιές που αποκλείστηκαν. Όσο πιο ταυτόσημες προέκυπταν η πραγματική και η υπολογισμένη τροχιά, τόσο καλύτερη θα ήταν η απόδοση του προγράμματος. Επιπλέον, θεωρήθηκε πολύ σημαντικό να μην παραβιάζεται η ζώνη ασφαλείας του φανταστικού οχήματος από τα υπόλοιπα οχήματα. Συνεπώς, όταν η προσομοίωση παρήγαγε τροχιές που ικανοποιούσαν τη συνθήκη αυτή, η τροχιά χαρακτηριζόταν ασφαλής. Σε αντίθετη περίπτωση, χαρακτηριζόταν ως ρισκίνδυνη.

Ύστερα από αξιολόγηση όλων των καταγεγραμμένων τροχιών, εντοπίστηκαν μόνο τρεις ριψοκίνδυνοι ελιγμοί, περιπτώσεις δηλαδή που εμφανιζόταν κάποιο όχημα, έστω και οριακά, εντός της ζώνης ασφαλείας του οχήματος του πειράματος. Αναπόφευκτα και στην προσομοίωση, οι τροχιές που θα υπολογίζονταν με βάση τις αρχικές συνθήκες των τριών αυτών τροχιών θα χαρακτηρίζονταν ως ριψοκίνδυνες. Αυτό συνέβαινε, σύμφωνα με τους ερευνητές, επειδή δεν αρκούσε η γνώση των αρχικών συνθηκών για να προβλεφθεί πλήρως ο τρόπος αντίδρασης των γύρω οδηγών σε μια αλλαγή λωρίδας. Παράλληλα, το στατιστικό δείγμα δεν ήταν ακόμη αρκετά μεγάλο, για να κάνει τη διαφορά.

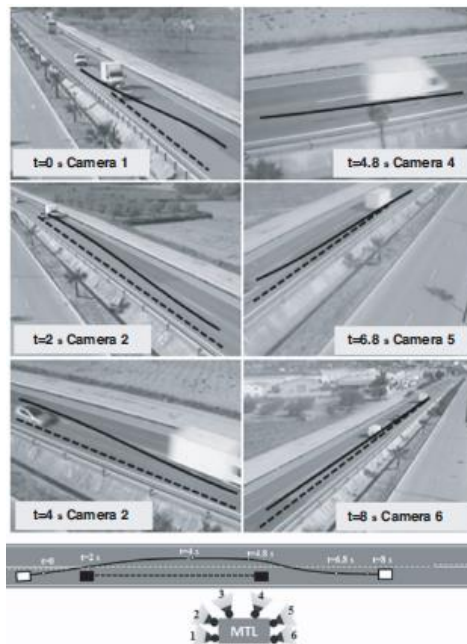
Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα έδειξαν, πως η μέθοδος μπορούσε να προβλέψει τροχιές αλλαγής λωρίδας σε βαθμό που να προσομοιάζεται η ανθρώπινη οδήγηση. Οι ερευνητές προειδοποίησαν, ωστόσο, πως η βάση δεδομένων δεν έπρεπε να επεκταθεί υπερβολικά, καθώς ο αλγόριθμος θα καθίσταντο μη αποδοτικός από θέμα υπολογιστικού κόστους. Επιπλέον θεώρησαν, πως θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η επιλογή διαφορετικής μαθηματικής καμπύλης ως παραμετρική τροχιά αλλαγής λωρίδας. Τέλος, υποστήριξαν πως η μεθοδολογία τους θα μπορούσε να υποστηρίξει συγκρίσεις μεταξύ τρόπων οδήγησης, αν επεκτεινόταν η βάση δεδομένων και συμπεριλαμβάνονταν πειράματα που θα πραγματοποιούνταν με διαφορετικούς οδηγούς ή κάτω από διαφορετικές οδηγικές συνθήκες.

### 2.1.3 Βιντεοσκόπηση προσπεράσεων από εξέδρα πλησίον της οδού

Οι Llorca & García (2011) πρότειναν μια νέα μέθοδο παρατήρησης και καταγραφής οχημάτων που πραγματοποιούν προσπέραση σε επαρχιακές οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Σκοπός ήταν η ανάλυση των τροχιών τους και η σύγκριση με τα πλέον δημοφιλή μοντέλα Απόστασης Ορατότητας για Προσπέραση (Passing Sight Distance, PSD). Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε ένα οδικό πείραμα και δημιουργήθηκε μια εκτενής βάση δεδομένων με τροχιές προσπεράσεων.

Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μιας κινητής αρθρωτή εξέδρας ύψους 12m, στην κορυφή της οποίας τοποθετήθηκαν έξι συγχρονισμένες κάμερες με δυνατότητα χειρισμού εξ αποστάσεως. Η εξέδρα στήθηκε σε σημείο τέτοιο, που οι κάμερες είχαν την οδό καθαρά στο οπτικό τους πεδίο, αλλά ταυτόχρονα ήταν κατά το δυνατόν κρυμμένες από τους οδηγούς. Με αυτόν τον τρόπο, οι τελευταίοι αναμενόταν να μεταβάλλουν την οδηγική τους συμπεριφορά και η μελέτη έγινε αυτομάτως πιο αξιόπιστη. Η κάθε μια από τις κάμερες είχε ως τομέα ευθύνης της και ένα τμήμα της οδού, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην *Εικόνα 2.2*. Λαμβάνονταν και καταγράφονταν στιγμιότυπα των θέσεων όλων των οχημάτων πάνω στην οδό με συχνότητα 0.2Hz. Κατόπιν, στην ανάλυση συνδυάζονταν σειριακά τα βίντεο από τις έξι κάμερες και εξαγόταν ολόκληρη η τροχιά του κάθε οχήματος. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες προσπέρασης, μήκους από 245 έως 1,300m, σε μια επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας, στα περίχωρα της Βαλένθια στην Ισπανία, το 2010. Συνολικά καταγράφηκαν 234 ελιγμοί προσπέρασης, όλες υπό το φως της ημέρας, ενώ τα οδικά τμήματα επιλέχθηκαν να είναι οριζόντια και με παρόμοιους κυκλοφοριακούς φόρτους

(250-300οχ./ώρα). Τα βαρέα οχήματα αποτέλεσαν το 15-23% της συνολικής κυκλοφορίας κατά το χρονικό διάστημα της καταγραφής.



**Εικόνα 2.2** Το οπτικό πεδίο των έξι καμερών με την τροχιά των οχημάτων (πάνω) και σκαριφηματική κάτοψη της εξέδρας καταγραφής (Llorca & García, 2011).

Τα βίντεο αναλύθηκαν και εξήχθησαν οι θέσεις των οχημάτων με τη βοήθεια ενός ειδικού λογισμικού. Αρχικά, τοποθετήθηκαν δοκιμαστικά ορισμένα πολύγωνα πάνω στην οδό και μετρήθηκαν οι αποστάσεις τους από τις γραμμές του οδοστρώματος. Κατόπιν, το λογισμικό τοποθέτησε τις τροχιές έως και τριών οχημάτων πάνω σε ένα δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο είχε εκ των προτέρων αντιστοιχηθεί με το υπόβαθρο αναφοράς της οδού. Η προοπτική παραμόρφωση (perspective distortion) των φακών δεν επηρέασε τους υπολογισμούς, καθώς είχε ποσοτικοποιηθεί εκ των προτέρων με ακρίβεια από τους ερευνητές, για όλο το μήκος των ζωνών προσπέρασης, με τη βοήθεια σταθερών γραμμών αναφοράς. Συνεπώς, το σφάλμα που εισήχθη στη διαδικασία εξαιτίας του φαινομένου αυτού, εξαλείφθηκε με κατάλληλους αλγορίθμους μετασχηματισμού.

Επειδή η ευκρίνεια των συσκευών δεν επέτρεψε να εξαχθούν οι τροχιές των οχημάτων όταν αυτά βρίσκονταν σε απόσταση μεγαλύτερη από 300m, η εξέδρα τοποθετήθηκε στο μέσον του εκάστοτε οδικού τμήματος και οι κάμερες κατέγραφαν και από τις δύο πλευρές. Με το τέχνασμα αυτό, η ζώνη προσπέρασης κατέστη δυνατό να έχει μήκος έως και 600m. Εξαιτίας του περιορισμού αυτού, στην ανάλυση των δεδομένων δε χρησιμοποιήθηκαν όλες οι προσπεράσεις που είχαν καταγραφεί, αλλά ένα μόνο μέρος του δείγματος. Συγκεκριμένα, λήφθηκαν υπόψη 58 ελιγμοί, για τους οποίους εξήχθησαν οι τροχιές τουλάχιστον του οχήματος που προσπερνούσε και αυτού που προσπερνούσαν.

Οι στιγμιαίες θέσεις του οχήματος τοποθετήθηκαν σειριακά για όλες τις χρονικές στιγμές πάνω στο σύστημα συντεταγμένων και προέκυψε η τροχιά του. Με απλούς υπολογισμούς βρέθηκε η ταχύτητα και η επιτάχυνση του οχήματος για την κάθε χρονική στιγμή. Το πακέτο δεδομένων κάθε προσπέρασης περιλάμβανε την ακριβή θέση, τα-

χύτητα και επιτάχυνση των τριών συμμετεχόντων οχημάτων (αυτού που προσπερνούσε, αυτού που προσπερνούνταν και του αντίθετα κινούμενου οχήματος στην αριστερή λωρίδα). Η ταχύτητα λειτουργίας  $V_{85}$  υπολογίστηκε συνολικά για όλες τις ζώνες προσπέρασης ίση με 98-120km/h.

Στις ζώνες προσπέρασης μικρότερου μήκους, το ποσοστό των προσπεράσεων που μπορούσαν να αναλυθούν είναι μεγάλο. Εντούτοις, σε απόλυτους αριθμούς, εκεί πραγματοποιούνταν λιγότερες προσπεράσεις σε σχέση με τις ζώνες προσπέρασης μεγαλύτερου μήκους. Αυτό το φαινόμενο είναι σε συμφωνία με τις παροτρύνσεις των ισπανικών κανονισμών οδήγησης. Οι κύριες μεταβλητές που αναλύθηκαν στη μελέτη είναι ο χρόνος και η απόσταση που διανύει το όχημα που προσπερνάει στο αντίθετο ρεύμα. Καθώς σχεδόν όλες οι συγκρούσεις που λαμβάνουν χώρα σε ελιγμούς προσπέρασης συμβαίνουν στη φάση αυτή, οι μεταβλητές αυτές είναι καίριας σημασίας. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης και αναζητήθηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν καλύτερα τις δύο αυτές μεταβλητές.

Οι ερευνητές επισήμαναν στην τροχιά του οχήματος που προσπερνάει πέντε σημεία ενδιαφέροντος. Το πρώτο τοποθετήθηκε όταν οποιοδήποτε μέρος του οχήματος που προσπερνάει ξεκινούσε να καταλαμβάνει την αριστερή λωρίδα, ενώ το δεύτερο σημείο τη στιγμή που ο μπροστινός προφυλακτήρας του ερχόταν στο ίδιο ύψος με τον πίσω προφυλακτήρα του οχήματος που προσπερνάται. Με άλλα λόγια, όταν η διαμήκης απόσταση (headway) των δύο οχημάτων μηδενιστεί. Το τρίτο σημείο τοποθετήθηκε όταν οι δύο μπροστινοί προφυλακτήρες έρχονταν στο ίδιο ύψος, ενώ το τέταρτο ήταν το αντίστροφο του δεύτερου σημείου (πίσω προφυλακτήρας με μπροστινό). Το πέμπτο σημείο ήταν η χρονική στιγμή, κατά την οποία το όχημα που προσπερνάει επέστρεψε ολόκληρο πίσω στη δεξιά λωρίδα. Οι πέντε χρονικές αυτές στιγμές, διακριτοποιούν τον ελιγμό της προσπέρασης σε τέσσερις φάσεις. Συνολικά η προσπέραση θεωρήθηκε, πως διαρκεί χρόνο  $t_1$ , ο οποίος ξεκινά στο σημείο 1, σταματά στο σημείο 5 και υπολογίζεται ως η μέση τιμή των αντίστοιχων χρόνων όλων των ελιγμών που αναλύονται. Κατά συνέπεια, όλες οι προσπεράσεις ήταν συγκρίσιμες μεταξύ τους.

Έπειτα, οι ερευνητές συνέκριναν τα ευρήματά τους με ορισμένα υπάρχοντα μοντέλα PSD, από ορισμένες σκοπιές. Παρόλα αυτά τόνισαν, πως επειδή τα δεδομένα για το όχημα που προσπερνάει περιορίζονταν στο τμήμα της τροχιάς του που βρισκόταν στην αριστερή λωρίδα, δεν κατέστη δυνατή μια πλήρης σύγκριση των μοντέλων.

Συμπερασματικά, καινούριες μεταβλητές, όπως το μήκος της ζώνης προσπέρασης, μπορούσαν να ληφθούν υπόψη στα μοντέλα PSD. Εξάλλου φάνηκε, πως οδηγοί οι οποίοι έχουν περισσότερο διαθέσιμο χώρο, συνηθίζουν να εκτελούν χρονικά μεγαλύτερους ελιγμούς προσπέρασης. Παρόλα αυτά, οι ταχύτητες που λαμβάνονται υπόψη στα μοντέλα PSD θα μπορούσαν να αναθεωρηθούν. Συγκεκριμένα, η διαφορά ταχύτητας των δύο οχημάτων υπολογίστηκε (μέση τιμή για όλο το χρονικό διάστημα  $t_1$ ) σε 23km/h, αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή των 16km/h που θεωρείται συνήθως. Οι ερευνητές αναγνώρισαν, πως τα εξαγόμενα αποτελέσματα ισχύουν κυρίως για τις Ισπανικές οδούς και πρότειναν να μελετηθεί περισσότερο η προσπέραση σε μικρού μήκους ζώνες. Επιπλέον, η μέθοδος καταγραφής θα μπορούσε να επεκταθεί στην εκτέλεση πειραμάτων σε κεκλιμένα τμήματα οδών ή κατά τις νυχτερινές ώρες με την τοποθέτηση στις κάμερες φακών υπέρυθρων ακτίνων. Τα αποτελέσματα, κατόπιν, θα μπορούσαν

να συγκριθούν με τα αντίστοιχα της οριζόντιας οδού και της μέρας. Τόνισαν, ακόμη, πως η εκτέλεση πειραμάτων, στα οποία το όχημα που προσπερνάει είναι φορτηγό, είναι επιβεβλημένη και πίστευαν, πως αν εμπλουτιζόταν η βάση δεδομένων που είχε δημιουργηθεί, θα ήταν δυνατή η ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου PSD. Τέλος διαπίστωσαν, πως η μελέτη της προσπέρασης από τη σκοπιά της συμπεριφοράς του οδηγού, δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με τη μεθοδολογία των καμερών, αφού δεν λαμβάνονται δεδομένα από το εσωτερικό του οχήματος.

#### 2.1.4 Βιντεοσκόπηση προσπεράσεων από σημεία παρατήρησης και ελικόπτερο

Οι Polus et al. (2000) αξιολόγησαν τη διαδικασία προσπέρασης σε επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Σκοπός τους ήταν πρώτον, η ανάπτυξη μεθόδων για την ποσοτικοποίηση των κύριων φάσεων της προσπέρασης και δεύτερον, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με υπάρχοντα μοντέλα σχεδιασμού των εθνικών οδών. Δευτερευόντως, αξιολογήθηκαν τα διάφορα χρονικά μεγέθη του ελιγμού προσπέρασης.

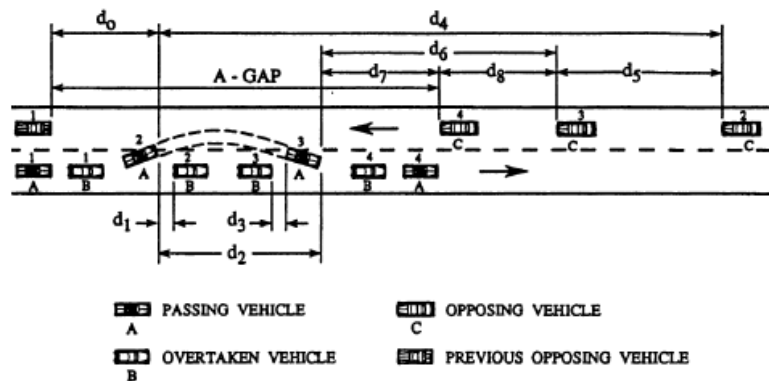
Για τις ανάγκες της ανάλυσης, συλλέχθηκαν δεδομένα προσπεράσεων από τους ίδιους τους ερευνητές, μέσω της βιντεοσκόπησης έξι οδικών τμημάτων. Η κυκλοφορία διαταράχθηκε στον ελάχιστο δυνατό βαθμό, καθώς οι οδηγοί δεν ήταν ενήμεροι για την καταγραφή. Σε πέντε από αυτές τις τοποθεσίες, οι κάμερες τοποθετήθηκαν σε ένα ψηλό σημείο πλησίον της οδού, ενώ στο έκτο σημείο παρατήρησης χρησιμοποιήθηκε ως πλατφόρμα για τις κάμερες ένα ελικόπτερο, το οποίο πετούσε συνεχώς πάνω από την οδό. Για τη χρονική διάσταση των ελιγμών ένα ψηφιακό ρολόι ήταν ενσωματωμένο στα βίντεο, ενώ για τη μέτρηση των αποστάσεων είχαν τοποθετηθεί εκ των προτέρων σταθερά σημεία αναφοράς κατά μήκος των οδικών τμημάτων. Όλες οι καταγραφές πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας και με καλό καιρό, με αποτέλεσμα το οδόστρωμα να είναι στεγνό και η ορατότητα πολύ καλή σε όλες τις κατευθύνσεις. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ήταν 80-90km/h, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι 300-1000οχ./ώρα, ενώ τα οδικά τμήματα, μήκους τουλάχιστον 800m, δεν παρουσίαζαν οριζόντια και κατακόρυφη καμπυλότητα. Τέλος, στα υπό μελέτη οδικά τμήματα δεν υπήρχαν κόμβοι, διασταυρώσεις και γενικά οτιδήποτε θα μπορούσε να επιδράσει στη ροή της κυκλοφορίας.

Το 17-28% των οχημάτων ήταν φορτηγά (βάρους μεγαλύτερου των 4tn), ενώ η ταχύτητα λειτουργίας  $V_{85}$  υπολογίστηκε και για τα έξι σημεία καταγραφής ίση με 81-91km/h. Συνολικά καταγράφηκαν 1,500 προσπεράσεις, από τις οποίες οι 60 ήταν προσπάθειες που ακυρώθηκαν και ο οδηγός επέστρεψε στη λωρίδα του. Από τις ολοκληρωμένες, το 73% των καταγραφών ήταν μονές προσπεράσεις (single pass), το 11% πολλαπλές (ένα όχημα προσπερνάει διαδοχικά πολλά οχήματα, multiple pass) και το 16% σύνθετες (περισσότερα από ένα οχήματα προσπερνούν περισσότερα από ένα οχήματα, compound pass). Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά τις μονές προσπεράσεις, οι οποίες αναλύονται περαιτέρω σε επιταχυνόμενες (accelerative pass) και “ιπτάμενες” (flying pass ή αλλιώς προσπεράσεις σταθερής ταχύτητας). Στις πρώτες, ο οδηγός μειώνει την ταχύτητά του προτού προσπεράσει το προπορευόμενο όχημα, επειδή το αντίθετο ρεύμα είναι κατειλημμένο και δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η προ-

σπέραση. Αντίθετα, μια προσπέραση θεωρείται “ιπτάμενη”, όταν το όχημα που προσπερνάει δεν καθυστερείται από το προπορευόμενο όχημα και το προσπερνάει χωρίς να μειώσει την ταχύτητά του.

Βασιζόμενοι στα δεδομένα που συλλέχθηκαν, οι ερευνητές διακριτοποίησαν τη διαδικασία της προσπέρασης σε τέσσερα στάδια. Αρχικά, ένα όχημα προσεγγίζει ένα όχημα που κινείται στην ίδια λωρίδα, αλλά με χαμηλότερη ταχύτητα. Έπειτα, ο οδηγός του πιο γρήγορα κινούμενου οχήματος παρατηρεί την επικρατούσα απόσταση ορατότητας και την αντίθετα διερχόμενη κυκλοφορία και αν οι συνθήκες το επιτρέπουν, εκτελεί ελιγμό προσπέρασης. Στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια της προσπέρασης, ο οδηγός επιταχύνει, έως ότου αφήσει πίσω του το προπορευόμενο όχημα κατά μια αρκετή απόσταση. Τέλος, το όχημα που προσπερνάει επιστρέφει στην αρχική του λωρίδα, αφού ο οδηγός του αφήσει αρκετή απόσταση μεταξύ αυτού και του επερχόμενου οχήματος. Η εκκίνηση του ελιγμού ορίζεται ως η χρονική στιγμή, κατά την οποία ο μπροστά αριστερά τροχός του οχήματος που προσπερνάει διέρχεται από τη διακεκομμένη λωρίδα στον άξονα της οδού. Αντιστοίχως ο ελιγμός ολοκληρώνεται, όταν ο πίσω αριστερά τροχός του οχήματος διέρχεται από τη διακεκομμένη λωρίδα.

Τα οχήματα που συμμετέχουν σε έναν ελιγμό, στο υπόψη μοντέλο προσπέρασης, είναι αυτό που προσπερνάει, αυτό που προσπερνάται και αυτό που κινείται στη λωρίδα του αντίθετου ρεύματος. Για κάθε ένα από τα τέσσερα στάδια καταγράφονταν οι θέσεις στις οποίες βρίσκονται τα τρία αυτά οχήματα και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Κατόπιν, υπολογίστηκαν τα διαγράμματα των ταχυτήτων των τριών οχημάτων και όλες οι αποστάσεις που διακρίνονται στο Σχήμα 2.12, μαζί με τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα. Οι ερευνητές ισχυρίστηκαν, πως το μέγιστο σφάλμα μέτρησης σε κάθε ένα από τα στάδια της προσπέρασης, ύστερα από την ανάλυση των καταγραφών, είναι 5% για μικρά χρονικά διαστήματα (μερικά δευτερόλεπτα) και 1% για μεγάλα χρονικά διαστήματα και αποστάσεις (περίπου 10s). Επιπλέον, για μέσες τιμές της ταχύτητας το ίδιο σφάλμα είναι περίπου 2%.



Σχήμα 2.12 Σκαριφηματική απεικόνιση του μοντέλου προσπέρασης μαζί με τις επιμέρους αποστάσεις (Polus et al., 2000).

Τα δεδομένα αναλύθηκαν με στατιστικά εργαλεία. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των αποστάσεων  $d_i$  και των αντίστοιχων χρονικών διαστημάτων, για το κάθε στάδιο της προσπέρασης. Ξεχωριστές τιμές υπολογίστηκαν για τους διάφορους συνδυασμούς επιβατικού και βαρέως οχήματος, ως όχημα που προσπερνάει και που προσπερνάται. Ο χρόνος κίνησης στην αντίθετη λωρίδα προέκυψε κατά μέσο όρο 10s και 11.5s για την επιταχυνόμενη προσπέραση από όχημα,

ενός οχήματος και ενός φορτηγού αντίστοιχα. Παράλληλα το αντίστοιχο απαιτούμενο μήκος προσπέρασης προέκυψε για όλες τις περιπτώσεις ίσο με 253m (γενικός μέσος όρος). Οι ερευνητές εξήγαγαν λεπτομερή αποτελέσματα και για τα επιμέρους χρονικά και χωρικά διαστήματα και μελέτησαν εξίσου τις ταχύτητες των οχημάτων που συμμετείχαν στη διαδικασία. Βρίσκονταν, επομένως, σε θέση να συγκρίνουν τα αποτελέσματά τους με το υπάρχον μοντέλο προσπέρασης του AASHTO.

Η σύγκριση αυτή, εμφάνισε ορισμένα ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Οι αποστάσεις ορατότητας του μοντέλου AASHTO στη γενική περίπτωση είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές που βρήκαν οι ερευνητές και άρα η θεώρηση είναι υπέρ της ασφαλείας. Εντούτοις, το μοντέλο αυτό κρίθηκε ανεπαρκές, στην περίπτωση που ένα επιβατικό όχημα προσπερνάει ένα φορτηγό. Από τις καταγραφές προέκυψε, πως σε σχέση με το μοντέλο AASHTO, οι οδηγοί λάμβαναν γρηγορότερα την απόφαση να εκτελέσουν προσπέραση (χρόνος αντίδρασης), ενώ τα οχήματα καταλάμβαναν την αριστερή λωρίδα για περισσότερο χρόνο. Επιπλέον, ο χρόνος που μεσολαβούσε από την ολοκλήρωση του ελιγμού έως τη συνάντηση με το αντίθετα ερχόμενο όχημα (χρόνος ασφαλείας), προέκυψε μικρότερος στις καταγραφές. Όσον αφορά στη διαφορά των ταχυτήτων των δύο παράλληλα κινούμενων οχημάτων, αυτή βρέθηκε να μεταβάλλεται όσο το όχημα που προσπερνάει κινούνταν στην αντίθετη λωρίδα. Η γενική εικόνα ήταν, πως η διαφορά αυτή μειώνεται, όσο η ταχύτητα κίνησης των δύο οχημάτων αυξάνεται. Σχετικά με το χρόνο αντίδρασης και το χρόνο ασφαλείας, δε διαπιστώθηκε πως αυτοί είναι ευαίσθητοι στις ταχύτητες κίνησης, εύρημα που έρχεται σε ευθεία αντιδιαστολή με τις παραδοχές του μοντέλου AASHTO. Στο τελευταίο γίνεται η υπόθεση, πως η ταχύτητα του οχήματος που προσπερνάει είναι σταθερή, όσο αυτό κινείται στην αριστερή λωρίδα. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη μελέτη βρέθηκε, πως το όχημα που προσπερνάει δεν επιταχύνει σχεδόν καθόλου, πριν την είσοδό του στην αριστερή λωρίδα. Τέλος, η ταχύτητα του οχήματος που προσπερνάει και το μήκος προσπέρασης βρέθηκαν να είναι σε μεγάλο βαθμό συσχετισμένα. Στο μοντέλο AASHTO, αντίθετα, γίνεται η υπόθεση, πως το μήκος προσπέρασης συσχετίζεται με την ταχύτητα του οχήματος που προσπερνάται.

Δύο σημαντικά ευρήματα της μελέτης αυτής, ήταν μοναδικά από άποψη οδικής ασφαλείας. Συγκεκριμένα, ο πολύ μικρός χρόνος αντίδρασης, που εμφάνιζαν οι οδηγοί και το πολύ μικρό διάμηκες κενό μεταξύ των δύο παράλληλα κινούμενων οχημάτων στην αρχή της προσπέρασης. Το μοντέλο AASHTO κρίθηκε γενικά ικανοποιητικό ως προς τον καθορισμό αποστάσεων ορατότητας για προσπέραση επιβατικού από επιβατικό όχημα, σε επαρχιακές οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Εντούτοις, περίπου στις μισές προσπεράσεις του πειράματος, τουλάχιστον ένα φορτηγό προσπεράστηκε από επιβατικό όχημα. Για τον ελιγμό αυτόν, ίσως οι αποστάσεις που παρέχονται από τα μοντέλα να μην επαρκούν για μια ασφαλή προσπέραση. Για το λόγο αυτό, προτάθηκε η αναθεώρηση του υπάρχοντος μοντέλου, ώστε να συμπεριληφθεί και το εν λόγω οδηγικό σενάριο. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσα από τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων προσπεράσεων, στις οποίες θα συμμετέχουν φορτηγά οχήματα. Η διερεύνηση του θέματος αυτού συστήθηκε εμφατικά από τους ερευνητές. Τέλος, μια άλλη πρόταση για περαιτέρω έρευνα ήταν η αξιολόγηση των παραμέτρων ασφαλείας κατά την προσπέραση και η συγκρότηση συστάσεων για τις ταχύτητες κίνησης.



### 2.1.5 Καταγραφή ελιγμών αλλαγής λωρίδας από όχημα εξοπλισμένο με DGPS

Οι Xuan & Coifman (2006, September) επιχείρησαν τον εντοπισμό των ελιγμών αλλαγής λωρίδας που εκτελούσε ένα όχημα καθώς κινούνταν σε μια οδό. Το όχημα ήταν εξοπλισμένο με ένα DGPS, με το οποίο καταγραφόταν η τροχιά του. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η μέθοδος για τον εντοπισμό των ελιγμών μπορούσε να κινηθεί σε δύο κατευθύνσεις. Η μια απαιτούσε την καταγραφή ικανού αριθμού τροχιών σε ένα οδικό τμήμα, ώστε να βρεθεί η αντιπροσωπευτική τροχιά αναφοράς. Μέσω αυτής, εντοπιζόνταν οι τοποθεσίες των λωρίδων κυκλοφορίας για το εν λόγω οδικό τμήμα και κατόπιν αναγνωριζόταν εύκολα η στιγμή, στην οποία το όχημα απέκλινε από τη δική του και εκτελούσε αλλαγή λωρίδας. Η δεύτερη κατεύθυνση προϋπέθετε την ύπαρξη χαρτών με επαρκή ακρίβεια, ώστε να μπορεί να εξαχθεί η ακριβής θέση των λωρίδων κυκλοφορίας. Ο εν λόγω ελιγμός, στην περίπτωση αυτή, εντοπιζόταν εύκολα από μία και μόνο διέλευση του οχήματος. Σε κάθε περίπτωση, το DGPS έπρεπε να διαθέτει μεγάλη ακρίβεια εντοπισμού θέσης. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μόνο η πρώτη μέθοδος.

Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των τροχιών ήταν εξοπλισμένο με ένα δέκτη DGPS και έναν καταγραφέα δεδομένων. Για εποπτεία και επιπλέον έλεγχο, στο εσωτερικό του ανεμοθώρακα ήταν τοποθετημένη μια κάμερα, με το φακό προσανατολισμένο προς την κατεύθυνση κίνησης του οχήματος. Και οι δύο συσκευές ήταν χρονισμένες στο 1Hz. Η συλλογή των δεδομένων έλαβε χώρα στα περίχωρα του Columbus, στο Ohio των ΗΠΑ, σε μια κυκλική διαδρομή 24km, η οποία αποτελείται από τους αυτοκινητοδρόμους SR-315, I-70 και I-71. Το DGPS ήταν μαγνητικά αγκιστρωμένο στην οροφή του οχήματος και σύμφωνα με τους ερευνητές διέθετε ακρίβεια στίγματος μικρότερη από 2m, στο 95% των περιπτώσεων. Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε για τις καταγραφές και τα όργανα με τα οποία ήταν εφοδιασμένο απεικονίζονται στην *Εικόνα 2.3*.



*Εικόνα 2.3 Το όχημα καταγραφής με τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα (Xuan & Coifman, 2006, September).*

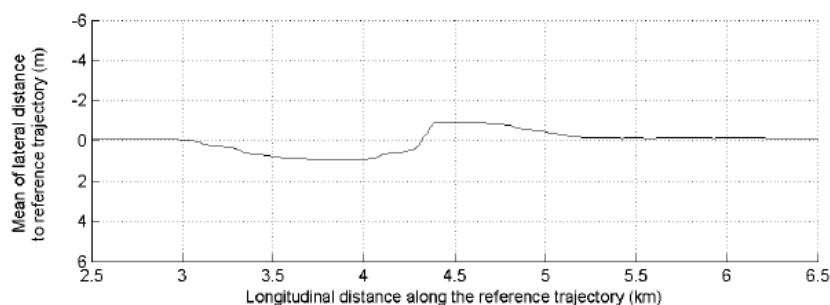
Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 23 “επισκέψεις” στην εν λόγω διαδρομή του πειράματος, κατά το διάστημα 29 Ιουνίου έως 30 Νοεμβρίου 2005 και κάθε φορά ολοκληρώνονταν δύο γύροι. Επομένως, ήταν διαθέσιμες 46 δειγματικές τροχιές για περαιτέρω ανάλυση. Στην πλειοψηφία των επισκέψεων, ο ουρανός ήταν καθαρός ή συννεφιασμένος και μόνο σε δύο από αυτές έβρεχε. Το DGPS μετρούσε για κάθε δευτερόλεπτο το

χρόνο (s που παρήλθαν από τα μεσάνυχτα), το γεωγραφικό πλάτος και μήκος (deg), την ταχύτητα (m/s), τον προσανατολισμό του οχήματος (radians), την κατάσταση λειτουργίας του δέκτη (differential status) και το υψόμετρο (m). Η τροχιά του οχήματος, συνεπώς, δεν ήταν άλλο από μια χρονοσειρά στιγμάτων.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε αστικό περιβάλλον και η διαδρομή διέσχιζε αρκετές άνω και υπόγειες (μία από αυτές έχει μήκος 100m) διαβάσεις. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να εξασθενεί ή ακόμα και να παρεμποδίζεται εντελώς το δορυφορικό σήμα που λαμβάνει ο δέκτης DGPS. Επιπλέον, σε οδικά τμήματα που διέρχονταν ανάμεσα από υψηλά κτίρια σχηματιζόνταν τα επονομαζόμενα “αστικά φαράγγια” (urban canyons) και εμφανιζόνταν έντονα το πρόβλημα της πολλαπλής διαδρομής σήματος (signal multipath). Στην περίπτωση αυτή, το ίδιο σήμα ανακλάται στις πολλές επιφάνειες που περιτριγυρίζουν το δέκτη (για παράδειγμα προσόψεις υψηλών κτιρίων) και φτάνει σε αυτόν παραπάνω από μία φορές, με χρονοκαθυστέρηση. Ως εκ τούτου, η συσκευή αδυνατεί να διαχωρίσει το “πραγματικό” από το “παρελθοντικό” σήμα και τελικά αυξάνεται το σφάλμα στις μετρήσεις. Όλα τα παραπάνω δημιούργησαν “θόρυβο” στα δεδομένα που καταγράφηκαν, ο οποίος είχε τη μορφή μικρών “δοντιών” στις καμπύλες των τροχιών. Ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει σαφής διάκριση μεταξύ των αποκλίσεων που οφείλονταν στο θόρυβο των μετρήσεων και των αποκλίσεων που οφείλονται στις πραγματικές αλλαγές πορείας από το όχημα.

Για την ανάλυση των δεδομένων, αρχικά τοποθετήθηκε αυθαίρετα ένα κινούμενο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο κάθε χρονική στιγμή ήταν παράλληλο σε μια (οποιαδήποτε) από τις τροχιές. Κατόπιν, καθορίστηκε η τροχιά αναφοράς για όλο το μήκος του οδικού άξονα, ως η διάμεσος (median) της εγκάρσιας απόστασης των τροχιών. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τη διάμεσο και όχι την αριθμητική μέση τιμή, επειδή η πρώτη είναι λιγότερο ευαίσθητη στις έκτοπες τιμές (outliers) των δεδομένων του δείγματος. Ο μεγάλος αριθμός τροχιών που είχαν συλλεχθεί μείωνε σημαντικά την επίδραση των προαιρετικών αλλαγών λωρίδας (DLC) και των μεταβατικών (transient) σφαλμάτων του DGPS στον καθορισμό της τροχιάς αναφοράς.

Οι ερευνητές διέκριναν τις αλλαγές λωρίδας σε υποχρεωτικές (MLC) και προαιρετικές (DLC) και εντόπισαν τον κάθε τύπο ελιγμού μέσα στα δεδομένα που είχαν καταγραφεί. Στο δείγμα των τροχιών φάνηκε, πως οι MLC δεν πραγματοποιούνταν ακριβώς στην ίδια χιλιομετρική θέση, αλλά ήταν κατανεμημένες σε ένα εύρος διαμήκων συντεταγμένων. Πρώτα παρατηρούνταν μία MLC, όσο αυξανόταν η χιλιομετρική θέση παρατηρούνταν όλο και περισσότερες και τελικά το σύνολο των ελιγμών ολοκληρωνόταν με την πραγματοποίηση της τελευταίας αλλαγής λωρίδας, λίγα μέτρα προς τα κατάντη της οδού. Η χρήση της διαμέσου, επομένως, σε αυτό το διάστημα δεν θα ήταν καλή πρακτική, καθώς θα αλλοιωνόταν η τροχιά αναφοράς. Αντίθετα, με τη χρήση της μέσης τιμής στο διάστημα αυτό, η τροχιά αναφοράς μεταβαλλόταν ομαλά. Συνεπώς, μια MLC πραγματοποιούνταν στο σημείο που εμφανιζόταν μεγάλη αλγεβρική διαφορά μεταξύ της διαμέσου και της αριθμητικής μέσης τιμής. Η μορφή της μέσης τιμής της εγκάρσιας απόστασης των τροχιών, σε συνάρτηση με την απόσταση που διανύει το όχημα, φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Εκεί που το όχημα άλλαζε λωρίδα εμφανίζεται ένας “παλμός” ομόρροπος με την κατεύθυνση προς την οποία αυτό κινούνταν, ακολουθούμενος από έναν παλμό αντίρροπο προς αυτήν. Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται καθαρά, πως το όχημα εκτέλεσε MLC προς τα δεξιά περίπου στο 4.3km.



**Σχήμα 2. 13** Η μέση τιμή της εγκάρσιας απόστασης των τροχιών από την τροχιά αναφοράς ως συνάρτηση του μήκους της τελευταίας (Xuan & Coifman, 2006, September).

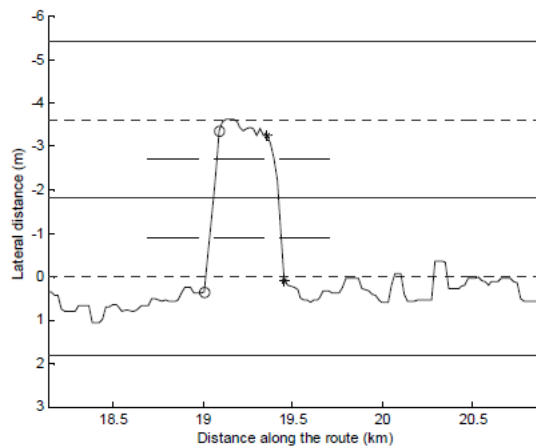
Στο δείγμα της παρούσας μελέτης, όλες οι DLC αποτέλεσαν μέρος κάποιου ελιγμού προσπέρασης. Εξάλλου, κάθε προσπέραση αποτελείται από μία αλλαγή λωρίδας, μια ευθύγραμμη πορεία και ακόμη μία αλλαγή λωρίδας. Σε πρώτη φάση, οι ερευνητές εντόπισαν τις προσπεράσεις μέσα στον όγκο των καταγραφών. Σε δεύτερη φάση, από κάθε ελιγμό προσπέρασης απομόνωσαν χωριστά τις δύο αλλαγές λωρίδας. Δεδομένου πως η προσπέραση περιλαμβάνει και μια ευθύγραμμη κίνηση στην αριστερή λωρίδα, για ένα χρονικό διάστημα η τροχιά εμφανιζόταν μετατοπισμένη παράλληλα προς την τροχιά αναφοράς, κατά απόσταση ίση με ένα πλάτος λωρίδας (3.6m). Τέθηκαν, λοιπόν, όρια στα 1.8m εκατέρωθεν της τροχιάς αναφοράς και αναζητήθηκαν τα δύο σημεία εκείνα, στα οποία τα όρια τέμνονταν από την τροχιά του οχήματος.

Για να αποκλειστεί το ενδεχόμενο, αυτό να συμβεί εξαιτίας του θορύβου των μετρήσεων, το διάγραμμα της εγκάρσιας απόστασης της εξεταζόμενης τροχιάς, από την τροχιά αναφοράς, φιλτραρίστηκε με τη μέθοδο της κινουμένης διαμέσου (moving median). Η επιτυχία αυτής της μεθόδου έγκειται, στο ότι τα σφάλματα των μετρήσεων δεν έχουν παρά ελάχιστη διάρκεια. Αντίθετα, μια προσπέραση διαρκεί σημαντικά περισσότερο χρόνο. Στη συνέχεια, εξήχθη το τμήμα της τροχιάς που βρισκόταν εντός των δύο προαναφερθέντων σημείων τομής. Συνεπώς, υπολογίστηκε εύκολα ο χρόνος και η απόσταση που διανύει το όχημα στη διπλανή λωρίδα.

Η κάμερα που βρισκόταν εντός του οχήματος χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση ότι τα παραπάνω σημεία ενδιαφέροντος είχαν ορθώς χαρακτηριστεί ως προσπεράσεις. Ήταν πλέον σαφές, κατά πόσο αυτά τα σημεία αποτελούσαν ή όχι σφάλματα μέτρησης του οργάνου. Εναλλακτικά, για τον αποκλεισμό των ψευδώς θετικών προσπεράσεων θεσπίστηκε ένα ελάχιστο όριο για το χρόνο (10s) ή την απόσταση κίνησης (300m) στην αντίθετη λωρίδα. Παρόλα αυτά, οι ερευνητές προειδοποίησαν, πως η αλγοριθμική αυτή μέθοδος ενδεχομένως να θεωρούσε λανθασμένα, πως το όχημα εκτελεί αλλαγή λωρίδας. Για να συμβεί αυτό, μια απώλεια σήματος από τους δορυφόρους, για ικανό αριθμό δευτερολέπτων, θα έπρεπε να συμβεί ταυτόχρονα με μια καμπύλωση της οριζοντιογραφίας της οδού.

Για να απομονωθεί η εκάστοτε DLC από τη συνολική τροχιά, θεωρήθηκαν το διάγραμμα θέσης του οχήματος και το διάγραμμα της εγκάρσιας ταχύτητας. Έγινε η παραδοχή, πως το σημείο εκκίνησης της αλλαγής λωρίδας βρίσκεται εντός 0.9m (ένα τέταρτο του πλάτους μιας λωρίδας) από την τροχιά αναφοράς, προς την πλευρά που πραγματοποιείται η αλλαγή αυτή. Αντίστοιχα, πως το σημείο που ολοκληρώνεται ο ελιγμός βρίσκεται εντός 2.7m (τρία τέταρτα του πλάτους μιας λωρίδας) από την τροχιά αναφοράς. Ως αλλαγή λωρίδας ορίστηκε το τμήμα εκείνο της τροχιάς, στο οποίο ο

ρυθμός μεταβολής της εγκάρσιας μετατόπισης ήταν τουλάχιστον ίσος με 0.3m/s. Τα παραπάνω απεικονίζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.14.



*Σχήμα 2.14 Η τροχιά ενός οχήματος που προσπερνάει και τα σημεία αρχής και τέλους των δύο DLC (Xuan & Coifman, 2006, September).*

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι περισσότερες προσπεράσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Συνεπώς ήταν πιθανό, το κινηματικό κριτήριο που θεσπίστηκε παραπάνω να μην είναι κατάλληλο όταν επικρατούν πιο επιβαρυνμένες κυκλοφοριακές συνθήκες. Για τον ίδιο λόγο, η σχέση της απόστασης που διανύεται κατά την προσπέραση και του χρόνου που αυτή διαρκεί, φαίνεται πως περιγράφεται πολύ καλά από μια ευθεία. Η κλίση της ευθείας αυτής ήταν 28.6m/s, τιμή που αποτελούσε και τη μέση ταχύτητα όλων των προσπεράσεων του δείγματος.

Η μέθοδος που προτάθηκε στη μελέτη αυτή έχει περιορισμούς, με την έννοια ότι εντοπίζονταν μόνο οι αλλαγές λωρίδας εκείνες, τις οποίες εκτελούσε το όχημα με το DGPS. Για να εξαχθούν οι ελιγμοί που πραγματοποιούσαν περισσότερα οχήματα, απαιτούνταν το όχημα καταγραφής να εφοδιαστεί με επιπρόσθετο εξοπλισμό, όπως LiDAR. Με τον τρόπο αυτό, θα καταγραφόταν και η θέση των γύρω οχημάτων. Εντούτοις, μια ομάδα οχημάτων εξοπλισμένων με GPS, τα οποία θα λειτουργούσαν συνεργατικά, θα μπορούσε να δημιουργήσει τροχιές αναφοράς για όλες τις λωρίδες κυκλοφορίας μιας οδού. Μια τέτοια εφαρμογή έχει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς θα εξαλειφόταν η ανάγκη για ψηφιακά υπόβαθρα GIS. Επιπλέον, ένα όχημα που θα διερχόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα από τις οδούς και θα δημιουργούσε τροχιές αναφοράς, θα μπορούσε να ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο άλλους χρήστες για τυχόν τροποποιήσεις στην οδική χάραξη. Αυτό θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο σε οδικά τμήματα υπό κατασκευή ή συντήρηση.

### 2.1.6 Καταγραφή προσπεράσεων με τη χρήση Traffic Engineering Logger

Οι Polus & Tomecki (1987) χρησιμοποίησαν δεδομένα από ένα οδικό πείραμα, για την ανάλυση της προσπέρασης και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο προσπεράσεων AASHTO. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο ευθύγραμμα και χωρίς κλίση οδικά τμήματα, μιας επαρχιακής οδού δύο λωρίδων κυκλοφορίας, κοντά στην Πρετόρια, στη Νότιο Αφρική. Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι ήταν

χαμηλοί (100 και 200οχ./ώρα αντίστοιχα) και περίπου το 20% των οχημάτων ήταν φορτηγά. Τα οδικά τμήματα προσέφεραν πρακτικά απεριόριστη ορατότητα για προσπέραση.

Το σενάριο του πειράματος περιλάμβανε δύο οχήματα, τα οποία οδηγούσαν ταυτόχρονα. Το προπορευόμενο όχημα, το οποίο κινούνταν με σταθερή ταχύτητα 60, 70, 80 ή 90km/h προσπερνούσαν από το δεύτερο όχημα, ο οδηγός του οποίου είχε την ελευθερία να εκτελέσει τον ελιγμό με τρόπο που να προσομοιάζει στη δική του αυθόρμητη οδηγική συμπεριφορά. Προφανώς, η ταχύτητα κίνησης δεν υπερέβαινε σε καμία περίπτωση το όριο ταχύτητας του εκάστοτε οδικού τμήματος. Τα δύο οχήματα ήταν εξοπλισμένα με ένα σύστημα απόκτησης και καταγραφής δεδομένων πολλών χρήσεων, το οποίο καλούνταν Traffic Engineering Logger (TEL). Το σύστημα αυτό δημιουργούσε υψηλής ακρίβειας, συγχρονισμένα διαγράμματα χρόνου και απόστασης για τα δύο οχήματα που συμμετείχαν στο πείραμα. Συνεπώς, αναλύονταν οι τροχιές και οι ταχύτητες των δύο οχημάτων για κάθε χρονική στιγμή.

Στο κάθε όχημα βρίσκονταν δύο άτομα, ο οδηγός και ο χειριστής του TEL. Πριν την έναρξη του πειράματος τα δύο όργανα συνδέθηκαν μεταξύ τους, συγχρονίστηκαν και ρυθμίστηκαν κατάλληλα, ώστε να δίνουν ακριβείς μετρήσεις για το χρόνο, την απόσταση και την ταχύτητα. Τα συγκεκριμένα όργανα, επιπλέον, είχαν τη δυνατότητα να δέχονται από το χειριστή καταγραφές γεγονότων. Κατόπιν, ο σύνδεσμος απομακρύνθηκε και τοποθετήθηκε από ένα TEL σε κάθε όχημα. Όταν ενεργοποιούνταν το σύστημα, οι μορφοτροπείς σαρώνονταν και τα ερεθίσματα που λαμβάνονταν απαριθμούνταν και αποθηκεύονταν στη μνήμη. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, καταγράφονταν δεδομένα με συχνότητα 8Hz.

Η δυνατότητα των συσκευών για χειροκίνητη εισαγωγή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο πείραμα, με τους χειριστές να καταγράφουν διάφορα γεγονότα. Πέντε από αυτά αφορούσαν στο όχημα που προσπερνούσε, εισάγονταν στη συσκευή από το χειριστή TEL που βρισκόταν στο όχημα αυτό και εντοπιζόνταν κατά τη διάρκεια του ελιγμού της προσπέρασης. Το πρώτο γεγονός ήταν όταν διερχόταν το τελευταίο αντίθετα κινούμενο όχημα και ο ελιγμός της προσπέρασης ήταν έτοιμος να ξεκινήσει. Το δεύτερο ήταν όταν το όχημα διερχόταν πάνω από την κεντρική λωρίδα του οδοστρώματος, ώστε να εισέλθει στο αντίθετο ρεύμα. Το τρίτο γεγονός ήταν όταν ο πίσω προφυλακτήρας του οχήματος που προσπερνάει βρισκόταν στο ίδιο ύψος με το μπροστινό προφυλακτήρα του οχήματος που προσπερνάται. Το τέταρτο γεγονός συνέβαινε, όταν το όχημα επέστρεφε ολόκληρο πίσω στην αρχική του λωρίδα και σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του ελιγμού της προσπέρασης. Τέλος, το πέμπτο γεγονός εντοπιζόταν, όταν το όχημα διασταυρωνόταν με το επόμενο αντίθετα κινούμενο όχημα. Παράλληλα, ο χειριστής στο όχημα που προσπερνούσαν ενεργοποιούσε τον καταγραφέα γεγονότων κάθε φορά που αυτό διασταυρωνόταν με οχήματα που κινούνταν στο αντίθετο ρεύμα. Αργότερα, αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ακριβή ανάλυση των αποστάσεων ανάμεσα στα οχήματα.

Ύστερα και από το συγχρονισμό μεταξύ τους, οι δύο συσκευές TEL κατέγραφαν δεδομένα με ακρίβεια κλάσματος του δευτερολέπτου για το χρόνο και ενός μέτρου για την απόσταση. Επειδή, όμως, ο ακριβής χρόνος που συνέβαινε ένα γεγονός επαφίονταν στην υποκειμενική κρίση του χειριστή, στη διαδικασία υπεισερχόταν ένα επιπρόσθετο

σφάλμα. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν τους ίδιους δύο χειριστές TEL σε όλη τη διάρκεια του οδικού πειράματος. Αντίθετα, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην οδηγική συμπεριφορά, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν συνολικά οκτώ οδηγοί, ένας για κάθε ημέρα του πειράματος. Αυτοί οδηγούσαν αποκλειστικά το όχημα που προσπερνούσε, αφού το όχημα που προσπερνούταν δεν είχε μεγάλη ελευθερία κινήσεων. Ο καθένας τους εκτελούσε προσπεράσεις σε όλες τις προκαθορισμένες ταχύτητες. Επτά από τους οκτώ οδηγούς ήταν άνδρες, ενώ όλοι τους οδηγούσαν ήδη για τουλάχιστον τρία χρόνια. Συνολικά καταγράφηκαν 320 ελιγμοί προσπέρασης, 40 από τον εκάστοτε οδηγό και 10 σε κάθε μία από τις τέσσερις προκαθορισμένες ταχύτητες (60, 70, 80 και 90km/h). Το πείραμα έλαβε χώρα σε οκτώ διαδοχικές ημέρες, ενώ ο καιρός ήταν καθαρός και ξηρός.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Οι προσπεράσεις κατηγοριοποιήθηκαν σε επιταχυνόμενες και ιπτάμενες. Μια προσπέραση θεωρήθηκε επιταχυνόμενη, εάν η διαφορά των ταχυτήτων των δύο οχημάτων, στην εκκίνηση της προσπέρασης, ήταν μικρότερη από 10km/h. Σε αντίθετη περίπτωση, η προσπέραση ενέπιπτε στη δεύτερη κατηγορία. Τα ευρήματα της ανάλυσης συγκρίθηκαν με τις τιμές που προτείνονται στο μοντέλο προσπέρασης AASHTO. Οι ερευνητές κατέληξαν, πως οι τελευταίες είναι ίσως λίγο συντηρητικές, αλλά σε κάθε περίπτωση αναγνώρισαν, πως η διαδικασία της προσπέρασης θα έπρεπε να μελετηθεί εκτενέστερα.

### 2.1.7 Άλλοι τρόποι καταγραφής προσπεράσεων

Η αλματώδης πρόοδος της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει σαν αποτέλεσμα να βελτιωθεί αισθητά η φορητότητα των συσκευών βιντεοσκόπησης. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα τα όργανα καταγραφής να τοποθετηθούν σε κάποια υπερσύγχρονη πλατφόρμα, η οποία να λειτουργεί με ένα ορισμένο βαθμό αυτοματοποίησης. Αυτά έχουν ως συνέπεια την κατακόρυφη αύξηση της αποδοτικότητας των πειραμάτων πεδίου.

#### 2.1.7.1 Βιντεοσκόπηση από το όχημα που προσπερνάται

Οι Carlson et al. (2006) πραγματοποίησαν ένα οδικό πείραμα, στο οποίο καταγράφηκαν ελιγμοί προσπέρασης σε ένα ευθύγραμμο και επίπεδο τμήμα 24km, σε μια επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας στο Τέξας των ΗΠΑ. Οι ερευνητές εξόπλισαν το όχημά τους με ένα σύστημα βιντεοσκόπησης και οδηγούσαν συνεχώς στη διαδρομή με σταθερή ταχύτητα 89, 97 και 105km/h (55, 60 και 65mph), εκτελώντας γύρους. Επειδή η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα στο εν λόγω οδικό τμήμα ήταν 113km/h (70mph), οι υπόλοιποι χρήστες της οδού έμμεσα ενθαρρύνονταν να προσπεράσουν το όχημα καταγραφής. Συνολικά τοποθετήθηκαν τρεις κάμερες στην οροφή του οχήματος, οι οποίες ήταν καμουφλαρισμένες, ώστε να μην είναι ορατές στους υπόλοιπους χρήστες της οδού και έτσι αυτοί να μη μεταβάλλουν την οδηγική τους συμπεριφορά. Επιπλέον, μια κάμερα ήταν τοποθετημένη στο εσωτερικό του οχήματος και κατέγραφε τις ενδείξεις του οργάνου μέτρησης της απόστασης. Το οπτικό πεδίο των καμερών περιλάμβανε το χώρο πίσω, αριστερά και μπροστά από το όχημα καταγραφής, όπως απεικονίζεται στην *Ei-*

κόνα 2.4. Το πείραμα διήρκησε περίπου 18 ώρες, οι οποίες μοιράστηκαν σε τρεις ημέρες μετρήσεων. Έπειτα από τον αποκλεισμό των ακατάλληλων ελιγμών, το στατιστικό δείγμα περιλάμβανε 105 μονές προσπεράσεις.



*Εικόνα 2.4* Το όχημα καταγραφής με τις κάμερες τοποθετημένες μέσα στην ειδική βαλίτσα οροφής (αριστερά) και το οπτικό τους πεδίο (δεξιά) (Carlson et al., 2006).

Χρησιμοποιώντας τα βίντεο από τις κάμερες, οι ερευνητές εξήγαγαν το διάγραμμα της ταχύτητας του εκάστοτε οχήματος που προσπερνούσε, με ακρίβεια  $\pm 4\text{km/h}$ . Για την κάθε προσπέραση διερευνήθηκε η μέση ταχύτητα του οχήματος που προσπερνούσε και η απόσταση που αυτό διένυε, καθώς εκτελούσε τον ελιγμό. Διερευνήθηκαν, επίσης, η διαφορά ταχύτητας των δύο παράλληλα κινούμενων οχημάτων και η συνολική χρονική διάρκεια της προσπέρασης. Τα ευρήματα της μελέτης συγκρίθηκαν με τις παραδοχές και τα κριτήρια του μοντέλου προσπέρασης AASHTO.

#### 2.1.7.2 Βιντεοσκόπηση από drone

Οι Vettters & Jaehrig (2015, October) κατέγραψαν ελιγμούς προσπέρασης σε επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας, για την επικύρωση και τελικά την επικαιροποίηση του υπάρχοντος μοντέλου της απόστασης ορατότητας για προσπέραση. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα αερομεταφερόμενο σύστημα καταγραφής δεδομένων (drone), το οποίο αποτελούνταν από την αιωρούμενη πλατφόρμα αισθητήρων “HORUS” και ένα σύστημα βιντεοσκόπησης υψηλής ευκρίνειας. Η πλατφόρμα αυτή είχε τη δυνατότητα να προσεγγίζει αυτόματα, μέσω GPS, μια εκ των προτέρων προγραμματισμένη τοποθεσία και να παραμένει σε αυτή, με ακρίβεια λίγων μέτρων, ακίνητη για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι διαστάσεις της ήταν 1.0m x 1.3m και διέθετε οκτώ έλικες σε διάταξη “H”, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.5*.



*Εικόνα 2.5* Το drone HORUS που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των προσπεράσεων (Vettters & Jaehrig, 2015, October).

Οι ερευνητές επέλεξαν να εξετάσουν επτά οδικά τμήματα, με πλάτος οδοστρώματος 7.0-8.5m. Τα τμήματα αυτά, επιπλέον, διέθεταν ορατότητα για προσπέραση 400-1,000m και κυκλοφοριακό φόρτο (συνολικά και για τις δύο λωρίδες) 7,000-11,000οχ./ημέρα. Εξάλλου, αυτές οι δύο παράμετροι επιδρούν περισσότερο στη διαδικασία της προσπέρασης. Τα δεδομένα που καταγράφονταν αφορούν στο όχημα που προσπερνάει, το όχημα που προσπερνάται και το όχημα που κινείται αντίθετα, στην αριστερή λωρίδα. Ειδικότερα, περιλάμβαναν τον τύπο των τριών οχημάτων, τις αποστάσεις που αυτά διανύουν και τις ταχύτητές τους σε όλη τη διάρκεια της προσπέρασης, καθώς και την απόσταση ορατότητας στην αρχή του ελιγμού. Επιπλέον, καταγράφονταν οι αποστάσεις που έχουν τα οχήματα μεταξύ τους στην αρχή και το τέλος του ελιγμού, καθώς και ο κυκλοφοριακός φόρτος συνολικά και για τις δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Τελικά, καταγράφηκαν 1,158 ελιγμοί προσπέρασης, κατά τη διάρκεια σχεδόν 90 ωρών πτήσεως.

## 2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

Η μεγάλη πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στον τομέα της προσομοίωσης έχει οδηγήσει στην κατασκευή προσομοιωτών οδήγησης, οι οποίοι αναπαριστούν πολύ ρεαλιστικά τις συνθήκες οδήγησης. Τις περισσότερες φορές, οι προσομοιωτές αποτελούν μια οικονομική εναλλακτική στα πειράματα πεδίου, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται, πως ο χρήστης βρίσκεται σε προστατευμένο και ασφαλές περιβάλλον κάθε στιγμή. Ως εκ τούτου, οι προσομοιωτές χρησιμοποιούνται ευρέως στη μελέτη κάθε πτυχής της οδηγικής συμπεριφοράς. Φυσικά, ο ελιγμός της προσπέρασης δεν θα μπορούσε να αποτελεί εξαίρεση και στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται κάποιες απόπειρες διερεύνησής του.

### 2.2.1 Συνδυασμένη μάθηση της οδηγικής συμπεριφοράς κατά την προσπέραση

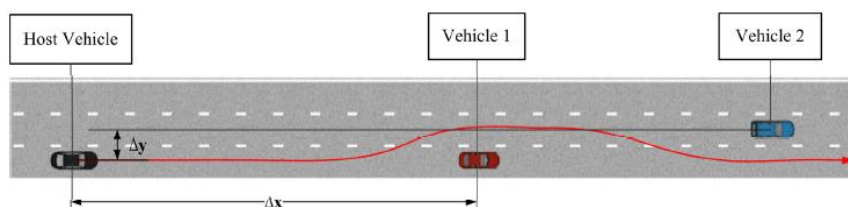
Οι Lu et al. (2018) ανέπτυξαν ένα πλαίσιο μηχανικής μάθησης, το οποίο μπορεί να προσαρμόζεται στη συμπεριφορά συγκεκριμένων οδηγών κατά την προσπέραση. Το πλαίσιο αυτό συνδύασε το General Regression Neural Network (GNRR), ένα στοιχείο που εκπαιδεύεται εκτός δικτύου με το Natural Actor Critic (NAC), το οποίο εκτελείται σε σύνδεση με το διαδίκτυο. Διενεργήθηκε, επίσης, ένα πείραμα σε προσομοιωτή, για τη συλλογή πραγματικών δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του πλαισίου μάθησης.

Η διαφοροποίηση σε σχέση με προγενέστερες έρευνες έγκειτο, στο ότι η προσαρμογή του πλαισίου αυτού πραγματοποιούνταν τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια συνιστώσα της κίνησης του οχήματος. Επιπλέον, η διασύνδεση σε πραγματικό χρόνο επέτρεψε στο μοντέλο να εκπαιδευτεί και πάνω σε οδηγικές συμπεριφορές, οι οποίες δεν ήταν εκ των προτέρων ενταγμένες στη βάση δεδομένων. Μπορούσε, επομένως, να πραγματοποιηθεί εκπαίδευση πάνω στα χαρακτηριστικά ενός καινούριου οδηγού, όσο ο τελευταίος κινούνταν με το όχημά του.



Για να ολοκληρωθεί ένας τυπικός ελιγμός προσπέρασης, ο οδηγός εκτελεί δύο αλλαγές λωρίδας, ενώ παράλληλα αυξάνει απότομα την ταχύτητα κίνησης και στρίβει το τιμόνι. Συνεπώς, οδηγική συμπεριφορά κατά την προσπέραση αντανακλάται από την ταχύτητα, η οποία σχετίζεται με το διαμήκη έλεγχο του οχήματος και τη γωνία στροφής των τροχών, η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με τον εγκάρσιο έλεγχο αυτού. Αυτές οι δύο παράμετροι αποτέλεσαν και τα δεδομένα εξόδου του συστήματος μάθησης που αναπτύχθηκε.

Το πείραμα περιλάμβανε την προσομοίωση ενός οδικού τμήματος τριών λωρίδων κυκλοφορίας, σε αστικό περιβάλλον, στο οποίο κινούνταν τρία οχήματα. Ο εκάστοτε εθελοντής οδηγός χειριζόταν το ένα όχημα, ενώ η κίνηση των άλλων δύο προέκυπτε από το λογισμικό της προσομοίωσης. Ο χρήστης κάθε φορά καλούνταν να προσπεράσει ένα από τα άλλα δύο οχήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Οι αρχικές θέσεις των οχημάτων ήταν ίδιες σε κάθε επεισόδιο της προσομοίωσης, το οποίο τελείωνε με την ολοκλήρωση του ελιγμού της προσπέρασης.



Σχήμα 2.15 Το οδικό τμήμα της προσομοίωσης και ένας τυπικός ελιγμός προσπέρασης (Lu et al., 2018).

Στο πείραμα εξετάστηκαν δύο σενάρια, κατά τα οποία οι ταχύτητες των δύο προσομοιωμένων οχημάτων ήταν συνεχώς σταθερές ή μεταβάλλονταν. Στο πρώτο σενάριο, αυτά τα δύο οχήματα απείχαν μεταξύ τους 35m και κινούνταν με 36km/h (χαμηλή ταχύτητα), 54km/h (μέση ταχύτητα) ή 72km/h (υψηλή ταχύτητα). Η αρχική απόσταση μεταξύ του οχήματος που οδηγούσαν οι εθελοντές (Host Vehicle) και του οχήματος που προσπερνούνταν (Vehicle 1) καθορίστηκε στα 90m. Αντίστοιχα, το Host Vehicle ξεκινούσε από την ακινησία για την περίπτωση της χαμηλής και της μέσης ταχύτητας και από τα 72km/h για την περίπτωση της υψηλής ταχύτητας. Με βάση τα παραπάνω, δέκα εθελοντές με τουλάχιστον δύο χρόνια οδηγικής εμπειρίας συμμετείχαν στη διαδικασία συλλογής στοιχείων. Ο κάθε οδηγός επαναλάμβανε πέντε φορές τον ελιγμό της προσπέρασης, ώστε να διαμορφωθεί η απαιτούμενη βάση δεδομένων, πάνω στην οποία εκπαιδεύτηκε στη συνέχεια το GRNN.

Δύο ακόμη οδηγοί πραγματοποίησαν από πέντε προσπεράσεις ο καθένας, ώστε να εκπαιδευτεί το Combined Learning Framework (CLF) στην εξατομικευμένη οδηγική συμπεριφορά τους. Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν δύο επιπρόσθετες δοκιμαστικές προσπεράσεις χωρίς το λογισμικό να εκπαιδεύεται, ώστε να συλλεχθούν τα δεδομένα αξιολόγησης του αλγορίθμου. Με αυτό το στατιστικό δείγμα συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του GRNN, αλλά και του CLF ανεξάρτητα και συγκρίθηκαν οι αποκλίσεις των δύο μοντέλων από τις πραγματικές παρατηρήσεις. Εν τέλει βρέθηκε ποιο από τα δύο είχε καλύτερη απόδοση. Τα σφάλματα της μάθησης ποσοτικοποιούνταν κάθε φορά με τη βοήθεια του RMSE. Οι ερευνητές συμπέραναν, πως το GRNN μπορούσε να μάθει τη γενική οδηγική συμπεριφορά των οδηγών, αλλά αδυνατούσε να συλλέξει τα οδηγικά χαρακτηριστικά μεμονωμένων οδηγών. Αντίθετα, το CLF μπορούσε να προσαρμοστεί σε μεμονωμένους οδηγούς και να μάθει την οδηγική τους συμπεριφορά.

Στο δεύτερο σενάριο, οι κινήσεις των δύο προπορευόμενων οχημάτων προέκυπταν από ένα μοντέλο μικροσκοπικής κυκλοφοριακής προσομοίωσης. Συνεπώς, μπορούσαν να προσαρμόζονται τις ταχύτητές τους, ανάλογα με τις κινήσεις που πραγματοποιούσε το Host Vehicle και έτσι το οδηγικό σενάριο περιπλέχτηκε και έγινε πιο ρεαλιστικό. Αυτή τη φορά το GRNN δεν εκπαιδευόταν εκ νέου, αλλά χρησιμοποιήθηκε ως είχε, όπως είχε προκύψει από το σενάριο με τις σταθερές ταχύτητες κίνησης. Καθώς, όμως, το CLF εκπαιδευόταν και στο σενάριο με τις μεταβαλλόμενες ταχύτητες κίνησης, ήταν εμφανές πως διαθέτει μια πιο ευέλικτη δομή, περισσότερο κατάλληλη για την προσαρμογή στην οδηγική συμπεριφορά.

Συμπερασματικά, το CLF διατηρούσε ένα ελάχιστο σφάλμα μάθησης για όλους τους οδηγούς που εξετάζονταν, γεγονός που απέδειξε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στο να μαθαίνει τη διαμήκη και την εγκάρσια συμπεριφορά κατά την προσπέραση. Παρόλα αυτά, οι ερευνητές αναγνώρισαν, πως το προσομοιωμένο περιβάλλον δεν ήταν αρκετά ρεαλιστικό και στόχευσαν στο να δοκιμάσουν τη μέθοδό τους σε πειράματα πεδίου σε πραγματική οδό, με ρεαλιστικές κυκλοφοριακές συνθήκες.

### 2.2.2 Διερεύνηση της οδηγικής συμπεριφοράς κατά την προσπέραση

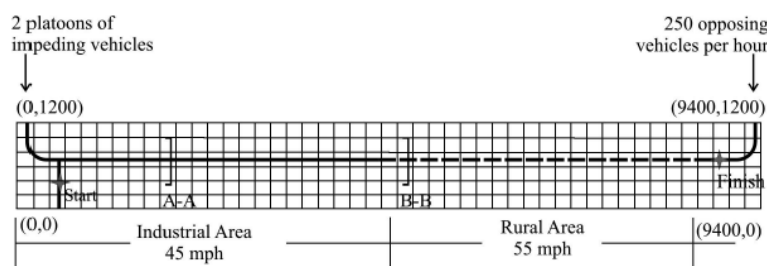
Οι Jenkins & Rilett (2004) εξέτασαν την καταλληλότητα μιας πρότυπης κατανεμημένης κυκλοφοριακής προσομοίωσης, για τη μελέτη της προσπέρασης σε επαρχιακές οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Το πρότυπο αυτό αναπτύχθηκε, για να συνδυάζει το πρόγραμμα μικροσκοπικής κυκλοφοριακής προσομοίωσης VISSIM με τον προσομοιωτή οδήγησης DriveSafety. Η ανάπτυξή του έγινε συγκεκριμένα για τη διερεύνηση της επίδρασης του μήκους και της ταχύτητας του προπορευόμενου οχήματος, στο μήκος και τη διάρκεια της προσπέρασης. Για το σκοπό αυτό, διενεργήθηκε ένα πείραμα στον προσομοιωτή οδήγησης, με τη βοήθεια εθελοντών οδηγών.

Συνολικά επιστρατεύτηκαν 14 άνδρες και 16 γυναίκες εθελοντές, μεταξύ 23 και 57 ετών, οι οποίοι διέθεταν τουλάχιστον πέντε χρόνια οδηγικής εμπειρίας. Όλοι οι συμμετέχοντες ανέφεραν πως αισθάνθηκαν συμπτώματα της “ασθένειας του προσομοιωτή” (simulator sickness), όπως καταπόνηση των ματιών, ναυτία, πονοκέφαλο και ζαλάδα. Μόνο ένας, όμως, από αυτούς ένιωσε μεγάλη δυσφορία και επέλεξε να μην ολοκληρώσει το γύρο του. Ο κάθε οδηγός πραγματοποιούσε ένα γύρο εξοικείωσης με το περιβάλλον της προσομοίωσης και τέσσερις γύρους για συλλογή δεδομένων. Το εικονικό οδικό τμήμα και το σενάριο της προσομοίωσης ήταν διαφορετικά στις δύο περιπτώσεις. Κατόπιν, συμπλήρωνε ένα ερωτηματολόγιο για τυχόν συμπτώματα που αισθάνθηκε κατά τη διάρκεια της οδήγησης.

Για την καταγραφή των δεδομένων, το οδικό τμήμα είχε μήκος πάνω από 10km, εκ των οποίων 4km διέρχονταν μέσα από μια βιομηχανική περιοχή, στην οποία το όριο ταχύτητας ήταν 72km/h και 4km διέρχονταν μέσα από μια επαρχιακή περιοχή, με όριο ταχύτητας 88km/h. Περίπου 7 λεπτά χρειαζόνταν για να διασχίσει κάποιος ολόκληρο το οδικό τμήμα. Το σενάριο, το οποίο εκτελούνταν από το πρότυπο πρόγραμμα, περιλάμβανε δύο φάλαγγες των τριών οχημάτων έκαστη, σε αλληλουχία όχημα-φορτηγό-όχημα. Τα οχήματα της πρώτης φάλαγγας κινούνταν περίπου 8km/h πιο αργά από το εκάστοτε όριο ταχύτητας, ενώ της δεύτερης περίπου 16km/h πιο αργά. Οι ταχύτητες

όλων των οχημάτων, εκτός από αυτό που οδηγούσαν οι εθελοντές, ελέγχονταν από το λογισμικό VISSIM.

Οι εθελοντές οδηγοί είχαν οδηγίες, να εισέλθουν στην οδό πίσω από ένα από τα οχήματα της φάλαγγας, το οποίο ήταν συγκεκριμένο κάθε φορά και διαφορετικό για τον καθέναν από αυτούς. Γενικά, το όχημα που ο κάθε οδηγός κλήθηκε να προσπεράσει μπορούσε να είναι επιβατικό ή φορτηγό και να κινείται αργά ή γρήγορα. Έπειτα, οι οδηγοί ακολουθούσαν με το εικονικό τους όχημα το εκάστοτε προπορευόμενο όχημα και όταν εντόπιζαν κάποιο κενό στην κυκλοφορία του αντίθετου ρεύματος και έκριναν πως επαρκούσε, επιτάχυναν και εκτελούσαν την προσπέραση. Οι προσπεράσεις έπρεπε να πραγματοποιηθούν με νόμιμες ενέργειες και με ασφάλεια, αποκλειστικά στην επαρχιακή περιοχή. Μόνο ένα όχημα έπρεπε να προσπερνάται κάθε φορά. Ο κυκλοφοριακός φόρτος της αριστερής λωρίδας ήταν 250οχ./ώρα, τα οποία κινούνταν με ταχύτητα περίπου ίση με το όριο ταχύτητας της οδού. Τα κενά μεταξύ των αντίθετα κινούμενων οχημάτων κυμαίνονταν μεταξύ 20 και 1,450m. Η μέγιστη ορατότητα για προσπέραση, ανάλογα και με την τοποθεσία μέσα στο προσομοιωμένο περιβάλλον, ήταν 500m. Μια σκαριφηματική κάτοψη της διαδρομής, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16 Η διαδρομή του πειράματος στον προσομοιωτή με το σημείο έναρξης κάτω αριστερά (Jenkins & Rilett, 2004).

Κατά την οδήγηση συλλέγονταν δεδομένα από το λογισμικό του προσομοιωτή οδήγησης και καταγράφονταν με συχνότητα 10Hz. Αυτά αφορούσαν στο όχημα του πειράματος και είναι για κάθε χρονική στιγμή οι συντεταγμένες, η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η απόστασή του από το προπορευόμενο όχημα, όπως επίσης και η ταχύτητα του τελευταίου. Η καταγραφή ξεκινούσε και σταματούσε αυτόματα, όταν το προπορευόμενο όχημα εισερχόταν και εξερχόταν αντίστοιχα από την επαρχιακή περιοχή. Ταυτόχρονα αναγνωριζόταν και ο τύπος του οχήματος. Ο προσομοιωτής είχε τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα μόνο από δύο οχήματα, επομένως, δεδομένα για τα υπόλοιπα οχήματα του σεναρίου αποκτούνταν προσεγγιστικά, με τη βοήθεια εικονικών κυκλοφοριακών φωρατών (location triggers) που ήταν τοποθετημένοι κάθε 1,000m.

Οι ερευνητές αναγνώρισαν δύο γεγονότα στην τροχιά του οχήματος που προσπερνούσε. Το πρώτο ήταν όταν ο μπροστά αριστερά τροχός διερχόταν πάνω από την κεντρική διαχωριστική γραμμή, ώστε το όχημα να εισέλθει στην αριστερή λωρίδα. Το δεύτερο γεγονός ήταν όταν ο πίσω αριστερά τροχός διερχόταν πάνω από την κεντρική διαχωριστική γραμμή και το όχημα επέστρεφε πίσω στην αρχική του λωρίδα. Ο χρόνος και η απόσταση που διένυε το όχημα αυτό στην αριστερή λωρίδα, οριζόταν ως ο χρόνος και η απόσταση που μεσολαβούσε ανάμεσα στα δύο αυτά γεγονότα. Ομοίως, το αρχικό και το τελικό κενό ανάμεσα στο προπορευόμενο όχημα και το όχημα που προσπερνούσε ήταν τα κενά που υφίστανται κατά τη χρονική στιγμή του πρώτου και του δεύτερου γεγονότος αντίστοιχα. Οι τέσσερις αυτές μεταβλητές αναλύονταν λεπτομερώς

με τη βοήθεια της στατιστικής. Ελιγμοί κατά τους οποίους το όχημα που προσπερνούσε βρισκόταν εν μέρει μέσα στην αριστερή λωρίδα, όσο περίμενε να βρεθεί κενό στο αντίθετο ρεύμα, αποκλείονταν από το δείγμα και λογίζονταν ως εν δυνάμει συγκρούσεις. Τελικά, στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 64 ελιγμοί προσπέρασης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με δεδομένα που είχαν καταγραφεί παλαιότερα σε πειράματα πεδίου, για να καταδειχθεί η καταλληλότητα του προτύπου που αναπτύχθηκε.

Σύμφωνα με τα ευρήματα, ο χρόνος και η απόσταση στην αριστερή λωρίδα, καθώς και το αρχικό κενό ήταν μεγαλύτερα, όταν το προπορευόμενο όχημα κινούνταν με τη μεγαλύτερη ταχύτητα από τις δύο ή είναι φορτηγό. Επιπλέον, το τελικό κενό ήταν μικρότερο, όταν το προπορευόμενο όχημα κινούνταν με τη μεγαλύτερη ταχύτητα από τις δύο ή είναι φορτηγό. Αυτό το εύρημα ήρθε σε αντίθεση με το αυτό που αναμενόταν. Οι ερευνητές παρατήρησαν μια τάση των οδηγών να αντιλαμβάνονται λανθασμένα τις αποστάσεις στον προσομοιωτή και γενικά να τις υποτιμούν. Τέλος, παρόλο που το πρότυπο δεν ήταν κατάλληλο για τον υπολογισμό των μεταβλητών που εξετάζονταν, ίσως ήταν χρήσιμο για την εξέταση της πολυπλοκότητας της οδηγικής συμπεριφοράς.

### 2.2.3 Προτυποποίηση της τροχιάς του οχήματος κατά την προσπέραση

Ένα σημαντικό πείραμα προσπεράσεων πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενο της έρευνας αυτής ήταν η διερεύνηση και η μαθηματική προτυποποίηση της τροχιάς ενός οχήματος κατά την εκτέλεση ελιγμού προσπέρασης, μέσω της εξαγωγής κατάλληλων γεωμετρικών παραμέτρων. Για να γίνει αυτό εφικτό, πρώτα συλλέχθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα των προσπεράσεων. Το πείραμα διενεργήθηκε εξ ολοκλήρου στον προσομοιωτή οδήγησης του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής, με τη βοήθεια εθελοντών οδηγών, η συμμετοχή των οποίων στην όλη διαδικασία διασφάλισε την αμεροληψία του στατιστικού δείγματος.

Στη διαδικασία συλλογής δεδομένων συμμετείχαν συνολικά 31 εθελοντές, εκ των οποίων οι 15 ήταν άνδρες και οι 16 γυναίκες οδηγοί. Πριν ξεκινήσει το κυρίως μέρος της διαδικασίας, οι εθελοντές συμπλήρωσαν ερωτηματολόγια, ώστε να σκιαγραφηθεί το προφίλ της οδηγικής τους συμπεριφοράς και να καταγραφεί η πρότερη οδηγική τους εμπειρία. Παρά την ύπαρξη αυτών των ποιοτικών δεδομένων, όμως, όλες οι προσπεράσεις λήφθηκαν υπόψη με τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας στην επεξεργασία που ακολούθησε.

Από το λογισμικό ζητήθηκε η προσομοίωση οδήγησης σε επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας, χωρίς τη διέλευση αντίθετα κινούμενων οχημάτων. Στη λωρίδα κυκλοφορίας του οχήματος που χειρίζονταν οι χρήστες κινούνταν τρία ακόμη οχήματα, τα οποία χειριζόταν κάθε φορά το λογισμικό του υπολογιστή. Η διαδρομή του πειράματος περιλάμβανε ένα πρώτο τμήμα με αρκετές στροφές και ένα δεύτερο τμήμα, το οποίο αποτελούνταν από μια ευθυγραμμία μήκους 1,500m. Από τους οδηγούς ζητούνταν να προσπεράσουν τα τρία αυτά οχήματα, αλλά οι ελιγμοί προσπέρασης έπρεπε να εκτελούνται εξ ολοκλήρου εντός της μεγάλης ευθυγραμμίας. Πολλές φορές η ευθυγραμμία τελείωνε προτού οι χρήστες προλάβουν να προσπεράσουν το τρίτο όχημα και έτσι εκτελούνταν μόνο δύο ελιγμοί προσπέρασης.

Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης, τα τρία αυτόματα οχήματα βρίσκονταν ακινητοποιημένα πάνω στο οδόστρωμα, απέχοντας απόσταση 100m το ένα από το άλλο. Το όχημα του χρήστη βρισκόταν επίσης ακινητοποιημένο στο οδόστρωμα, κατά κάποια απροσδιόριστη χιλιομετρική απόσταση πίσω από αυτά. Έπειτα, τα τρία προπορευόμενα οχήματα επιτάχυναν σταδιακά, έως ότου έπιαναν μια μέγιστη ταχύτητα, την οποία στη συνέχεια και διατηρούσαν έως και τη λήξη της προσομοίωσης. Συνολικά εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια, κατά τα οποία η μέγιστη ταχύτητα των προπορευόμενων οχημάτων καθορίστηκε στα 50, 60 και 70km/h. Σε κάθε περίπτωση, το όριο ταχύτητας που αφορούσε στο όχημα του χρήστη ήταν κατά 20km/h προσαυξημένο. Στις οδηγίες που δόθηκαν στους οδηγούς αναφερόταν επιπρόσθετα, πως δεν έπρεπε να οδηγούν με ταχύτητα μεγαλύτερη από το εκάστοτε όριο ταχύτητας. Συνεπώς, το όχημα του χρήστη κινούνταν στα τρία σενάρια με 70, 80 και 90km/h αντίστοιχα. Ο κάθε εθελοντής οδηγός πραγματοποίησε τέσσερις φορές την προσομοίωση, με την πρώτη από τις οποίες να λειτουργεί ως γύρος εξοικείωσης του χρήστη με τον προσομοιωτή. Με τις υπόλοιπες τρεις προσομοιώσεις εξετάζονταν τα τρία διαφορετικά σενάρια του πειράματος.

Από τις τρεις διαδοχικές προσπεράσεις του κάθε σεναρίου, μόνο η πρώτη ήταν επιταχυνόμενη. Στη δεύτερη και στην τρίτη προσπέραση το όχημα του χρήστη είχε σταθερή ταχύτητα και μικρή επιτάχυνση σε όλη τη διάρκεια του ελιγμού. Αυτές οι προσπεράσεις ονομάζονται προσπεράσεις σταθερής ταχύτητας ή ιπτάμενες προσπεράσεις (flyover overtakings).

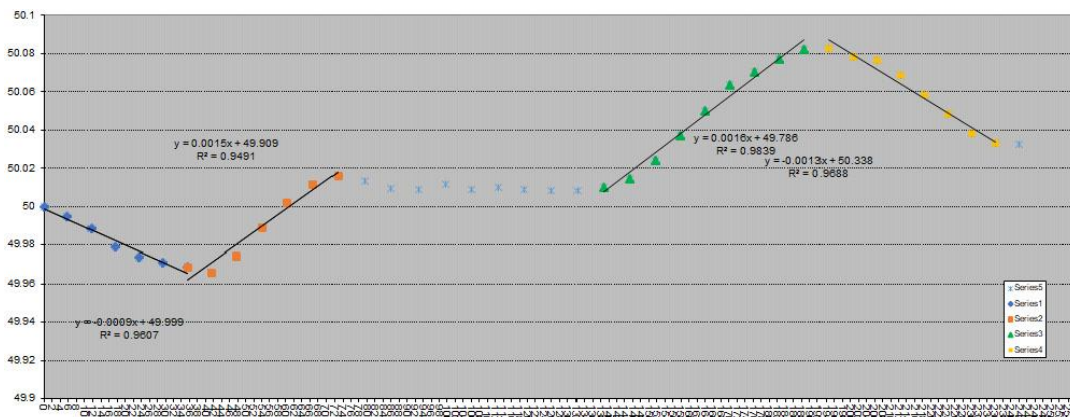
Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας συλλογής δεδομένων πραγματοποιήθηκαν συνολικά από όλους τους οδηγούς 211 ελιγμοί προσπέρασης. Ωστόσο, υπήρχε πρόβλεψη το στατιστικό αυτό δείγμα να υποστεί μια μείωση δεδομένων πριν την εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, θα αποκλείονταν τυχόν ελιγμοί που ξεκινούσαν πριν από την αρχή της μεγάλης ευθυγραμμίας, καθώς και οι ελιγμοί κατά τους οποίους οι χρήστες είχαν υπερβεί το όριο ταχύτητας κατά περισσότερο από 10km/h. Από τις 211 προσπεράσεις, οι 72 ήταν προσπεράσεις σταθερής ταχύτητας και οι υπόλοιπες 139 επιταχυνόμενες.

Τα δεδομένα που συνέλλεγε ο προσομοιωτής περιλάμβαναν ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών, οι οποίες αφορούσαν στη θέση και την κινηματική του οχήματος του χρήστη και των τριών αυτόματων οχημάτων. Η συχνότητα καταγραφής των πληροφοριών ήταν 60Hz, δηλαδή με χρονικό βήμα  $\Delta t=0.017s$ . Στην *Εικόνα 2.6* διακρίνεται ο προσομοιωτής οδήγησης που χρησιμοποιήθηκε και φαίνεται στις τρεις οθόνες το οπτικό πεδίο που είχαν οι εθελοντές οδηγοί κατά την διενέργηση του πειράματος. Το συγκεκριμένο πείραμα προσομοιωτή περιγράφεται με λεπτομέρεια στη διπλωματική εργασία του Αλβέρτη (2020) και σε αυτή του Χατζηελευθερίου (2020). Στη συνέχεια, στις εργασίες αυτές πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν και εφαρμόστηκε η σχετική μεθοδολογία.



**Εικόνα 2.6** Ο προσομοιωτής του Εργαστηρίου Κυκλοφοριακής Τεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ (Αλβέρτης, 2020).

Ο Αλβέρτης (2020) εξέτασε μόνο τις επιταχυνόμενες προσπεράσεις από το παραπάνω στατιστικό δείγμα των ελιγμών. Συγκεκριμένα, έγινε η υπόθεση, πως η τροχιά του οχήματος κατά την εκτέλεση ελιγμού προσπέρασης αποτελείται από τέσσερα κυκλικά τόξα, στο μέσον των οποίων παρεμβάλλεται μια ευθυγραμμία. Η αλληλουχία των γεωμετρικών στοιχείων αυτών θεωρήθηκε κυκλικό τόξο-αντίρροπο κυκλικό τόξο-ευθυγραμμία-ομόρροπο κυκλικό τόξο-αντίρροπο κυκλικό τόξο. Ύστερα, ο προσδιορισμός των γεωμετρικών παραμέτρων των επιμέρους στοιχείων της προσπέρασης πραγματοποιήθηκε στο διάγραμμα αξιμούθιων, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Στο κάθε ένα από τα τέσσερα κυκλικά τόξα, τα οποία στο εν λόγω διάγραμμα απεικονίζονται ως κεκλιμένα ευθύγραμμα τμήματα, προσαρμόστηκε με γραμμική παλινδρόμηση μια ευθεία. Στη συνέχεια, η ακτίνα καμπυλότητας του κάθε ενός από τα τέσσερα κυκλικά τόξα υπολογίστηκε ως το αντίστροφο του συντελεστή διεύθυνσης της αντίστοιχης ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης.



**Σχήμα 2.17** Προσδιορισμός ακτίνων με γραμμική παλινδρόμηση στο διάγραμμα αξιμούθιων (Αλβέρτης, 2020).

Έπειτα, κατασκευάστηκε από ένα μοντέλο πρόβλεψης για την ακτίνα κάθε ενός από τα τέσσερα κυκλικά αυτά τόξα. Τα μοντέλα αυτά είναι τα εξής:

$$\log R1 = 1.1066 \cdot \log RL1 + 0.2852 \cdot \log PHeadway1 + 0.3850 \cdot \log PAcc1 \quad (2.5)$$

, όπου: R1 (m) η ακτίνα του πρώτου κυκλικού τόξου,  
 RL1 (m) το μήκος του πρώτου κυκλικού τόξου,  
 PHeadway1 (m) η καθαρή απόσταση στη διαμήκη διεύθυνση μεταξύ των προφυλακτών του προπορευόμενου και το οχήματος που προσπερνάει, στην αρχή της προσπέρασης,  
 PAcc1 (km/hour<sup>2</sup>) η επιτάχυνση,

$$\log R2 = 1.2977 + 0.1832 \cdot \log DV2 + 0.9674 \cdot \log RadiusLength2 \quad (2.6)$$

, όπου: R2 (m) η ακτίνα του δεύτερου κυκλικού τόξου,  
 DV2 (km/hour) η διαφορά ταχύτητας χρήστη με προπορευόμενο όχημα,  
 RadiusLength2 (m) το μήκος του δεύτερου κυκλικού τόξου,

$$R3 = 300.7417 + 0.1854 \cdot RadiusLength3 \cdot AverageSpeed3 \quad (2.7)$$

, όπου: R3 (m) η ακτίνα του τρίτου κυκλικού τόξου,  
 RadiusLength3 (m) το μήκος του τρίτου κυκλικού τόξου,  
 AverageSpeed3 (km/hour) ο μέσος όρος της ταχύτητας κατά την κίνηση του οχήματος στο τρίτο κυκλικό τόξο, και

$$R4 = -585.401 + 31.692 \cdot RadiusLength4 + 0.364 \cdot AverageSpeed4 \cdot Headway4 \quad (2.8)$$

, όπου: R4 (m) η ακτίνα του τέταρτου κυκλικού τόξου,  
 RadiusLength4 (m) το μήκος του τέταρτου κυκλικού τόξου,  
 AverageSpeed4 (km/hour) η μέση ταχύτητα κατά την κίνηση του οχήματος στο τέταρτο κυκλικό τόξο,  
 Headway4 (m) η απόσταση του οχήματος του χρήστη με το όχημα που προσπέρασε όταν πλέον έχει ολοκληρώσει την προσπέραση.

Επιπλέον, οι μέσες ακτίνες για το κάθε ένα από τα τέσσερα κυκλικά τόξα προέκυψαν ίσες με 1,029m, 1,223m, 887m και 1,112m αντίστοιχα.

Ομοίως, ο Χατζηελευθερίου (2020) εξέτασε μόνο τις προσπεράσεις σταθερής ταχύτητας (flyover) από το παραπάνω στατιστικό δείγμα των ελιγμών. Η διαδικασία της επεξεργασίας ήταν ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή έγινε εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στα επιμέρους τμήματα του διαγράμματος αξιμούθιων. Έπειτα εξήχθησαν οι επιμέρους ακτίνες των κυκλικών τόξων.

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης για το μέσο όρο της πρώτης και της δεύτερης ακτίνας και ένα μοντέλο πρόβλεψης για το μέσο όρο της τρίτης και της τέταρτης ακτίνας. Για να κατασκευαστεί, το κάθε ένα εκ των δύο μοντέλων τροφοδοτήθηκε μόνο με τα δεδομένα των ακτίνων που αφορούν στα 70km/h, μόνο με αυτά που αφορούν στα 80km/h, μόνο με αυτά που αφορούν στα 90km/h ή συνολικά με όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πείραμα του προσομοιωτή. Προέκυψαν, δηλαδή, οκτώ μοντέλα πρόβλεψης.

## 2.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πολλές θεωρητικές μέθοδοι για την περιγραφή του ελιγμού της αλλαγής λωρίδας και του ελιγμού της προσπέρασης. Όλες τους είναι σωστές, με την έννοια ότι προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα, αναλόγως με την οπτική γωνία από την οποία εξετάζεται κάθε φορά η προσπέραση. Πολύ συχνά, οι αλγόριθμοι που προτείνονται αποτελούνται από δύο επιμέρους στοιχεία (modules). Αρχικά, καθορίζεται σε πραγματικό χρόνο μια ιδεατή τροχιά, η οποία λειτουργεί για το όχημα ως αόρατος στόχος. Στη συνέχεια, οι επενεργητές καλούνται να προσαρμόσουν κατάλληλα την ταχύτητα και τη γωνία των τροχών, ώστε το όχημα να μην αποκλίνει από την ιδεατή αυτή τροχιά. Επομένως, η αναζήτηση της ιδανικής μαθηματικής σχέσης και ο ρομποτικός έλεγχος του οχήματος αποτελούν δύο προβλήματα άμεσα συνυφασμένα μεταξύ τους. Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων ελέγχου, συνήθως πραγματοποιείται μια προσομοίωση, σε κατάλληλο υπολογιστικό περιβάλλον ή κάποιο πείραμα πεδίου.

Η επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων για όλες τις δυνατές τροχιές είναι αρκετά δαπανηρή, σε όρους χρόνου και υπολογιστικής ισχύος. Επομένως, η ιδεατή τροχιά δεν χαράσσεται εξ' ολοκλήρου σε πραγματικό χρόνο. Αντίθετα, κατά τη συνήθη πρακτική το πρόβλημα επιλύεται εκ των προτέρων και αυτό που προσαρμόζεται στις εκάστοτε οδηγικές συνθήκες είναι απλώς η παραμετρική εξίσωση της τροχιάς, μέσω του υπολογισμού των επιμέρους συντελεστών της. Η χρήση διαφορετικής μεθόδου, οδηγεί και σε διαφορετική παραμετρική εξίσωση. Η διεθνής βιβλιογραφία εμπλουτίζεται συνεχώς με καινούριες μεθόδους, ορισμένες από τις οποίες, ωστόσο, προσεγγίζουν το πρόβλημα με προγραμματιστικό τρόπο και ξεφεύγουν από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Οι μέθοδοι που βρίσκονται πιο κοντά στο πεδίο του συγκοινωνιολόγου πολιτικού μηχανικού μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες βασικές κατηγορίες.

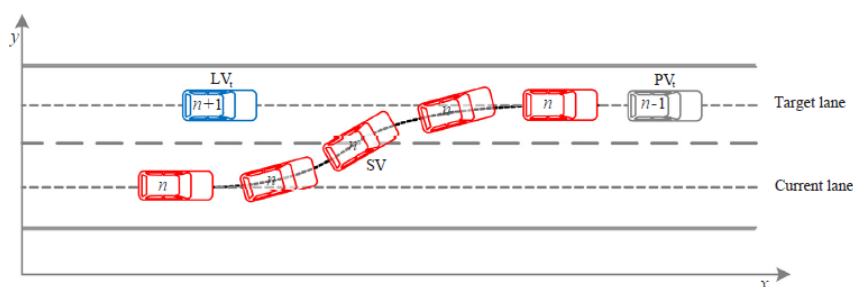
### 2.3.1 Γεωμετρική μέθοδος

Η γεωμετρική μέθοδος συνίσταται στη χρήση μιας εκ των γνωστών μαθηματικών καμπυλών, για την περιγραφή της τροχιάς ενός οχήματος που εκτελεί αλλαγή λωρίδας σε μια οδό. Χρησιμοποιείται ευρέως, κυρίως λόγω του μικρού υπολογιστικού κόστους που απαιτεί. Επιπλέον, προσφέρει μεγάλη ευχέρεια στους ερευνητές ως προς την επιλογή της πλέον κατάλληλης καμπύλης. Αφού επιλεγεί ο παραμετρικός της τύπος, η καμπύλη προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος, με την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών και τον υπολογισμό των συντελεστών. Μάλιστα, η γεωμετρική μέθοδος προσφέρεται και για τη χάραξη τροχιών προσπέρασης, οι οποίες παίρνουν τη μορφή πολύκλαδων συναρτήσεων. Για παράδειγμα οι ερευνητές, οι οποίοι διακρίτοποιούν την προσπέραση σε τρεις φάσεις, χρησιμοποιούν τρίκλαδες συναρτήσεις. Σε αυτές, ο πρώτος και ο τρίτος κλάδος είναι καμπύλες αλλαγής λωρίδας, ενώ ο δεύτερος συνήθως προσεγγίζεται με μια ευθεία γραμμή. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μαθηματικές καμπύλες, οι κυριότερες από τις οποίες παρουσιάζονται στα ακόλουθα χωρία.



### 2.3.1.1 Πολυώνυμο

Η μαθηματική έκφραση που χρησιμοποιείται στις περισσότερες έρευνες είναι το πολυώνυμο. Το θέμα, γενικά, προσεγγίζεται με δύο τρόπους. Από τη μία, μελετάται η συνισταμένη κίνηση του οχήματος και από την άλλη, η κίνηση αυτή αναλύεται στις συνιστώσες της. Έστω ένα σύστημα συντεταγμένων, με την αρχή των αξόνων τοποθετημένη στο κέντρο βάρους του οχήματος και τον άξονα των τετμημένων να συμπίπτει με το διαμήκη άξονά του, τη στιγμή που ξεκινά ο ελιγμός της προσπέρασης. Καθώς το όχημα κινείται, το σύστημα παραμένει σταθερό και βοηθά στο να αναλυθεί η μετατόπιση του οχήματος σε διαμήκη και εγκάρσια. Η πρώτη προσέγγιση, λοιπόν, είναι να μορφωθεί μία μόνο συνάρτηση, η οποία έχει ως ανεξάρτητη μεταβλητή τη διαμήκη μετατόπιση και ως εξαρτημένη την εγκάρσια μετατόπιση του οχήματος. Η γραφική παράσταση μιας τέτοιας συνάρτησης, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.18 και είναι αυτό που θα έβλεπε κάποιος παρατηρητής, αν επέβαινε σε ελικόπτερο και κοιτούσε τον ελιγμό της προσπέρασης από ψηλά. Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, μορφώνονται δύο συναρτήσεις με ανεξάρτητη μεταβλητή το χρόνο, η μία με εξαρτημένη μεταβλητή τη διαμήκη και η άλλη με την εγκάρσια μετατόπιση. Η τροχιά του οχήματος, έπειτα, καθορίζεται ως σύνθεση των δύο συνιστωσών κινήσεων. Και οι δύο αυτοί τρόποι προτείνονται εξίσου στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 2.18 Αλλαγή λωρίδας που η εγκάρσια μετατόπιση είναι πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού ως προς τη διαμήκη (Yang et al., 2018).

Οι Yang et al. (2018) χρησιμοποίησαν πολυώνυμο τρίτου βαθμού, με ανεξάρτητη μεταβλητή τη διαμήκη μετατόπιση και εξαρτημένη μεταβλητή την εγκάρσια μετατόπιση. Πολυώνυμο τρίτου βαθμού χρησιμοποιήθηκαν και από άλλους ερευνητές, με τη διαφορά όμως πως αυτή τη φορά ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν ο χρόνος και εξαρτημένη η διαμήκης και η εγκάρσια μετατόπιση (Zhang et al., 2013, October; Petrov & Nashashibi, 2014). Η Shamir (2004) πρότεινε τη χρήση δύο πολυωνύμων πέμπτου βαθμού ως προς το χρόνο για τη διαμήκη και την εγκάρσια μετατόπιση και η συνεπαγόμενη τροχιά καλούνταν “τροχιά με τον ελάχιστο ρυθμό μεταβολής της επιτάχυνσης” (minimal jerk trajectory). Σε άλλες μελέτες, η διαμήκης μετατόπιση καθορίστηκε ως πολυώνυμο τετάρτου βαθμού και η εγκάρσια ως πολυώνυμο πέμπτου βαθμού (Alia et al., 2017, October; Glaser et al., 2010). Στην πρώτη, παράγονταν παραμετρικά τόξα κλωθοειδούς και αναζητήθηκε εκείνο, το οποίο απέκλινε λιγότερο από την αρχική τροχιά που καθόριζαν τα πολυώνυμα, χωρίς να προκαλείται σύγκρουση με κάποιο εμπόδιο επί της οδού. Στη δεύτερη, οι άγνωστοι συντελεστές των πολυωνύμων υπολογίζονταν με βάση τις συνοριακές συνθήκες και έπειτα τροποποιούνταν η τελική τροχιά, ώστε να είναι βελτιστοποιημένη ως προς την ασφάλεια, την ταχύτητα, την άνεση των επιβατών, την κατανάλωση καυσίμου και την τήρηση των κανόνων κυκλοφορίας.

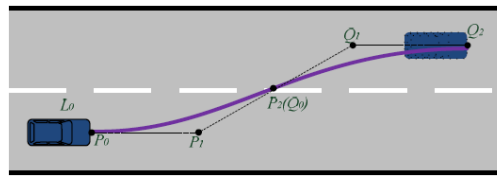
Οι ερευνητές Papadimitriou & Tomizuka (2003, June) επέλεξαν διαφορετικό σύστημα εξισώσεων για την αλλαγή λωρίδας, ανάλογα με το αν υπήρχε κάποιο εμπόδιο στην τροχιά του οχήματος ή όχι. Όταν ο ελιγμός πραγματοποιούνταν απουσία εμποδίου, χρησιμοποιούσαν πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ως προς το χρόνο για να περιγράψουν μαθηματικά τη διαμήκη και την εγκάρσια μετατόπιση. Σε αντίθετη περίπτωση, θεωρούσαν την εγκάρσια μετατόπιση πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ως προς το χρόνο, ενώ τη διαμήκη μετατόπιση πολυώνυμο έκτου βαθμού ως προς το χρόνο. Αυξάνοντας το βαθμό, οι συγγραφείς επισήμαναν πως το όχημα είχε μεγαλύτερη ελευθερία ως προς τη διαδρομή που θα ακολουθήσει για να αποφύγει το εμπόδιο. Οι Sazgar et al. (2020) αγνόησαν τη διαμήκη συνιστώσα της μετατόπισης του οχήματος και έδωσαν έμφαση στην εγκάρσια συνιστώσα, για τη μαθηματική περιγραφή της οποίας, επίσης, χρησιμοποίησαν ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ως προς το χρόνο. Βέβαια η μέθοδός τους ήταν υβριδική, καθώς για τον προσδιορισμό των συντελεστών, το πολυώνυμο βελτιστοποιήθηκε ως προς την ελαχιστοποίηση της τριβής που αναπτυσσόταν στο σύστημα τροχός-οδόστρωμα. Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί εξίσου και μια δυναμική μέθοδος.

Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός του πολυωνύμου, εν γένει, τόσο καλύτερη η προσαρμογή της καμπύλης σε ένα πακέτο δεδομένων. Ο βαθμός αυτός, όμως, πρέπει να επιλέγεται με φειδώ, καθώς η άκριτη αύξησή του ενέχει παγίδες. Μία τέτοια είναι το φαινόμενο της υπερπροσαρμογής (data overfitting), κατά το οποίο το μοντέλο προσαρμόζεται πλήρως στα διαθέσιμα δεδομένα και αδυνατεί να συλλάβει τη γενικότερη τάση που τα χαρακτηρίζει (Κύρκος, 2015). Εξάλλου, κατόπιν πειραματισμών έχει βρεθεί, πως όταν ο βαθμός του πολυωνύμου ξεπερνάει το πέντε, τα σφάλματα προσαρμογής παύουν να μειώνονται και συγκλίνουν σε κάποιες οριακές τιμές (Wang et al., 2014). Επιπλέον, για πολυώνυμο με βαθμό μεγαλύτερο του πέντε η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνει σημαντικά και προστίθενται περισσότεροι συντελεστές, οι οποίοι πρέπει να υπολογιστούν από τις συνοριακές συνθήκες (Papadimitriou & Tomizuka, 2003, June).

### 2.3.1.2 Καμπύλες Bezier

Οι καμπύλες Bezier, εν γένει, χρησιμοποιούνται στη χάραξη διαδρομών για αυτόνομα και ρομποτικά οχήματα (Choi et al., 2008, October; Jolly et al., 2009; Choi et al., 2010). Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές τις επιλέγουν ειδικά για να περιγράψουν τους ελιγμούς αλλαγής λωρίδας που εκτελούν οχήματα κινούμενα επί οδού. Συγκεκριμένα, οι Chen et al. (2013, July) χρησιμοποίησαν τετραγωνικές καμπύλες Bezier για την περιγραφή του ελιγμού αυτού. Σύμφωνα με τους ίδιους, οι καμπύλες Bezier διαθέτουν ιδιότητες, οι οποίες τις καθιστούν καλή επιλογή για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Πρώτον, η καμπύλη που παράγεται διέρχεται από το αρχικό και το τελικό σημείο ελέγχου και συνεπώς η τροχιά του οχήματος δεν παρουσιάζει ασυνέχειες. Δεύτερον, το αρχικό και το τελικό τμήμα της παραγόμενης καμπύλης εφάπτονται στα αντίστοιχα ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία ορίζονται από το πρώτο, το δεύτερο, το προτελευταίο και το τελευταίο σημείο ελέγχου. Επομένως, αν αυτά τα δύο ευθύγραμμα τμήματα είναι παράλληλα στη λωρίδα κυκλοφορίας, εξασφαλίζεται η συνέχεια και του προσανατολισμού του οχήματος, όταν αυτό εισέρχεται και εξέρχεται από τον ελιγμό της αλλαγής λωρίδας. Ένα παράδειγμα τέτοιας καμπύλης απεικονίζεται στο *Σχήμα 2.19*, όπου τα  $P_0P_1$  και  $Q_1Q_2$

είναι τα εν λόγω ευθύγραμμα τμήματα, που ορίζονται από τα σημεία ελέγχου  $P_1$  και  $Q_1$ . Οι ερευνητές Choi et al. (2008, October) επιβεβαίωσαν τις ιδιότητες αυτές, καθώς και τη χρησιμότητά τους στην παραγωγή τροχιών.

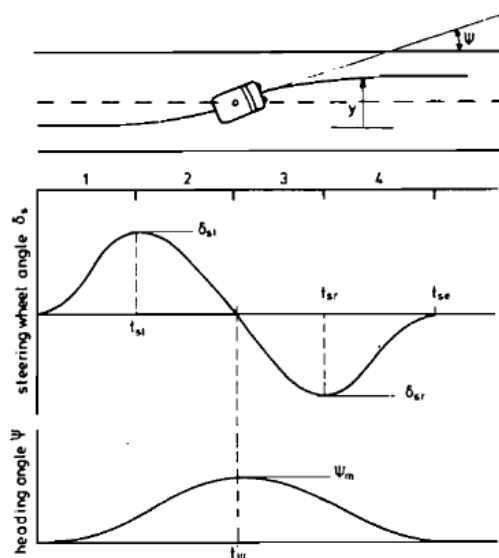


**Σχήμα 2.19** Μια τετραγωνική καμπύλη Bezier που περιγράφει μαθηματικά μια αλλαγή λωρίδας (Chen et al., 2013, July).

### 2.3.1.3 Γωνία στροφής των τροχών

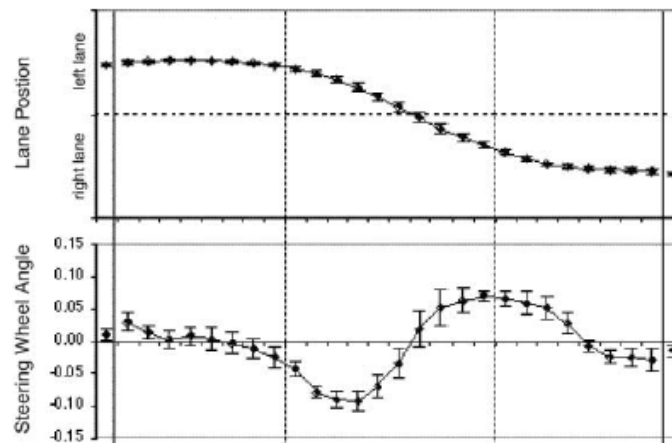
Έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, πέρα από την ίδια την τροχιά του οχήματος κατά την αλλαγή λωρίδας, προσελκύει και η μελέτη του τρόπου που μεταβάλλεται η γωνία των τροχών ή ισοδύναμα η γωνία στροφής του τιμονιού. Εξάλλου, οι δύο αυτές μεταβλητές είναι ευθέως ανάλογες μεταξύ τους. Σύμφωνα με τους Connors & Elkaim (2007, April), η γωνία στροφής των τροχών είναι ανάλογη με τη δεύτερη παράγωγο της τροχιάς του οχήματος.

Ο Godthelp (1985) υποστήριξε, πως η γωνία των τροχών μπορεί να περιγραφεί ως ένα ημιτονοειδές κύμα, το οποίο αποτελείται από τέσσερις διαδοχικές φάσεις. Για μια αλλαγή λωρίδας προς τα αριστερά, η μεταβολή της γωνίας των τροχών και του προσανατολισμού του οχήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.20, με τις τέσσερις φάσεις να είναι διαχωρισμένες. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την αρχική στροφή του τιμονιού προς τα αριστερά, ενώ κατά τη δεύτερη φάση το τιμόνι επαναφέρεται στην ουδέτερή του θέση. Όταν συμβαίνει αυτό, ο προσανατολισμός του οχήματος έχει τη μέγιστη απόκλιση από τη νοητή ευθεία του άξονα της οδού. Στην τρίτη φάση το τιμόνι στρέφεται προς τα δεξιά, ενώ κατά την τέταρτη φάση επαναφέρεται εκ νέου στην ουδέτερή του θέση και ολοκληρώνεται ο ελιγμός.



**Σχήμα 2.20** Η γωνία στροφής του τιμονιού (κέντρο) και ο προσανατολισμός του οχήματος (κάτω) κατά τη διάρκεια μιας αλλαγής λωρίδας προς τα αριστερά (πάνω) (Godthelp, 1985).

Οι Salvucci & Liu (2002) μελέτησαν παραμέτρους που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του οδηγού κατά την αλλαγή λωρίδας, εκτελώντας ένα πείραμα σε προσομοιωτή οδήγησης. Τα ευρήματά τους επιβεβαίωσαν τη θεώρηση του ημιτονοειδούς κύματος. Βέβαια, παρατήρησαν μια διαφοροποίηση στη δεύτερη κορυφή του ημιτόνου, η οποία συγκριτικά με την πρώτη είναι πιο πεπλατυσμένη και παρουσιάζει τοπικό ακρότατο μικρότερης απόλυτης τιμής. Αυτή η τάση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.21 και η φυσική ερμηνεία είναι, πως οι οδηγοί ευθυγραμμίζουν το όχημα στη λωρίδα προορισμού με πιο ομαλό τρόπο.



Σχήμα 2.21 Η γωνία στροφής του τιμονιού (κάτω) κατά τη διάρκεια ενός ελιγμού αλλαγής λωρίδας (πάνω) (Salvucci & Liu, 2002).

#### 2.3.1.4 Κλωθοειδείς καμπύλες

Ένας απλός, γρήγορος και υπολογιστικά φτηνός τρόπος για να περιγραφεί μια τροχιά αλλαγής λωρίδας είναι να χρησιμοποιηθούν δύο διαδοχικά αντίρροπα κυκλικά τόξα. Μάλιστα, για μεγάλες ταχύτητες κίνησης η απόκλιση από την πραγματική τροχιά είναι πολύ μικρή, καθώς η ακτίνα καμπυλότητας των τόξων είναι πολύ μεγάλη. Από τα μαθηματικά είναι γνωστό, πως η καμπυλότητα ενός κυκλικού τόξου είναι σταθερή συνάρτηση του μήκους του. Επομένως, μια καμπύλη που αποτελείται από δυο διαδοχικά αντίρροπα κυκλικά τόξα εμφανίζει στο διάγραμμα καμπυλότητας άλματα ασυνέχειας. Τα άλματα αυτά εντοπίζονται στα σημεία μετάβασης από την ευθυγραμμία στο πρώτο κυκλικό τόξο, από το ένα τόξο στο άλλο καθώς και από το δεύτερο τόξο στην ευθυγραμμία που ακολουθεί.

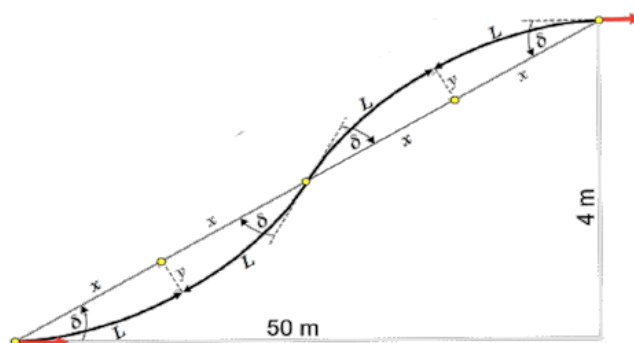
Όταν, λοιπόν, μια τέτοια μη συνεχής καμπύλη χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τροχιά κίνησης ενός οχήματος, εμφανίζονται ορισμένα προβλήματα. Αρχικά, το όχημα αναγκάζεται να σταματάει σε κάθε σημείο που μεταβάλλεται απότομα η καμπυλότητα και να προσανατολίζει εκ νέου τους τροχούς του στη σωστή διεύθυνση (Scheuer & Fraichard, 1997, April; Connors & Elkaim, 2007, April). Ακόμη, όμως, και αν το όχημα συνεχίσει να κινείται κανονικά, στα εν λόγω σημεία εμφανίζεται μεγάλο σφάλμα ευθυγράμμισης (tracking error), με την έννοια ότι το όχημα δεν δύναται να ακολουθήσει την ιδεατή προκαθορισμένη τροχιά που έχει ως στόχο και καταλήγει να κινείται εκτός αυτής (Nelson, 1989, May; Thompson & Kagami, 2005, November). Αυτό συμβαίνει, διότι οι επιφορτισμένοι με την “παρακολούθηση” της ιδεατής τροχιάς επενεργητές

(actuators) χρειάζονται κάποιο χρόνο (έστω και ελάχιστο) για να εκτελέσουν τις εντολές που δέχονται, αφού φυσικά δεν δρουν ακαριαία.

Για παράδειγμα, αν η προγραμματισμένη τροχιά απαιτεί τη στροφή των τροχών κατά δεκαπέντε μοίρες στιγμιαία, στο σημείο που γίνεται η μετάβαση από το ένα κυκλικό τόξο στο αντίρροπο που ακολουθεί, ο επενεργητής θα χρειαστεί ορισμένα κλάσματα του δευτερολέπτου, ίσως και περισσότερο, για να ολοκληρώσει την περιστροφή. Στο διάστημα αυτό το όχημα θα χάσει την επαφή με την ιδεατή τροχιά. Επιπλέον, όταν η τροχιά εμπεριέχει σημεία ασυνέχειας στην καμπυλότητα, υφίσταται ο κίνδυνος το όχημα να γλιστρήσει (Kanayama & Hartman, 1997), να παραβιαστούν τυχόν δυναμικοί περιορισμοί του οχήματος ή του φορτίου (Nelson, 1989, May), ενώ παράλληλα καταπονούνται περισσότερο τα μηχανικά εξαρτήματα του οχήματος (Thompson & Kagami, 2005, November).

Παρότι οι ανωτέρω μελέτες αναφέρονται γενικά στη χάραξη κατάλληλων διαδρομών για αυτόνομα και ρομποτικά οχήματα, είναι προφανές πως τα συμπεράσματα επεκτείνονται και για το πολύ συγκεκριμένο πρόβλημα του καθορισμού τροχιών για οχήματα που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα σε οδούς και καλούνται να αλλάξουν λωρίδα. Επομένως, συναρτήσεις που εμπεριέχουν την αλληλουχία ευθυγραμμία-τόξο κύκλου-αντίρροπο τόξο κύκλου-ευθυγραμμία κρίνονται ακατάλληλες για την περιγραφή της κίνησης ενός οχήματος κατά την αλλαγή λωρίδας. Αντίθετα, επιζητούνται καμπύλες, των οποίων η καμπυλότητα είναι συνεχής συνάρτηση του μήκους τους.

Μια τέτοια καμπύλη είναι η κλωθοειδής, της οποίας η καμπυλότητα μεταβάλλεται γραμμικά με το μήκος της. Ο Wilde (2009, October) ανέπτυξε μια μέθοδο για το σχεδιασμό τροχιών, οι οποίες αποτελούνται από τόξα κλωθοειδών ή αλληλουχίες κλωθοειδών και κυκλικών τόξων. Σύμφωνα με τον ερευνητή αυτόν, αν η μέγιστη καμπυλότητα της καμπύλης που παράγεται υπερβαίνει την τιμή  $\kappa_{\max}=0.2\text{rad/m}$ , τότε της εκάστοτε κλωθοειδούς έπεται και κυκλικό τόξο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση το τόξο της κλωθοειδούς επαρκεί για την απαιτούμενη αλλαγή διεύθυνσης του οχήματος. Οι τροχιές που σχεδιάστηκαν είναι βελτιστοποιημένες, ώστε ο οδηγός που τις διασχίζει να στρίβει κατά το δυνατόν λιγότερο το τιμόνι. Στην ίδια έρευνα προτάθηκε και μια τροχιά για αλλαγή λωρίδας, η οποία αποτελείται από την αλληλουχία κλωθοειδής εισόδου-ομόρροπη κλωθοειδής εξόδου-αντίρροπη κλωθοειδής εισόδου-ομόρροπη κλωθοειδής εξόδου. Ο χαρακτηρισμός ενός τόξου ως “ομόρροπο” και “αντίρροπο” γίνεται ως προς το αμέσως προηγούμενο τόξο. Μια τέτοια τροχιά απεικονίζεται στο Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22 Μια τροχιά αλλαγής λωρίδας (όχι υπό κλίμακα) που αποτελείται από τέσσερα διαδοχικά τόξα κλωθοειδούς (Wilde, 2009, October).

Οι Gray et al. (2012, June) διερεύνησαν μεταξύ άλλων την αλλαγή λωρίδας και έδειξαν, πως μια τροχιά που αποτελείται από τέσσερις διαδοχικές κλωθοειδείς βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε ημιαυτόνομα οχήματα. Μάλιστα, παραμετροποίησαν τα τόξα των κλωθοειδών ως προς το μήκος και το ρυθμό μεταβολής της καμπυλότητας, ώστε η τροχιά που παράγεται τελικά να μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορα σενάρια. Οι Alia et al. (2017, October) πρότειναν τη συνδυασμένη χρήση πολυωνυμικών καμπυλών και τόξων κλωθοειδών, ώστε να παραχθεί μια τροχιά προσπέρασης για χρήση σε αυτόνομα οχήματα. Το σύστημα παράγει σε πραγματικό χρόνο πολλά παραμετρικά τόξα κλωθοειδών. Έπειτα, επιλέγεται να ακολουθηθεί αυτό που αποκλίνει λιγότερο από την προκαθορισμένη πολυωνυμική τροχιά, με σεβασμό στην εκάστοτε ταχύτητα του οχήματος και απαίτηση η τελική διαδρομή να αποφεύγει τυχόν εμπόδια επί της οδού.

Σύμφωνα με τους Yao et al. (2013, June), ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού αποτελεί το ανάπτυγμα Taylor πέμπτης τάξης μιας κλωθοειδούς καμπύλης. Συνεπώς, η χρήση της εν λόγω πολυωνυμικής έκφρασης αποτελεί μια “φτηνή” εναλλακτική σε όρους υπολογιστικού κόστους, ενώ παράλληλα διατηρεί ορισμένες ιδιότητες των κλωθοειδών. Ο Nelson (1989, May) υποστήριξε, πως μια τροχιά με τόξα κλωθοειδούς είναι πιο περίπλοκο να σχεδιαστεί και ενέχει το ρίσκο να μην ικανοποιούνται οι συνοριακές συνθήκες στο τέλος της καμπύλης. Σύμφωνα με τον ίδιο, ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι, επειδή οι συντεταγμένες μιας κλωθοειδούς δεν προκύπτουν από κάποια έκφραση κλειστής μορφής, αλλά παράγονται με ολοκλήρωση πάνω στο μήκος της καμπύλης. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, πρότεινε ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού για την περιγραφή της τροχιάς ενός οχήματος κατά την αλλαγή λωρίδας. Εξάλλου, μια τέτοια καμπύλη αποτελεί μια αναλυτική συνάρτηση, η οποία μπορεί να ικανοποιεί με ακρίβεια τις συνοριακές συνθήκες ενός προβλήματος.

Οι Montes et al. (2007, June) διερεύνησαν τον ελιγμό της προσπέρασης για αυτόνομα οχήματα. Για τη μαθηματική έκφραση της αλλαγής λωρίδας χρησιμοποιούν τέσσερα διαδοχικά τόξα κλωθοειδούς. Επειδή αναγνωρίζουν πως ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων Fresnel είναι περίπλοκος, απέφυγαν την απευθείας επίλυσή τους και τα προσέγγισαν με Rational Bezier Curves, με τρόπο που διασφάλισε ότι η παραγόμενη καμπύλη έχει την ίδια συμπεριφορά με την κλωθοειδή. Η παραμετρική τροχιά που προέκυψε υπόκειντο σε μετασχηματισμό κλίμακας (scaling) σε πραγματικό χρόνο, ώστε να εφαρμόζεται στο εκάστοτε σενάριο προσπέρασης. Οι ερευνητές υποστήριξαν, πως ο αλγόριθμος είναι γρήγορος στην εκτέλεση και παράγει ασφαλείς και ακριβείς τροχιές για το όχημα.

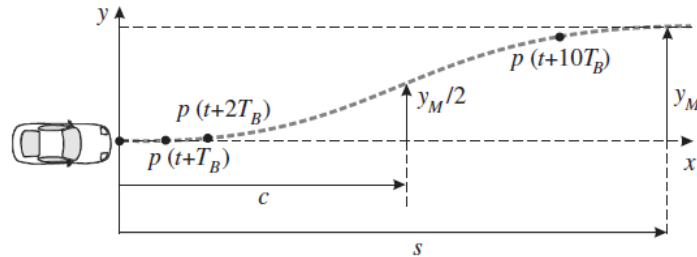
### 2.3.1.5 Σιγμοειδείς καμπύλες

Μια ακόμη καμπύλη που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της τροχιάς αλλαγής λωρίδας ενός οχήματος είναι η σιγμοειδής. Οι Isermann et al. (2012) ανέπτυξαν ένα σύστημα αποφυγής σύγκρουσης, το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε οχήματα που κινούνται σε οδό. Το σύστημα καθοδηγεί το όχημα να αλλάξει λωρίδα και μάλιστα επεκτείνεται να πραγματοποιεί και ελιγμούς προσπέρασης. Η μέγιστη επιτρεπόμενη εγκάρσια επιτάχυνση της τροχιάς περιορίστηκε με βάση δυναμικά κριτήρια της κίνησης του οχήματος, τα οποία προσαρμόζονται στις συνθήκες που επικρατούν κατά την οδήγηση. Επιπλέον, ο μέγιστος πιθανός ρυθμός μεταβολής της εγκάρσιας επιτάχυνσης (lateral jerk)

περιορίστηκε από το αυτόματο σύστημα χειρισμού του τιμονιού. Η τροχιά αποφυγής που προτάθηκε από τους ερευνητές εκφράζεται από την εξής σιγμοειδή καμπύλη:

$$y(x) = \frac{y_M}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (2.9)$$

, όπου  $y_M$  η μέγιστη εγκάρσια απόσταση του ελιγμού και  $a$  η κλίση στο σημείο καμπής της καμπύλης, για το οποίο ισχύει ότι  $x=c$ . Η παραγόμενη παραμετρική τροχιά απεικονίζεται στο Σχήμα 2.23. Οι άγνωστες παράμετροι επιλέγονται ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες οδήγησης και προφανώς επιδρούν στο μήκος που απαιτείται για τον ελιγμό.



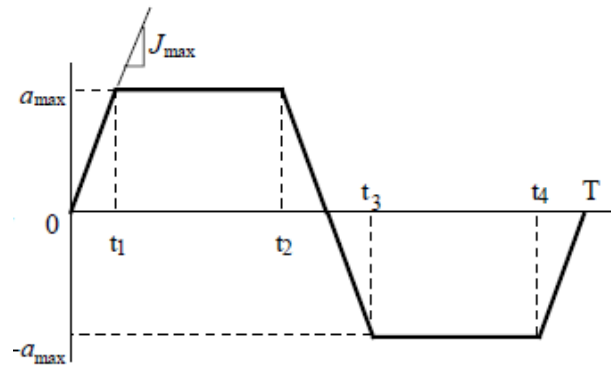
Σχήμα 2.23 Μια τυπική τροχιά αποφυγής εμποδίου που βασίζεται στη σιγμοειδή καμπύλη (Isermann et al., 2012).

Παράλληλα, οι Huang et al. (2019) χρησιμοποίησαν δύο διαδοχικές και κατοπτρικές (ως προς τον εγκάρσιο στην οδό άξονα) σιγμοειδείς καμπύλες για να μοντελοποιήσουν ολόκληρο τον ελιγμό της προσπέρασης. Σε αυτές εμπεριέχονται ως παράμετροι η σχετική ταχύτητα των δύο οχημάτων που συμμετέχουν στην προσπέραση και μια προκαθορισμένη διαμήκης απόσταση ασφαλείας ανάμεσά τους.

### 2.3.2 Δυναμική μέθοδος

Η εγκάρσια επιτάχυνση αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος, το οποίο συσχετίζεται με την άνεση των επιβατών (Chee & Tomizuka, 1994) και γενικά διέπει την τροχιά αλλαγής λωρίδας (Ren et al., 2011). Όταν κριτήρια που αφορούν στη δυναμική του οχήματος χρησιμοποιούνται ως βάση για τη διαμόρφωση μιας τροχιάς, τότε γίνεται λόγος για τη δυναμική μέθοδο.

Οι Chee & Tomizuka (1994) ξεκίνησαν τη μοντελοποίηση της αλλαγής λωρίδας, φράσσοντας την εγκάρσια επιτάχυνση και το ρυθμό μεταβολής αυτής (lateral jerk), στις τιμές  $a_{max}=0.05g$  και  $J_{max}=0.1g/s$  αντίστοιχα. Αυτό συνεπάγεται, πως το διάγραμμα της εγκάρσιας επιτάχυνσης έχει τραπεζοειδή μορφή, όπως στο Σχήμα 2.24. Στη συνέχεια, το διάγραμμα της εγκάρσιας μετατόπισης υπολογίστηκε με διπλή ολοκλήρωση και με αυτόν τον τρόπο προέκυψε η εικονική επιθυμητή τροχιά (Virtual Desired Trajectory, VDT), την οποία κλήθηκε στη συνέχεια να ακολουθήσει το όχημα. Σε παρόμοιο μήκος κύματος κινήθηκαν και οι Ren et al. (2011), οι οποίοι έφραζαν την απόλυτη τιμή του lateral jerk, έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή αυτό να ισούται με  $-J_{max}$ , 0 ή  $+J_{max}$ . Κατόπιν, με διαδοχικές ολοκληρώσεις υπολογίστηκαν η επιθυμητή εγκάρσια επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του οχήματος κατά την εκτέλεση της αλλαγής λωρίδας. Με βάση την παραπάνω απαίτηση για το lateral jerk, το διάγραμμα της εγκάρσιας επιτάχυνσης προέκυψε να έχει τη μορφή δύο τραπεζίων, ενός στο αρνητικό ημιεπίπεδο που ορίζει ο οριζόντιος άξονας και ενός στο θετικό.



**Σχήμα 2.24** Το διάγραμμα της εγκάρσιας επιτάχυνσης σε μια αλλαγή λωρίδας από το οποίο προκύπτει και το lateral jerk συναρτήσει του χρόνου (Chee et al., 1995, June).

Οι Shiller & Sundar (1998) ανέπτυξαν μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της ελάχιστης απόστασης που απαιτείται, ώστε ένα όχημα να αποφύγει ένα εμπόδιο, εκτελώντας ελιγμό αλλαγής λωρίδας. Σε πρώτη φάση, καταστρώθηκε μια συνάρτηση, η οποία συσχετίζει τη διαμήκη συνιστώσα της συνολικής μετατόπισης κατά την εκτέλεση του ελιγμού, με τη δυναμική του οχήματος (vehicle dynamics), τη γωνία στροφής των τροχών και τις δυνάμεις που επιδρούν πάνω στους τελευταίους. Σε δεύτερη φάση, επιβλήθηκαν περιορισμοί στις δύο τελευταίες παραμέτρους και έγινε η παραδοχή, πως η αρχική και η τελική ταχύτητα κίνησης του οχήματος είναι γνωστές. Το πρόβλημα ανάχθηκε σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο και επιλύθηκε για να βρεθεί η συνολική διαμήκης απόσταση που απαιτείται για την αποφυγή του εμποδίου.

Οι Nilsson et al. (2015, July) εξέτασαν το σενάριο, κατά το οποίο ένα όχημα κινείται σε φάλαγγα, με προπορευόμενα και ακολουθούντα οχήματα να κινούνται παράλληλα με αυτό στην αριστερή και τη δεξιά λωρίδα. Για να αυτοματοποιήσουν τη διαδικασία αλλαγής λωρίδας ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο, ο οποίος αρχικά διερευνά αν υπάρχει κενό ανάμεσα στα οχήματα, τέτοιο ώστε το όχημα να πραγματοποιήσει αλλαγή λωρίδας, χωρίς να διαταραχθεί ιδιαίτερα η κυκλοφορία. Εάν βρεθεί τέτοιο κενό, καταστρώνονταν οι εξισώσεις της μετατόπισης και της ταχύτητας στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση, θεωρώντας ότι το όχημα εκτελεί ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση. Στη συνέχεια, οι ερευνητές έφραξαν αυτά τα δύο αυτά κινηματικά μεγέθη, όπως επίσης την επιτάχυνση και το ρυθμό μεταβολής αυτής (jerk), ώστε να μπορούν να λάβουν τιμές εντός κάποιων διαστημάτων. Έπειτα, δημιουργήθηκαν δύο συναρτήσεις κόστους, μία για τη διαμήκη και μία για την εγκάρσια διεύθυνση, οι οποίες είχαν ως παραμέτρους την επιτάχυνση και την ταχύτητα. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα καθορισμού της τροχιάς ανάχθηκε σε δύο προβλήματα βελτιστοποίησης τετραγωνικού προγραμματισμού (Quadratic Programming Optimization Problems). Τέλος, υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων, για τις οποίες ελαχιστοποιήθηκαν οι συναρτήσεις κόστους και καθορίστηκε η τροχιά που κλήθηκε να ακολουθήσει το όχημα.

Οι Sazgar et al. (2020) χρησιμοποίησαν ως παραμετρική καμπύλη αναφοράς ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού με ανεξάρτητη μεταβλητή το χρόνο, για την περιγραφή της εγκάρσιας συνιστώσας της κίνησης του οχήματος. Έπειτα, οι συντελεστές αυτού προσδιορίστηκαν με βελτιστοποίηση ως προς την ελαχιστοποίηση της αναπτυσσόμενης τριβής στο σύστημα τροχός-οδόστρωμα.



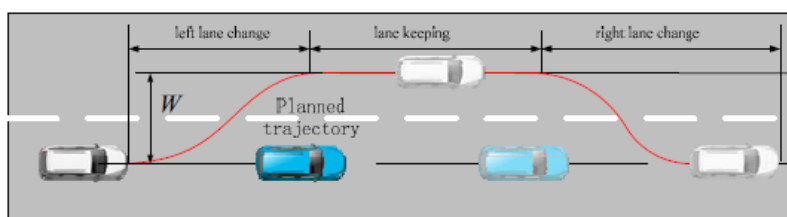
## 2.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Οι προηγούμενες ενότητες αφιερώνονται πρωτίστως στον τρόπο με τον οποίο διεξάγονται τα πειράματα συλλογής δεδομένων και τη μαθηματική περιγραφή της τροχιάς. Ως εκ τούτου, ορισμένες σημαντικές πτυχές της μεθοδολογίας δεν έχουν ακόμη αναλυθεί επαρκώς. Στο υποκεφάλαιο αυτό αναδεικνύονται οι εν λόγω πτυχές και αναλύονται διεξοδικά. Επιπλέον, παρατίθενται και αρκετές μελέτες, οι οποίες δεν είναι αμιγώς συνυφασμένες με την προσπέραση, αλλά αφορούν σε γενικότερες πτυχές της μεθοδολογίας που παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον.

### 2.4.1 Διακριτοποίηση του ελιγμού της προσπέρασης

Η προσπέραση ενός οχήματος από ένα άλλο, που κινείται στην ίδια λωρίδα κυκλοφορίας, αποτελεί ένα σύνθετο ελιγμό. Για να μελετηθεί αποτελεσματικά πρέπει να αναλύεται στα επιμέρους στοιχεία που τη συνιστούν. Είναι προφανές, πως η σκοπιά κάτω από την οποία εξετάζεται κάθε φορά η προσπέραση καθορίζει και τον τρόπο που θα πραγματοποιηθεί αυτή η διακριτοποίηση.

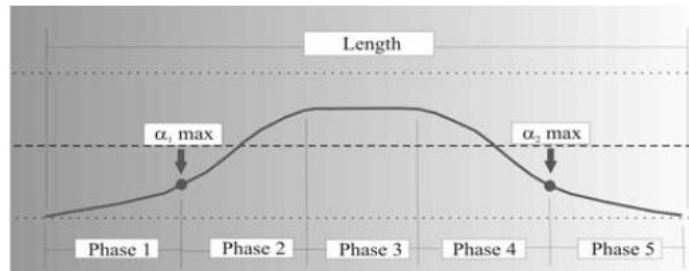
Όταν μελετάται η τροχιά που ακολουθεί ένα όχημα κατά την προσπέραση, οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν, πως ο ελιγμός αποτελείται από τρεις διακριτές και διαδοχικές φάσεις. Αρχικά, το όχημα αλλάζει λωρίδα και εισέρχεται στην παρακαίμενη αριστερή. Έπειτα, παραμένει στην αριστερή λωρίδα και κινείται σε αυτή ευθύγραμμα, έως ότου προσπεράσει το όχημα ή το εμπόδιο που βρίσκεται στη δεξιά λωρίδα. Τέλος, εκτελεί ακόμη έναν ελιγμό αλλαγής λωρίδας και επανέρχεται στην αρχική (δεξιά) λωρίδα (Zhang et al., 2013, October; Shamir, 2004; Usman & Kunwar, 2009, August; Perez et al., 2011, April; Alia et al., 2017, October; Yu et al., 2014; Petrov & Nashashibi, 2014; Naranjo et al., 2008). Στο Σχήμα 2.25 απεικονίζονται οι δύο επιμέρους ελιγμοί και η ευθύγραμμη κίνηση, που συνθέτουν την τροχιά του οχήματος που προσπερνάει.



Σχήμα 2.25 Η τροχιά ενός ελιγμού προσπέρασης και οι τρεις φάσεις από τις οποίες αποτελείται (Zhang et al., 2013, October).

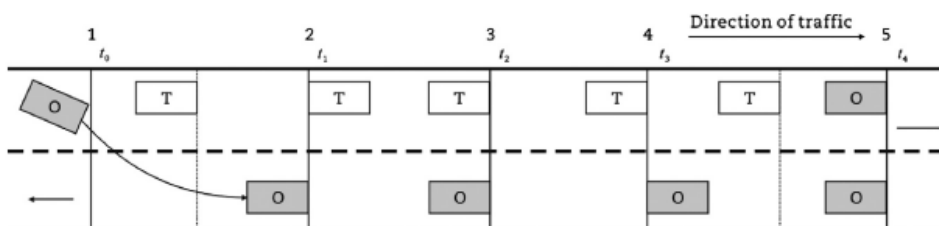
Ορισμένοι ερευνητές, όμως, διακριτοποιούν έναν ελιγμό προσπέρασης με διαφορετικό τρόπο. Οι Huang et al. (2019) δεν ανέφεραν ρητά αν και σε πόσες φάσεις διαχωρίζουν την προσπέραση. Εντούτοις, η μαθηματική έκφραση που χρησιμοποίησαν για την τροχιά του οχήματος υπονοεί, πως αγνοούν εντελώς τη δεύτερη φάση. Φαίνεται δε, πως εντάσσουν το πρώτο μισό της ευθύγραμμης κίνησης του οχήματος στο τελείωμα της πρώτης αλλαγής λωρίδας πρώτης φάσης και το δεύτερο μισό στην αρχή της δεύτερης

αλλαγής λωρίδας. Επιπλέον, οι Benedetto et al. (2006) διαχώρισαν τον ελιγμό της προσπέρασης σε πέντε επιμέρους φάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.26. Μάλιστα υποστήριξαν, πως ο κίνδυνος το όχημα να βρεθεί σε κατάσταση απώλειας πρόσφυσης (loss of skid), είναι άμεσα συσχετισμένος με τη γωνιακή απόκλιση  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$ .



Σχήμα 2.26 Οι πέντε φάσεις από τις οποίες αποτελείται η τροχιά ενός ελιγμού προσπέρασης (Benedetto et al., 2006).

Μια δεύτερη κατηγορία μελετών, η οποία εστιάζει στην ανάπτυξη μοντέλων PSD, εξετάζει τον ελιγμό της προσπέρασης από διαφορετική οπτική γωνία. Σύμφωνα με αυτές, έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζει μόνο το τμήμα του ελιγμού εκείνο, κατά το οποίο το όχημα που προσπερνάει βρίσκεται στο αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας. Οι διάφοροι ερευνητές δεν διαχωρίζουν τον ελιγμό σε φάσεις, όπως παραπάνω, αλλά αντίθετα εντοπίζουν στην τροχιά του οχήματος που προσπερνάει ορισμένα σημεία ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, οι Asaithambi & Shravani (2017) διαχώρισαν τον ελιγμό της προσπέρασης σε πέντε στάδια, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 2.27. Κάθε στάδιο ολοκληρώνεται, όταν παρατηρηθεί ένα από τα πέντε ακόλουθα γεγονότα. Το πρώτο είναι όταν το όχημα εισέρχεται στη διπλανή λωρίδα για να ξεκινήσει την προσπέραση. Το δεύτερο γεγονός πραγματοποιείται όταν οι μπροστινοί τροχοί του οχήματος που προσπερνάει έρχονται στο ίδιο ύψος με τους πίσω τροχούς του οχήματος που προσπερνάται. Το τρίτο γεγονός συμβαίνει όταν οι μπροστινοί τροχοί των δύο οχημάτων είναι στο ίδιο ύψος, ενώ το τέταρτο γεγονός είναι το αντίστροφο του δεύτερου (πίσω τροχοί με μπροστινούς). Τέλος, το πέμπτο γεγονός είναι όταν το όχημα που προσπερνάει επιστρέφει στην αρχική του λωρίδα ή συνεχίζει να κινείται στο αντίθετο ρεύμα. Ανάλογα και τη μελέτη που εξετάζεται κάθε φορά, τα πέντε αυτά σημεία ενδέχεται να παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις στον τρόπο ορισμού τους.



Σχήμα 2.27 Τα πέντε σημεία ενδιαφέροντος στη διαδικασία της προσπέρασης (Asaithambi & Shravani, 2017).

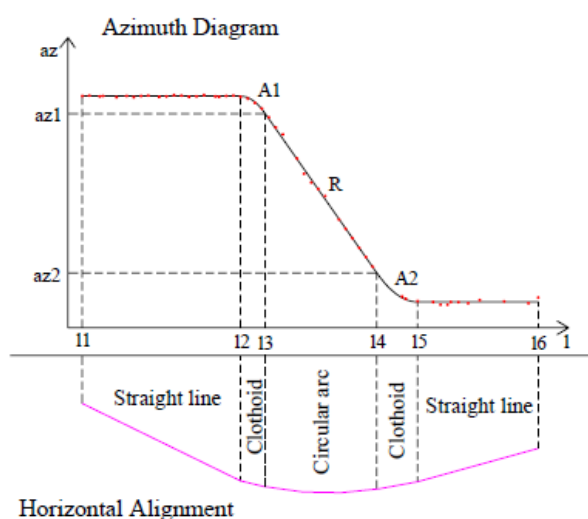
#### 2.4.2 Εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας τροχιάς

Ένα πρόβλημα που έχει μελετηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια είναι η εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των στοιχείων της οριζοντιογραφίας μιας υφιστάμενης οδού. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιείται ένα όχημα, το οποίο κινείται

στην εκάστοτε οδό που εξετάζεται και λειτουργεί ως πλατφόρμα για τα όργανα που απαιτούνται για τη μελέτη. Από μια οπτική γωνία, η τροχιά ενός οχήματος που πραγματοποιεί προσπέραση και ένας οδικός άξονας είναι ακριβώς το ίδιο πράγμα: δύο γεωμετρικές καμπύλες στο επίπεδο. Συνεπώς, η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για να εξαχθούν παράμετροι για έναν οδικό άξονα, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και για την παρούσα εργασία. Ακολούθως, παρουσιάζονται ορισμένες προσεκτικά επιλεγμένες μελέτες και αναδεικνύονται τα στοιχεία εκείνα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη μοντελοποίηση μιας τροχιάς προσπέρασης.

#### 2.4.2.1 Προσαρμογή καμπύλης στο διάγραμμα αζιμούθιων

Οι Karamanou et al. (2009) εξόπλισαν το όχημα της μελέτης με ένα δέκτη GPS διπλής συχνότητας, δύο κάμερες και μια συσκευή καταγραφής βίντεο, ενώ ο αλγόριθμος που πρότειναν απαιτεί την αμφίδρομη οδήγηση στο εκάστοτε οδικό τμήμα. Αρχικά, εξήχθη ο οδικός άξονας, ως μια αλληλουχία διαδοχικών σημείων στο επίπεδο. Έπειτα, υπολογίστηκε το αζιμούθιο και η χιλιομετρική θέση του σε κάθε σημείο και μορφώθηκε το διάγραμμα αζιμούθιων (azimuth diagram), το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.28. Σε αυτό το διάγραμμα, οι οριζόντιες ευθείες αντιστοιχούν στην οριζοντιογραφία σε ευθυγραμμίες, οι κεκλιμένες ευθείες σε κυκλικά τόξα και οι παραβολές δευτέρου βαθμού σε τόξα κλωθοειδούς καμπύλης. Σύμφωνα με τους ερευνητές, το διάγραμμα αζιμούθιων αποτελεί έναν εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο για την απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων μιας οδού, καθώς και για τον υπολογισμό των παραμέτρων τους.



Σχήμα 2.28 Το διάγραμμα αζιμούθιων ενός οδικού τμήματος και η αντίστοιχη οριζοντιογραφία (Karamanou et al., 2009).

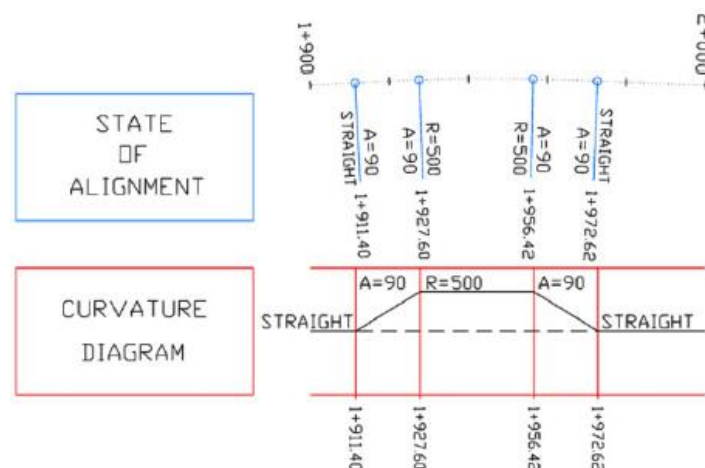
Για να εξαχθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οριζοντιογραφίας, προσαρμόστηκαν στα τρία τμήματα του γωνιακού διαγράμματος παραμετρικές εξισώσεις ευθείας, κύκλου και παραβολής. Έπειτα, υπολογίστηκαν οι άγνωστοι συντελεστές των εξισώσεων και συγκεκριμένα το αζιμούθιο της ευθυγραμμίας, η καμπυλότητα του κυκλικού τόξου και η παράμετρος της κλωθοειδούς.

Με βάση αυτούς τους συντελεστές χαράχθηκε εξ αρχής ο οδικός άξονας και συγκρίθηκε με τον οδικό άξονα που προέκυψε από τις μετρήσεις. Τέλος, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών. Η ακρίβεια, ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου, υπολογίστηκε σε 0.20m.

#### 2.4.2.2 Προσαρμογή καμπύλης στο διάγραμμα καμπυλότητας

Σε παρόμοιο μήκος κύματος κινήθηκαν και οι Holgado-Barco et al. (2015), οι οποίοι εξόπλισαν το όχημα της μελέτης με διάφορα όργανα. Μεταξύ άλλων, ένα GNSS χρησιμοποιήθηκε για πλοήγηση και διέθετε ακρίβεια 0.02m σε οριζόντιο επίπεδο, όταν οι συνθήκες λήψης του σήματος ήταν καλές. Επιπλέον, μια διάταξη LiDAR χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των δύο οριογραμμών του οδοστρώματος. Με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και με γεωμετρικές διαδικασίες εξήχθη ο άξονας της οδού, ως μια αλληλουχία διαδοχικών σημείων.

Για κάθε σημείο του άξονα υπολογίστηκε το αζιμούθιο και μορφώθηκε το σχετικό διάγραμμα. Επειδή, όμως, οι μετρήσεις εμπειρίχαν σφάλμα, το οποίο μεταφερόταν (propagates) με τις μαθηματικές πράξεις και στα επόμενα στάδια της μεθοδολογίας, χρησιμοποιήθηκε ένα anti-aliasing φίλτρο για την εξομάλυνση του γωνιακού διαγράμματος. Το φίλτρο αυτό αποτελείται από μια καμπύλη παλινδρόμησης με τοπικό συντελεστή βάρους. Έπειτα, για κάθε σημείο του οδικού άξονα υπολογίστηκε η καμπυλότητα, με τη χρήση των εξομαλυσμένων δεδομένων του αζιμούθιου και μορφώθηκε το διάγραμμα καμπυλότητας. Αυτό απεικονίζει τη συνάρτηση της καμπυλότητας, με ανεξάρτητη μεταβλητή το μήκος του οδικού άξονα και η αντιστοιχία του με την οριζοντιογραφία ενός οδικού τμήματος διακρίνεται στο Σχήμα 2.29. Συγκεκριμένα, οι ευθείες που ταυτίζονται με τον οριζόντιο άξονα αντιστοιχούν σε ευθυγραμμίες, οι υπόλοιπες οριζόντιες ευθείες σε κυκλικά τόξα και οι κεκλιμένες ευθείες σε τόξα κλωθειδούς.

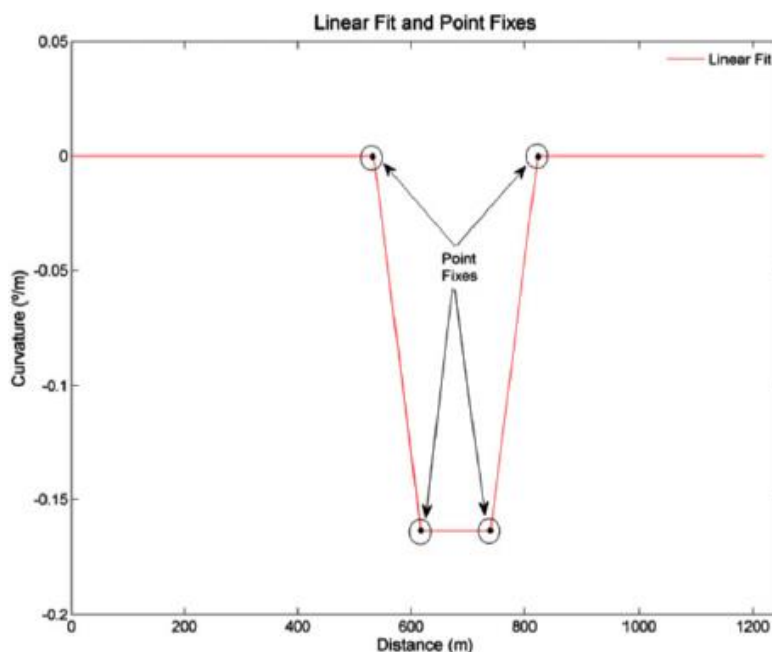


Σχήμα 2.29 Διαχωρισμός των γεωμετρικών στοιχείων μιας οδού με βάση το διάγραμμα καμπυλότητας (Holgado-Barco et al., 2015).

Οι ερευνητές πρότειναν το διάγραμμα καμπυλότητας για την εύρεση των παραμέτρων της οριζοντιογραφίας και όχι το διάγραμμα αζιμούθιων, επειδή το πρώτο απεικονίζει όλα τα γεωμετρικά στοιχεία ως ευθείες γραμμές και έτσι είναι πιο διαισθητικό (intuitive) στην κατανόηση. Κατόπιν, επιλέχθηκε ένα όριο  $\pm 0.005^\circ/\text{m}$ , επειδή αυτή η

τιμή αντιστοιχεί σε ακτίνα καμπυλότητας που δεν συναντάται στις τεχνικές προδιαγραφές του γεωμετρικού σχεδιασμού της οδού. Όλα τα τμήματα του διαγράμματος, τα οποία είχαν καμπυλότητα μικρότερη από αυτήν την οριακή τιμή, κατηγοριοποιήθηκαν ως ευθυγραμμίες. Για τον εντοπισμό των κυκλικών τόξων της οδού μορφώθηκε το ιστόγραμμα καμπυλοτήτων, του οποίου η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στην καμπυλότητα του αντίστοιχου κυκλικού τόξου. Ακολούθως, υπολογίστηκε η ακτίνα καμπυλότητας του κυκλικού τόξου, ως το αντίστροφο της καμπυλότητας. Τα εναπομείναντα τμήματα του διαγράμματος, που δεν είχαν κατηγοριοποιηθεί ακόμα, αποτελούσαν τα τμήματα των κλωθοειδών.

Η παράμετρος μιας κλωθοειδούς, η οποία και υπολογίστηκε, είναι συνάρτηση του μήκους της και της ακτίνας καμπυλότητας του παρακείμενου κυκλικού τόξου. Για την εύρεση του μήκους της κλωθοειδούς, αρχικά προσαρμόστηκε σε εκείνες τις τιμές της καμπυλότητας ένα γραμμικό μοντέλο, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Έπειτα, επισημάνθηκαν τα σημεία στα οποία η ευθεία αυτή έτεμνε τις ήδη χαραγμένες οριζόντιες γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούσαν στις ευθυγραμμίες και το κυκλικό τόξο. Τέλος, η απόσταση ανάμεσα σε αυτά τα σημεία τομής αποτέλεσε και το μήκος του τόξου συναρμογής. Η παραπάνω μέθοδος απεικονίζεται με λεπτομέρεια στο Σχήμα 2.30 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.30 Παράδειγμα απομόνωσης των τόξων συναρμογής από τα υπόλοιπα στοιχεία ενός οδικού τμήματος (Holgado-Barco et al., 2015).

#### 2.4.2.3 Προσαρμογή καμπύλης στην οριζοντιογραφία

Οι Apostoleris et al. (2013) αναζήτησαν τοποθεσίες στο ελληνικό οδικό δίκτυο, οι οποίες παρουσίαζαν σημαντικές αποκλίσεις από τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών της Ελλάδας, της Γερμανίας και των ΗΠΑ. Για τη μελέτη χρησιμοποίησαν ένα όχημα εξοπλισμένο με όργανα, τα οποία κατέγραφαν το όριο στη μία πλευρά της οδού, κάθε 3-5m. Κάθε οδικό τμήμα διατρέχτηκε και προς τις δύο κατευθύνσεις και

εξήχθη ο άξονας της οδού, ως το μεσαίο σημείο των δύο άκρων. Έπειτα, μορφώθηκαν η οριζοντιογραφία και το διάγραμμα αζιμούθιων.

Οι ερευνητές εκτίμησαν τις ακτίνες των κυκλικών τόξων, αρχικά με τη βοήθεια του γωνιακού διαγράμματος. Σε δεύτερη φάση, χρησιμοποίησαν το σχέδιο της οριζοντιογραφίας της οδού και στατιστικές μεθόδους. Συγκεκριμένα, διερεύνησαν ποιο κυκλικό τόξο προσαρμοζόταν καλύτερα στα δεδομένα των μετρήσεων, με βάση τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Δυστυχώς, δεν αναφέρεται ποια από τις δύο προσεγγίσεις βρέθηκε να είναι η βέλτιστη. Παρόλα αυτά επισημάνθηκε, πως περίπου το 10% των ακτίνων που εκτιμούνταν (στο ποσοστό συμπεριλαμβάνονταν και ακτίνες κατακόρυφης καμπυλότητας που εξετάζονταν παράλληλα) απέκλιναν σημαντικά από τα δεδομένα των μετρήσεων. Η απόκλιση αυτή ήταν ιδιαίτερα έκδηλη σε περιοχές με ανακάμπτοντες ελιγμούς.

#### 2.4.3 Διαφορά της ταχύτητας των δύο οχημάτων κατά την προσπέραση

Οι Manromatis et al. (2019) διεξήγαγαν ένα οδικό πείραμα, για να αξιολογήσουν την απόδοση ενός υπάρχοντος δυναμικού μοντέλου στην εξαγωγή αποστάσεων ορατότητας για προσπέραση. Στις μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν, εκτελέστηκαν πολλοί ελιγμοί προσπέρασης ανάμεσα σε δύο οχήματα εφοδιασμένα με κατάλληλα όργανα. Το όχημα που προσπερνούνταν κινούνταν με σταθερή ταχύτητα, κατά μια ποσότητα  $\Delta V$  μικρότερη από το όριο ταχύτητας. Το όχημα που προσπερνούσε ξεκινούσε τον ελιγμό έχοντας την ίδια ταχύτητα με το μπροστινό όχημα και σταδιακά επιτάχυνε, έως ότου αποκτούσε τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα της οδού. Έπειτα, ολοκλήρωνε την προσπέραση κινούμενο με σταθερή ταχύτητα. Εξετάστηκαν τρία σενάρια, με το όχημα που προσπερνούνταν να κινείται με 10, 20 και 30km/h χαμηλότερα από το εκάστοτε όριο ταχύτητας της οδού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν, πως η κυρίαρχη παράμετρος που επηρεάζει την PSD ήταν η ποσότητα  $\Delta V$ . Μάλιστα οι ερευνητές παρατήρησαν, πως η διαθέσιμη PSD δεν επαρκούσε σε όλες τις περιπτώσεις και οι προσπεράσεις δεν είναι αποδεκτές, κάτι που συνέβαινε κυρίως όταν η  $\Delta V$  ήταν μικρότερη από 20km/h.

Στην τελευταία έκδοση των οδηγιών για το γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών, ο AASHTO επικαιροποίησε τις παραδοχές του μοντέλου PSD, καθώς αυτές βασίζονταν σε πεπαλαιωμένα και άρα παρωχημένα δεδομένα από οδικά πειράματα. Συγκεκριμένα, το όχημα που προσπερνάται θεωρείται πως κινείται με σταθερή ταχύτητα και η διαφορά της ταχύτητάς του από αυτήν του οχήματος που προσπερνάει καθορίζεται στα 19km/h (AASHTO, 2018). Η τιμή αυτή θεωρείται ίδια για όλα τα όρια ταχύτητας και είναι αυξημένη σε σχέση με την παλαιότερη θεώρηση των ίδιων οδηγιών, οι οποίες καθόριζαν τη διαφορά της ταχύτητας στα 16km/h (AASHTO, 2011). Η αναθεωρημένη τιμή είναι πιο κοντά και στην τιμή που πρότειναν οι Llorca et al. (2014), οι οποίοι καταγράφοντας τους ελιγμούς από το όχημα που προσπερνάται προσδιόρισαν τη διαφορά της ταχύτητας στα 20km/h κατά την εκτέλεση μονών προσπεράσεων.

Παρόλα αυτά, ορισμένοι ερευνητές θεωρούν, πως η διαφορά της ταχύτητας μεταξύ του προπορευόμενου οχήματος και του οχήματος που προσπερνάει δεν είναι ίδια για όλες

τις ταχύτητες κίνησης. Αντίθετα, όταν το όχημα που προσπερνάται κινείται πιο γρήγορα, η διαφορά των ταχυτήτων τείνει να μειώνεται (Polus et al., 2000; Carlson et al., 2006).

#### 2.4.4 Εξομάλυνση των δεδομένων που συλλέγονται σε πειράματα πεδίου

Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται στο πεδίο εμπεριέχουν ένα σφάλμα μέτρησης, το οποίο εκτός άλλων παραγόντων εξαρτάται και από την ακρίβεια του οργάνου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση. Όταν αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται σε μια μελέτη ως έχουν, το σφάλμα μεταφέρεται και στις παράγωγες μεταβλητές και ενέχει ο κίνδυνος τα τελικά αποτελέσματα της μελέτης να μην είναι αξιόπιστα. Ως εκ τούτου, αρκετοί ερευνητές επιλέγουν να υποβάλλουν τα δεδομένα από τα πειράματα πεδίου σε μια πρωταρχική επεξεργασία, ώστε να βελτιώσουν την ποιότητά τους και ύστερα να τα ενσωματώσουν στη διαδικασία της κυρίως ανάλυσης.

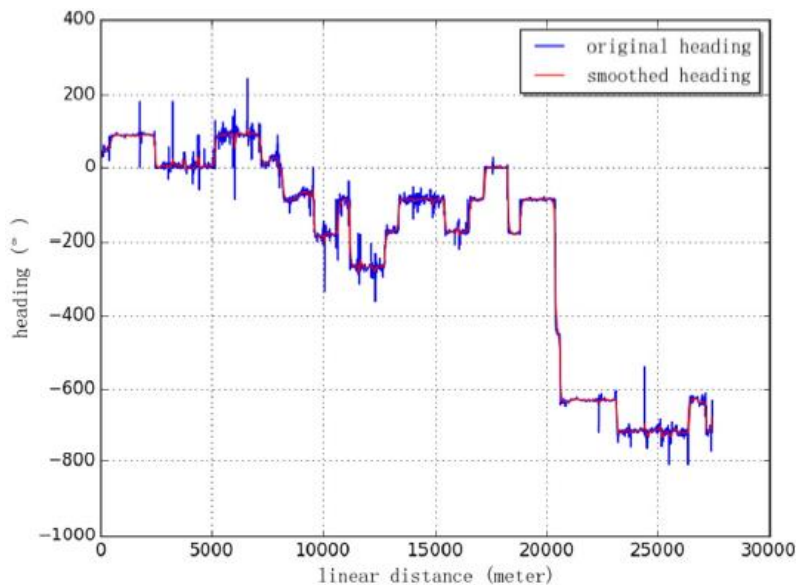
Οι Vu et al. (2013) διέκριναν δύο ειδών διεργασίες (operations). Από τη μία είναι η εξομάλυνση (smoothing), η οποία είναι μη αιτιώδης και πραγματοποιείται εκτός δικτύου (offline). Για να εκτιμηθεί η ζητούμενη μεταβλητή χρησιμοποιούνται μετρήσεις από το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον, ως προς την εκάστοτε χρονική στιγμή που εξετάζεται. Από την άλλη μεριά, το φιλτράρισμα (filtering) είναι μια αιτιώδης διεργασία, η οποία μπορεί να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο. Για την εκτίμηση της ζητούμενης μεταβλητής χρησιμοποιούνται μετρήσεις μόνο από το παρελθόν και το παρόν, δηλαδή έως και τη χρονική στιγμή που εξετάζεται κάθε φορά. Σύμφωνα με τους ερευνητές αυτούς, οι τροχιές οχημάτων που έχουν εξομαλυνθεί έχουν μικρότερη αβεβαιότητα και μεγαλύτερη ακρίβεια από τις τροχιές που έχουν φιλτραριστεί.

Οι Ossen & Hoogendoorn (2008) αξιολόγησαν την επίδραση του σφάλματος μέτρησης στην ποιότητα των υπολογιζόμενων παραμέτρων ενός μοντέλου ακολουθούστος οχήματος (car-following model), χρησιμοποιώντας ως δεδομένα ένα πακέτο δεδομένων που εμπεριείχαν θόρυβο και το ίδιο πακέτο δεδομένων, κατόπιν εξομάλυνσης. Η σύγκριση φανέρωσε μια σαφή ποιοτική βελτίωση των παραμέτρων που εκτιμούνταν, όταν χρησιμοποιούνταν στα δεδομένα ο αλγόριθμος εξομάλυνσης. Ωστόσο, οι ερευνητές προειδοποίησαν, πως η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου εξομάλυνσης είναι σημαντικό να γίνεται με προσοχή. Το σφάλμα μέτρησης πρέπει να απομακρύνεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό, χωρίς όμως να αλλοιώνεται το δυναμικό αποτύπωμα (vehicle dynamics) των δύο οχημάτων που εξετάζονται. Σε αντίθετη περίπτωση, δε βαθμονομούνται σωστά οι παράμετροι και υπεισέρχεται στη μεθοδολογία μία επιπρόσθετη πηγή σφαλμάτων.

Οι Thiemann et al. (2008) χρησιμοποίησαν τα δεδομένα του NGSIM για τη μελέτη του ελιγμού αλλαγής λωρίδας από μια δυναμική σκοπιά. Η μεθοδολογία τους περιλάμβανε την εξαγωγή της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, μεταβλητές που υπολογίστηκαν με παραγωγή της θέσης των οχημάτων. Μιας και τα δεδομένα που παρέχονταν είναι αφιλτράριστα, τέθηκε το καίριο ερώτημα, που είχε να κάνει με το ποια θα ήταν η αλληλουχία των παραγωγίσεων και των εξομαλύνσεων. Οι ερευνητές κατέληξαν, πως οι πρωτότυπες (original) τροχιές αναπαράγονταν καλύτερα, αν υπολογίζονταν πρώτα η

ταχύτητα και η επιτάχυνση και έπειτα λάμβανε χώρα η εξομάλυνση και για τις τρεις αυτές μεταβλητές.

Ορισμένες φορές τα σφάλματα στα πειράματα πεδίου δεν οφείλονται στα όργανα συλλογής δεδομένων, αλλά στην τοποθεσία που λαμβάνουν χώρα οι μετρήσεις. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο προσδιορισμός της θέσης ενός οχήματος, με τη χρήση GNSS. Οι Wang et al. (2017) επισήμαναν το πολύ σημαντικό πρόβλημα της πολλαπλής διαδρομής σήματος (multipath), το οποίο εγείρεται όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε σημεία του αστικού ιστού με υψηλά κτίρια πλησίον της οδού. Καθώς το σήμα των δορυφόρων ανακλάται πολλές φορές στις κατακόρυφες επιφάνειες προτού φτάσει στο δέκτη, στα δεδομένα της τροχιάς του οχήματος εισάγονται αποκλίσεις, οι οποίες κατανομούνται τυχαία γύρω από τα στίγματα εντοπισμού. Οι ερευνητές επιθυμούσαν να εξάγουν τα σημεία, στα οποία το όχημα έστριβε σε κάποιο κόμβο και για να το πετύχουν, μόρφωσαν ένα διάγραμμα αζιμούθιων. Επειδή, όμως, στο διάγραμμα αυτό εμφανίζονταν αλλαγές προσανατολισμού, που οφείλονταν τόσο σε στροφές του οχήματος όσο και στο φαινόμενο του multipath, έγινε εμφανής η ανάγκη για εξομάλυνση των δεδομένων. Η διάκριση μεταξύ των δύο βασίζεται στη διαπίστωση, πως τα σφάλματα της πολλαπλής διαδρομής σήματος έχουν υψηλή συχνότητα εμφάνισης, ενώ οι πραγματικές στροφές που εκτελεί το όχημα συμβαίνουν πολύ πιο σπάνια. Το διάγραμμα αζιμούθιων, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου εξομάλυνσης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.31.



Σχήμα 2.31 Εξομάλυνση των δεδομένων στο διάγραμμα αζιμούθιων (Wang et al., 2017).

Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι για εξομάλυνση των δεδομένων από μετρήσεις πεδίου. Φίλτρα που χρησιμοποιούνται συχνά είναι ο κινητός μέσος όρος (Ossen & Hoogendoorn, 2008), ο εκθετικός κινητός μέσος όρος (Thiemann et al., 2008) και ο μέσος όρος με συντελεστή βάρους ως προς την απόσταση (Wang et al., 2017). Επιπλέον, μια αύξηση κατά  $n$  του χρονικού βήματος της διαφορίσης αποτελεί ουσιαστικά ένα εναλλακτικό φίλτρο, διαφορετικής φύσης βέβαια από αυτά που αναφέρονται παραπάνω (Thiemann et al., 2008). Αν θεωρηθεί το παράδειγμα υπολογισμού της ταχύτητας  $v$  ενός οχήματος, με γνωστή τη θέση του  $v$  για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , η εξίσωση γράφεται ως εξής:



$$v(t) = \frac{x(t + n \cdot dt) - x(t - n \cdot dt)}{2 \cdot n \cdot dt} \quad (2.10)$$

## 2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη βιβλιογραφική έρευνα ανακύπτουν οι πολλές και ενδιαφέρουσες πτυχές της μοντελοποίησης του ελιγμού της προσπέρασης. Επιπλέον είναι ξεκάθαρο, πως το πρόβλημα αυτό απασχολεί την επιστημονική κοινότητα εδώ και αρκετά χρόνια. Στις παραγράφους που ακολουθούν συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της ανασκόπησης και χαράσσονται ορισμένες κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα.

Όταν σε ένα πείραμα προσομοιάζονται πιο ρεαλιστικά οι καταστάσεις που μελετώνται, τα αποτελέσματα που εξάγονται έχουν μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας. Επομένως, το βέλτιστο είναι να συλλέγονται τα δεδομένα των προσπεράσεων απευθείας στο πεδίο, με την πραγματοποίηση ενός κατάλληλα σχεδιασμένου πειράματος. Σε ορισμένα πειράματα χρησιμοποιείται ένα όχημα, εξοπλισμένο με τα κατάλληλα όργανα, το οποίο οι ερευνητές οδηγούν σε κάποιο αστικό αυτοκινητόδρομο. Η συλλογή πραγματοποιείται δίχως υπόλοιποι χρήστες της οδού να είναι ενήμεροι για την καταγραφή. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν κυρίως στον ελιγμό αλλαγής λωρίδας και για το λόγο αυτό συλλέγονται δεδομένα, τα οποία αφορούν στη θέση και την ταχύτητα όλων των οχημάτων που κινούνται γύρω από το όχημα της μελέτης. Μια άλλη κατηγορία περιλαμβάνει τα πειράματα πεδίου, που πραγματοποιούνται με σκοπό την ανάπτυξη μοντέλων PSD. Σε αυτά καταγράφεται η θέση και η ταχύτητα μόνο τριών οχημάτων, αυτού που προσπερνάει, αυτού που προσπερνάται και αυτού που κινείται στο αντίθετο ρεύμα. Ο κοινός παρονομαστής όλων των παραπάνω είναι, πως η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται εν αγνοία των υπόλοιπων χρηστών της οδού.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της συγκριμένης μεθόδου είναι η διασφάλιση της αμεροληψίας του στατιστικού δείγματος των ελιγμών. Ωστόσο αυτό θέτει ορισμένους περιορισμούς, με την έννοια ότι όλα τα όργανα καταγραφής πρέπει να βρίσκονται στο όχημα του πειράματος ή σε κάποιο σταθερό σημείο παρατήρησης. Εκεί έγκειται και η ευρεία χρήση συσκευών βιντεοσκόπησης από τους ερευνητές.

Μια μέθοδος, η οποία βρίσκει μεγάλη εφαρμογή σε προβλήματα που απαιτούν τον καθορισμό τροχιών, αλλά δεν έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη προσπεράσεων είναι η καταγραφή της θέσης των οχημάτων με συσκευές GNSS. Το γεγονός αυτό δεν προκαλεί εντύπωση, δεδομένου πως η χρήση τέτοιων οργάνων απαιτεί την εκ των προτέρων τοποθέτηση συσκευών και στα δύο οχήματα που συμμετέχουν στην προσπέραση. Παρόλα αυτά, τα GNSS διαθέτουν πολύ καλή ακρίβεια, είναι εύκολα στην εγκατάσταση και γενικά φαίνεται πως αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση.

Στην αντίπερα όχθη βρίσκονται τα πειράματα σε προσομοιωτή, τα οποία τα τελευταία χρόνια έχουν αποκτήσει μεγάλη δυναμική, καθώς η τεχνολογία στον τομέα αυτό έχει σημειώσει άλματα. Πλέον, με τα κατάλληλα λογισμικά μπορούν να μελετηθούν τα πλέον περίπλοκα οδηγικά σενάρια και ο ελιγμός της προσπέρασης δεν αποτελεί εξαίρεση. Ωστόσο, η επιλογή της χρήσης προσομοιωτή οδήγησης έναντι της διεξαγωγής

πειράματος στο πεδίο, εκτός από πλεονεκτήματα ενέχει και ορισμένες παγίδες. Ο εκάστοτε συμμετέχων στο πείραμα πρέπει να αγνοήσει το γεγονός ότι βρίσκεται σε προστατευόμενο περιβάλλον και να οδηγήσει με όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό τρόπο. Σε αντίθετη περίπτωση, τα αποτελέσματα της μελέτης κινδυνεύουν να μην είναι αξιόπιστα. Αυτή η διαπίστωση υπογραμμίστηκε από τους Llorca & Farah (2016), οι οποίοι διερεύνησαν την προσπέραση και χρησιμοποίησαν δύο βάσεις δεδομένων, μία από πείραμα στο πεδίο και μία από πείραμα στον προσομοιωτή. Επιβεβαίωσαν την ερευνητική υπόθεση, πως οι οδηγοί στον προσομοιωτή επιδεικνύουν μια πιο ριψοκίνδυνη οδηγική συμπεριφορά, πιθανώς εξαιτίας της έλλειψης πραγματικού κινδύνου.

Η εύρεση παραμέτρων για μαθηματικές εκφράσεις της τροχιάς του οχήματος κατά την προσπέραση, που να βασίζεται σε δεδομένα από πραγματικούς ελιγμούς είναι ένα θέμα που δεν έχει μελετηθεί σχεδόν καθόλου. Τα πειράματα εστιάζουν, κατά κύριο λόγο, στον καθορισμό σχέσεων για την απόσταση ορατότητας για προσπέραση. Όπως αναλύθηκε, η μαθηματική έκφραση της τροχιάς καλό θα ήταν να είναι μια συνάρτηση με συνεχή καμπυλότητα και μία περίπτωση καμπύλης που πληροί αυτήν την προϋπόθεση είναι η κλωθοειδής. Μέχρι σήμερα, καμία μελέτη δεν έχει επιχειρήσει την εκτίμηση παραμέτρων για κλωθοειδείς καμπύλες, βασιζόμενη σε πειραματικά δεδομένα.

Μελετώντας τα πρωτόκολλα των πειραμάτων που έχουν διενεργηθεί, ανάγονται ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά, μια βάση δεδομένων πρέπει να περιέχει αρκετά μεγάλο αριθμό καταγεγραμμένων προσπεράσεων, ώστε να θεωρείται επαρκής για στατιστικές αναλύσεις. Το στατιστικό δείγμα των μελετών που παρατίθενται στην παρούσα ανασκόπηση αποτελείται από 234 έως 1,158 ελιγμούς. Το εύρος αυτό είναι ενδεικτικό και σε καμία περίπτωση δεσμευτικό, αλλά σε γενικές γραμμές ισχύει το δόγμα “όσο περισσότερο, τόσο το καλύτερο”. Επιπλέον, η συχνότητα συλλογής δεδομένων στα περισσότερα πειράματα πεδίου ή προσομοιωτή ανέρχεται περίπου στα 10Hz, αριθμός που κρίνεται ικανοποιητικός για την εξαγωγή αποτελεσμάτων υψηλής ακρίβειας. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται εθελοντές οδηγοί, στο όχημα του πειράματος επιβαίνει και ένα άτομο από την ερευνητική ομάδα. Ο τελευταίος επιβλέπει τον οδηγό και του δίνει οδηγίες, ώστε να τηρείται το πρωτόκολλο του πειράματος. Επιπλέον, σημειώνει προσεγγιστικά την ώρα εκτέλεσης του κάθε ελιγμού, καθώς έχει διαπιστωθεί, πως με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζονται πιο εύκολα μέσα στον τεράστιο όγκο δεδομένων οι τροχιές ενδιαφέροντος.

Αφού καταγραφούν τα δεδομένα, ακολουθεί η διαδικασία της επεξεργασίας. Οι περισσότεροι ερευνητές επιλέγουν να εξομαλύνουν τις τιμές των μεταβλητών που έχουν συλλέξει, για να απομακρυνθούν τα σφάλματα της μέτρησης. Έπειτα, οι ελιγμοί προσπέρασης εντοπίζονται και απομονώνονται, ώστε να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμοι. Εξάλλου, η ανάλυση γίνεται ξεχωριστά για τον κάθε ένα και σε δεύτερο χρόνο πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία. Όσον αφορά στον τρόπο με τον οποίο καθορίζονται τα σημεία αρχής και τέλους της προσπέρασης, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι πάντα αλγοριθμική. Οι ερευνητές επιλέγουν διάφορα κριτήρια, τα οποία βασίζονται στην εγκάρσια θέση του οχήματος, στην εγκάρσια ταχύτητα, στην εγκάρσια επιτάχυνση ή στον προσανατολισμό του. Μάλιστα, δεν είναι απαγορευτικό να χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια, για καλύτερα αποτελέσματα. Πάντως, δεν έχει διαπιστωθεί κάποια συνήθης πρακτική και επαφίεται στον κάθε ερευνητή να επιλέξει τον τρόπο που επιθυμεί.

Τέλος, οι μελέτες που επιχειρούν την προσαρμογή καμπυλών σε υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιούν στην πλειοψηφία τους τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Όταν η επιλεγμένη καμπύλη διαθέτει απλή αναλυτική έκφραση, η παλινδρόμηση πραγματοποιείται απευθείας στα δεδομένα της τροχιάς. Σε αντίθετη περίπτωση, για την παλινδρόμηση χρησιμοποιούνται διαγράμματα κάποιας παραγώγου της τροχιάς ή κάποιας άλλης μεταβλητής. Ένα πολύ βολικό διάγραμμα, ειδικά στην περίπτωση που εξετάζονται κλωθοειδείς καμπύλες, αποτελεί το διάγραμμα αζιμούθιων και το διάγραμμα καμπυλότητας.

### 3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το κεφάλαιο αυτό αφορά στην καταγραφή, επεξήγηση και παρουσίαση του μαθηματικού υποβάθρου για όλες τις θεωρητικές έννοιες και μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Ειδικότερα, στην ενότητα 3.1 πραγματοποιείται η εξοικείωση με την κλωθοειδή καμπύλη ως ανεξάρτητο γεωμετρικό στοιχείο και δίνονται ο ορισμός και οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το μαθηματικό χειρισμό της. Στην ενότητα 3.2 παρουσιάζεται η κλωθοειδής ως βασικό συστατικό στοιχείο ορισμένων διαδεδομένων οριζοντιογραφικών καμπυλών που αναφέρονται σε μετέπειτα κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, στην ενότητα 3.3 επιχειρείται μια πλήρης και εκ βάθρων μαθηματική θεμελίωση του διαγράμματος αζιμούθιων, καθώς παρατηρήθηκε μια έλλειψη στη σχετική βιβλιογραφία. Τέλος, η ενότητα 3.4 είναι αφιερωμένη στις διάφορες μεθόδους δορυφορικού εντοπισμού και στην εξοικείωση με πολλές σύνθετες έννοιες και πρακτικές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

#### 3.1 ΚΛΩΘΟΕΙΔΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗ

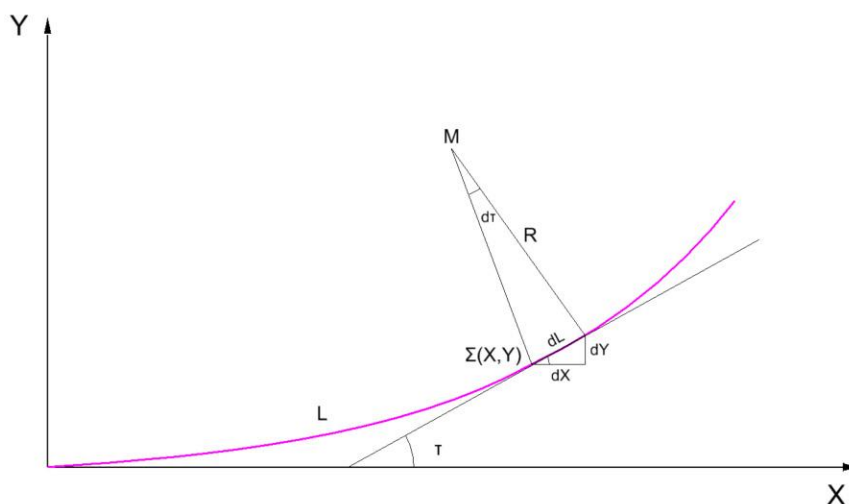
Τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία που συνιστούν την οριζοντιογραφία μιας οδού είναι η ευθυγραμμία και το κυκλικό τόξο, ανάμεσα στα οποία παρεμβάλλεται συνήθως ένα τόξο συναρμογής. Για να είναι άνετη η οδήγηση, καθώς το όχημα διανύει το τόξο συναρμογής, η εφαπτομενική του ταχύτητα πρέπει να παραμένει σταθερή και η γωνιακή του ταχύτητα να μεταβάλλεται ομαλά με το χρόνο (Κανελλαΐδης και συν., 2017). Με βάση τις δύο αυτές θεμελιώδεις απαιτήσεις και τη γεωμετρία της τροχιάς του οχήματος σε ένα τυχόν σημείο της  $\Sigma$ , όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 3.1* προκύπτει:

$$v = \frac{dL}{dt} = C_1 \quad (3.1)$$

, όπου:  $v$  (m/s) η εφαπτομενική ταχύτητα του οχήματος,  
 $dL$  (m) το στοιχειώδες μήκος που διανύει το όχημα,  
 $dt$  (s) το στοιχειώδες χρονικό διάστημα,  
 $C_1$  σταθερά, και:

$$\omega = \frac{d\tau}{dt} = C_2 \cdot t \quad (3.2)$$

, όπου:  $\omega$  (rad/s) η γωνιακή ταχύτητα του οχήματος,  
 $d\tau$  (rad) η στοιχειώδης γωνία που διαγράφει το όχημα,  
 $dt$  (s) το στοιχειώδες χρονικό διάστημα,  
 $t$  (s) η χρονική στιγμή όταν το όχημα βρίσκεται στο σημείο  $\Sigma$ ,  
 $C_2$  σταθερά.



Σχήμα 3.1 Τμήμα μιας κλωθειδούς καμπύλης και ένα τυχόν σημείο Σ πάνω σε αυτή (Κανελλαΐδης και συν., 2017).

Είναι γνωστό από τη φυσική, πως:

$$v = \frac{L}{t} \Leftrightarrow t = \frac{L}{v} \quad (3.3)$$

, όπου: L (m) το μήκος που έχει διανύσει το όχημα όταν βρίσκεται στο σημείο Σ.

Συνεπώς, μέσω της 3.3, η 3.2 συνεπάγεται:

$$\frac{d\tau}{dt} = C_2 \cdot \frac{L}{v} \Leftrightarrow d\tau = dt \cdot C_2 \cdot \frac{L}{v} \quad (3.4)$$

Επιπλέον, μέσω της 3.1, η 3.4 συνεπάγεται:

$$d\tau = \frac{dL}{C_1} \cdot C_2 \cdot \frac{L}{C_1} \Leftrightarrow d\tau = \frac{1}{C_1^2} \cdot C_2 \cdot L \cdot dL \quad (3.5)$$

Όμως, από το Σχήμα 3.1 και τη γεωμετρία ισχύει:

$$dL = R \cdot d\tau \Leftrightarrow d\tau = \frac{dL}{R} \quad (3.6)$$

Συνεπώς, μέσω της 3.6, η 3.5 συνεπάγεται:

$$\frac{dL}{R} = \frac{C_2}{C_1^2} \cdot L \cdot dL \Leftrightarrow \frac{1}{R} = \frac{C_2}{C_1^2} \cdot L \quad (3.7)$$

Στη θέση του πηλίκου των σταθερών,  $C_2/C_1^2$ , τοποθετείται μια νέα αυθαίρετη σταθερά, έστω C, οπότε η 3.7 μετασχηματίζεται:

$$\frac{1}{R} = C \cdot L \Leftrightarrow \frac{1}{C} = R \cdot L \quad (3.8)$$

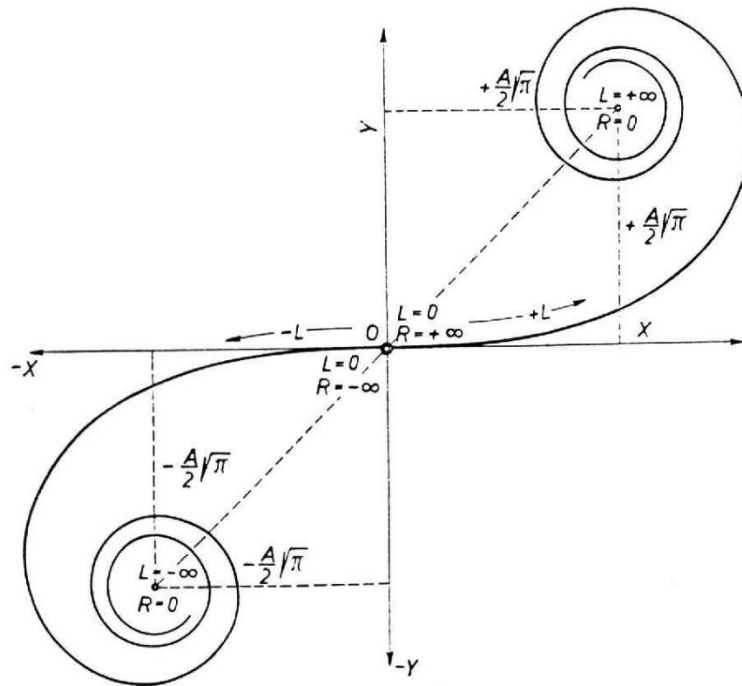
Στη θέση της σταθεράς  $1/C$  τοποθετείται μια νέα σταθερά, έστω  $A^2$ , οπότε η 3.8 παίρνει τη μορφή:

$$A^2 = R \cdot L \quad (3.9)$$

, η οποία αποτελεί τη μαθηματική έκφραση της ζητούμενης καμπύλης του τόξου συναρμογής. Η γεωμετρική αυτή καμπύλη δεν είναι άλλη από την κλωθοειδή. Στη σχέση 3.9 συνδέονται τα εξής μεγέθη:

- A (m) η παράμετρος της κλωθοειδούς,
- R (m) η ακτίνα καμπυλότητας στο πέρας του τόξου της κλωθοειδούς,
- L (m) το μήκος του τόξου της κλωθοειδούς.

Η ιδιαίτερη αυτή ονομασία προσδόθηκε στην καμπύλη από τον Ernesto Cesàro το 1886 και προέρχεται από την Κλωθώ, τη νεότερη από τις τρεις Μοίρες της Ελληνικής μυθολογίας, η οποία έκλωθε με τη ρόκα της το νήμα της ζωής του κάθε ανθρώπου, κίνηση στην οποία προσομοιάζει η γραφική παράσταση της κλωθοειδούς, καθώς τυλίγεται γύρω από τα δύο ασυμπτωτικά σημεία της (Levien, 2008, p. 10). Η καμπύλη είναι γνωστή και με τις ονομασίες “Σπείρα του Euler” και “Σπείρα του Cornu”. Ωστόσο, έχει επικρατήσει η καμπύλη να αποκαλείται απλώς “κλωθοειδής”. Το πλήρες ανάπτυγμα της καμπύλης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2 και είναι προφανές, πως ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή χρησιμοποιείται και ένα μόνο τμήμα της.



Σχήμα 3.2 Το πλήρες ανάπτυγμα της κλωθοειδούς καμπύλης (Kasper et al., 1956).

Αν η 3.9 γραφτεί στην ισοδύναμη μορφή:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{A^2} \cdot L \quad (3.10)$$

, διαφαίνεται και η χαρακτηριστική ιδιότητα της κλωθοειδούς, δηλαδή πως η καμπυλότητά της ( $1/R$ ) είναι γραμμική συνάρτηση του μήκους της και μάλιστα με συντελεστή αναλογίας  $1/A^2$ . Κατά συνέπεια, με τη χρήση της κλωθοειδούς επιτυγχάνεται η

ομαλή μετάβαση από μια ευθυγραμμία ( $R=\infty$ ) σε ένα κυκλικό τόξο ( $R=R_i$ ), ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλεται γραμμικά και η φυγόκεντρος επιτάχυνση (Μαυρομάτης, 2018). Αυτό το χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης καμπύλης είναι πολύ σημαντικό και έχει συντελέσει στην καθιέρωση της χρήσης της συγκεκριμένης καμπύλης στην Οδοποιία.

Η 3.9, μέσω της 3.6, συνεπάγεται:

$$\frac{dL}{d\tau} \cdot L = A^2 \Leftrightarrow LdL = A^2 d\tau \Rightarrow \int LdL = \int A^2 d\tau + K \Rightarrow \frac{L^2}{2} = A^2 \cdot \tau + K \quad (3.11)$$

, όπου:  $K$  η σταθερά ολοκλήρωσης,  
 $\tau$  (rad) η γωνία αλλαγής διεύθυνσης της κλωθοειδούς.

Με εφαρμογή των αρχικών συνθηκών προκύπτει η τιμή της  $K$ , η οποία είναι μηδέν, αφού για  $L=0$  προφανώς ισχύει  $\tau=0$ .

Επομένως, η 3.11 γίνεται:

$$\tau = \frac{L^2}{2A^2} \quad (3.12\alpha)$$

Με διαδοχικές αντικαταστάσεις της 3.9 στην 3.12α προκύπτουν και οι άλλες δύο βασικές μορφές της γωνίας διεύθυνσης της κλωθοειδούς:

$$\tau = \frac{A^2}{2R^2} = \frac{L}{2R} \quad (3.12\beta, \gamma)$$

Με απλούς μετασχηματισμούς μεταξύ των 3.9 και 3.12 προκύπτουν και οι βασικές σχέσεις της ακτίνας καμπυλότητας στο πέρας του τόξου της κλωθοειδούς:

$$R = \frac{A^2}{L} = \frac{L}{2\tau} = \frac{A}{\sqrt{2\tau}} \quad (3.13\alpha, \beta, \gamma)$$

και του μήκους του τόξου της κλωθοειδούς:

$$L = \frac{A^2}{R} = 2\tau \cdot R = A\sqrt{2\tau} \quad (3.14\alpha, \beta, \gamma)$$

Το να είναι η κλωθοειδής εκφρασμένη όπως στην 3.10 είναι βολικό για ορισμένες εφαρμογές. Εντούτοις, στα προβλήματα χάραξης της οριζοντιογραφίας ενός οδικού τμήματος ή μιας τροχιάς, η μορφή αυτή δε διευκολύνει καθόλου. Αντίθετα, εκείνο που χρειάζεται είναι η γνώση των συντεταγμένων της καμπύλης, προβαλλόμενες στο καρτεσιανό σύστημα αξόνων. Επομένως, εγείρεται η ανάγκη για αναζήτηση αναλυτικών σχέσεων για τις συντεταγμένες της κλωθοειδούς καμπύλης.

Από το Σχήμα 3.1 και την 3.12α προκύπτουν οι σχέσεις:

$$dX = dL \cdot \cos \tau = dL \cdot \cos \frac{L^2}{2A^2} \quad (3.15)$$

, όπου:  $dX$  (m) η στοιχειώδης τετμημένη στο σημείο  $\Sigma$ , και:

$$dY = dL \cdot \sin \tau = dL \cdot \sin \frac{L^2}{2A^2} \quad (3.16)$$

, όπου:  $dY$  (m) η στοιχειώδης τεταγμένη στο σημείο  $\Sigma$ .

Ολοκληρώνοντας τις 3.15 και 3.16, από 0 έως  $L_0$  προκύπτουν οι συντεταγμένες που αντιστοιχούν στο σημείο εκείνο, στο οποίο η κλωθοειδής έχει μήκος  $L_0$ :

$$X = \int_0^{L_0} \cos\left(\frac{L^2}{2A^2}\right) dL = \int_0^{L_0} \cos\left(\frac{L}{A\sqrt{2}}\right)^2 dL \quad (3.17)$$

$$Y = \int_0^{L_0} \sin\left(\frac{L^2}{2A^2}\right) dL = \int_0^{L_0} \sin\left(\frac{L}{A\sqrt{2}}\right)^2 dL \quad (3.18)$$

Τα ολοκληρώματα 3.17 και 3.18 αποκαλούνται “Ολοκληρώματα Fresnel” (Spanier & Oldham, 1987, p. 373, Ρασσιάς, 2014, p. 513), από τον ομώνυμο Γάλλο φυσικό (Stewart, 2012, p. 389). Για να επιλυθούν, πραγματοποιείται ανάπτυξη του συνημιτο-νικού και του ημιτονικού όρου στις αντίστοιχες σειρές Taylor. Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$\cos t = 1 - \frac{t^2}{2!} + \frac{t^4}{4!} - \frac{t^6}{6!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} \cdot t^{2n}, t \in \mathbb{R} \quad (3.19)$$

$$\sin t = t - \frac{t^3}{3!} + \frac{t^5}{5!} - \frac{t^7}{7!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} \cdot t^{2n+1}, t \in \mathbb{R} \quad (3.20)$$

, προκύπτει:

$$\cos \frac{L^2}{2A^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)! 2^{2n} A^{4n}} L^{4n} \quad (3.21)$$

$$\sin \frac{L^2}{2A^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)! 2^{2n+1} A^{4n+2}} L^{4n+2} \quad (3.22)$$

Αντικαθιστώντας τις 3.21 και 3.22 στις 3.17 και 3.18 αντίστοιχα, τα ολοκληρώματα παίρνουν τη μορφή:

$$X = \int_0^{L_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{(-1)^n}{(2n)! 2^{2n} A^{4n}} L^{4n} \right) dL \quad (3.23)$$

$$Y = \int_0^{L_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{(-1)^n}{(2n+1)! 2^{2n+1} A^{4n+2}} L^{4n+2} \right) dL \quad (3.24)$$

Ύστερα από ολοκλήρωση, προκύπτει ο τύπος υπολογισμού των συντεταγμένων του τυχόντος σημείου της κλωθοειδούς:

$$X = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n L_0^{4n+1}}{(2n)! 2^{2n} (4n+1) A^{4n}} \quad (3.25)$$



$$Y = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n L_0^{4n+3}}{(2n+1)! 2^{2n+1} (4n+3) A^{4n+2}} \quad (3.26)$$

, όπου:  $L_0$  το μήκος επί της καμπύλης στο σημείο εκείνο.

Ενώ οι σειρές 3.25 και 3.26 έχουν άπειρους όρους, μόνο εκείνοι που αντιστοιχούν σε πολύ μικρό  $n$  έχουν αισθητή επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα. Για καλύτερη κατανόηση της επιρροής των επιπρόσθετων όρων παρατίθεται ένα αριθμητικό παράδειγμα, με δεδομένα για την κλωθοειδή που ανταποκρίνονται ρεαλιστικά σε μια τυπική εφαρμογή της Οδοποιίας ( $A=120\text{m}$  και  $L=72\text{m}$ ). Στον Πίνακα 3.1 καταγράφονται οι τιμές του κάθε ενός εκ των επτά πρώτων όρων ( $n=0$  έως και  $n=6$ ) των σειρών, καθώς και οι εκάστοτε τιμές των συντεταγμένων  $X$  και  $Y$ , αν κάθε φορά λαμβάνεται υπόψη ένας επιπλέον όρος. Γίνεται αμέσως σαφές, πως για  $n>4$  δεν αρκούν επτά δεκαδικά ψηφία για να φανεί η οποιαδήποτε μεταβολή στο τελικό αποτέλεσμα. Κάνοντας την παραδοχή πως μια ακρίβεια χιλιοστού (3 δεκαδικά ψηφία) είναι ικανοποιητική για εφαρμογές που σχετίζονται με την Οδοποιία εξάγεται το συμπέρασμα, πως οι συντεταγμένες μιας κλωθοειδούς περιγράφονται επαρκώς από τους τρεις πρώτους όρους των 3.25 και 3.26 ( $n=0$  έως και  $n=2$ ).

**Πίνακας 3.1** Συγκριτικός υπολογισμός των συντεταγμένων μιας κλωθοειδούς, αν ληφθούν υπόψη από ένας έως και επτά πρώτοι όροι.

A (m)	120	L (m)	72				
n	0	1	2	3	4	5	6
$X_n$ (m)	72.0000000	-0.2332800	0.0003499	-0.0000003	0.0000000	0.0000000	0.0000000
$Y_n$ (m)	4.3200000	-0.0099977	0.0000103	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
<b>X (m)</b>	72.0000000	71.7667200	71.7670699	71.7670697	71.7670697	71.7670697	71.7670697
<b>Y (m)</b>	4.3200000	4.3100023	4.3100126	4.3100126	4.3100126	4.3100126	4.3100126

Εκτελώντας τους υπολογισμούς και θέτοντας στη θέση του  $L_0$  το  $L$  προκύπτουν οι παρακάτω παραμετρικές σχέσεις, ως συναρτήσεις του μήκους της κλωθοειδούς:

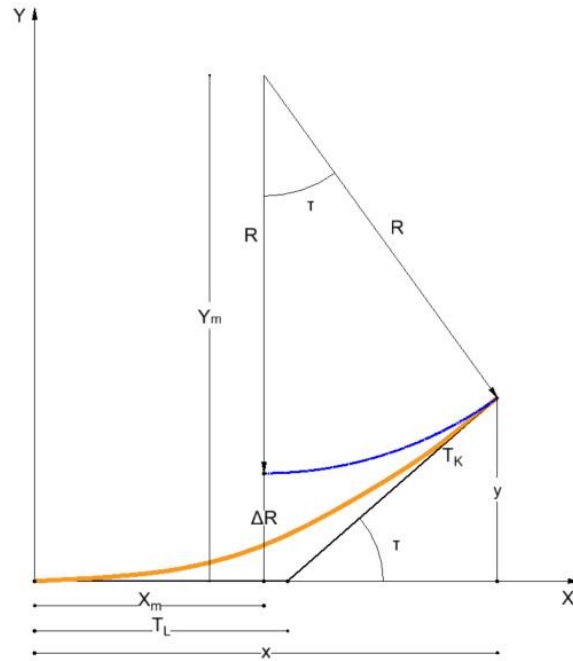
$$X = X(L) = L - \frac{L^5}{40A^4} + \frac{L^9}{3456A^8} \quad (3.27)$$

$$Y = Y(L) = \frac{L^3}{6A^2} - \frac{L^7}{336A^6} + \frac{L^{11}}{42240A^{10}} \quad (3.28)$$

, όπου:  $L$  (m) το μήκος που έχει η κλωθοειδής στο (τυχόν) σημείο ενδιαφέροντος,  
 $A$  (m) η παράμετρος της κλωθοειδούς.

Αξίζει να σημειωθεί, πως οι ελληνικές οδηγίες για τις μελέτες οδικών έργων προτείνουν τη χρήση των πέντε πρώτων όρων της 3.25 και των τεσσάρων πρώτων όρων της 3.26 (ΟΜΟΕ – X, 2001).

Για την πλήρη γεωμετρική περιγραφή της κλωθοειδούς, υπολογίζονται επιπρόσθετα ορισμένα βοηθητικά μεγέθη. Αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3 και πρέπει να υπολογιστούν, εφόσον επιχειρείται η γεωμετρική κατασκευή της εν λόγω καμπύλης.



Σχήμα 3.3 Τμήμα κλωθοειδούς καμπύλης με επισημασμένα κάποια βοηθητικά μεγέθη (Μαυρομάτης, 2018).

Με απλές γεωμετρικές διαδικασίες και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες στο πέρας της κλωθοειδούς ( $R=R_i$ ) υπολογίζονται:

$$T_L = x - \frac{y}{\tan \tau} \quad (3.29)$$

$$T_K = \frac{y}{\sin \tau} \quad (3.30)$$

$$X_m = x - R \cdot \sin \tau \quad (3.31)$$

$$Y_m = y + R \cdot \cos \tau \quad (3.32)$$

$$\Delta R = Y_m - R \quad (3.33)$$

, όπου:  $x$  (m) η τετμημένη του τελευταίου σημείου της κλωθοειδούς,  
 $y$  (m) η τεταγμένη του τελευταίου σημείου της κλωθοειδούς,  
 $T_L$  (m) η κύρια εφαπτομένη της κλωθοειδούς,  
 $T_K$  (m) η δευτερεύουσα εφαπτομένη της κλωθοειδούς,  $X_m$  (m) η τετμημένη του κέντρου του κύκλου ακτίνας  $R_i$  στο πέρας της κλωθοειδούς,  
 $Y_m$  (m) η τεταγμένη του κέντρου του κύκλου ακτίνας  $R_i$  στο πέρας της κλωθοειδούς,  
 $\Delta R$  (m) η εκτροπή της κλωθοειδούς, δηλαδή η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του κύκλου ακτίνας  $R_i$  στο πέρας της κλωθοειδούς και του άξονα των τετμημένων.

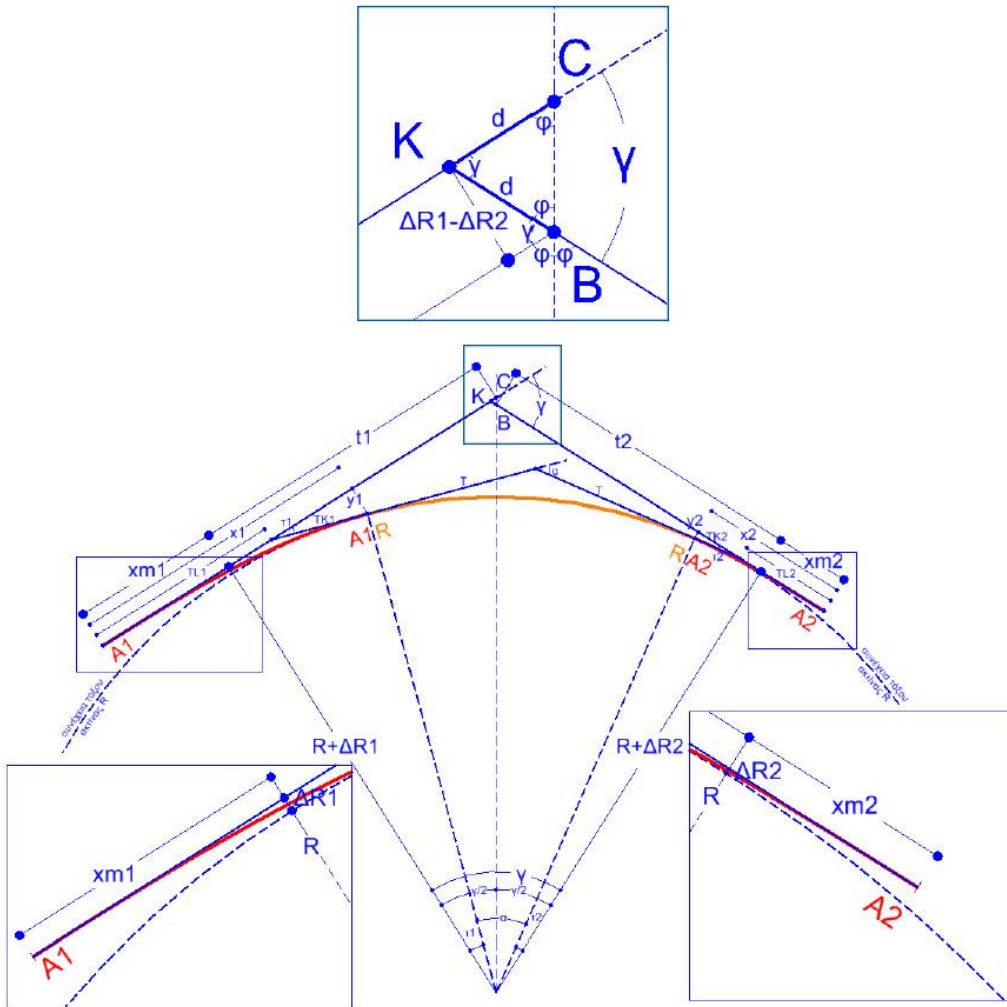
### 3.2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕ ΚΛΩΘΟΕΙΔΕΙΣ

Ο καίριος ρόλος που διαδραματίζει το τόξο συναρμογής, και συγκεκριμένα η κλωθοειδής, στο σύγχρονο γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών, αποκρυσταλλώνεται χωρίς αμφιβολία στα διάφορα είδη οριζοντιογραφικών καμπυλών που έχουν αναπτυχθεί. Στα

ακόλουθα χωρία συνοψίζονται ορισμένες από αυτές και δίνονται τα βασικά τους χαρακτηριστικά.

### 3.2.1 Τυπική καμπύλη

Η τυπική καμπύλη αποτελείται από μια αλληλουχία ευθυγραμμίας-κλωθοειδούς εισόδου-κυκλικού τόξου ( $R=R_i$ )-κλωθοειδούς εξόδου-ευθυγραμμίας και συνιστά την πλέον συνηθισμένη μορφή καμπύλης στην Οδοποιία (Μαυρομάτης, 2018). Στη γενική περίπτωση οι κλωθοειδείς εισόδου και εξόδου δεν είναι συμμετρικές, οπότε εφαρμόζονται με διαφορετικές παραμέτρους ( $A_1 \neq A_2$ ). Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται μια τέτοια τυπική καμπύλη με σημειωμένα τα κυριότερα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, τα οποία προκύπτουν από τις 3.9, 3.12 και τις 3.27-3.33. Παρακάτω εξετάζεται μια τυπική καμπύλη στη γενική περίπτωση.



Σχήμα 3.4 Μια τυπική καμπύλη με ασύμμετρες κλωθοειδείς εισόδου και εξόδου, με μεγέθυνση στο σημείο αρχής, στο σημείο πέρατος και στην περιοχή του σημείου  $K$  (Kasper et al., 1956).

Από τη γεωμετρία, για ένα κυκλικό τόξο ισχύει:

$$\alpha = \frac{b}{R} \quad (3.34)$$

, όπου:  $\alpha$  (rad) η επίκεντρη γωνία που βαίνει στο κυκλικό τόξο,  
 $b$  (m) το μήκος του κυκλικού τόξου,  
 $R$  (m) η ακτίνα του κυκλικού τόξου, και:

$$T = R \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.35)$$

, όπου:  $T$  (m) η εφαπτομένη του κυκλικού τόξου στο σημείο αρχής και το πέρας του.

Λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 3.4 υπολογίζονται οι κύριες εφαπτομένες ( $T_1$  και  $T_2$ ) ολόκληρης της τυπικής καμπύλης. Αυτές αποτελούν την πολυγωνική της τυπικής καμπύλης, ενώ το σημείο  $K$  στο οποίο τέμνονται, αποτελεί την κορυφή της πολυγωνικής για τη συγκεκριμένη καμπύλη. Αρχικά, ισχύει:

$$\gamma = \tau_1 + \tau_2 + \alpha \quad (3.36)$$

, όπου:  $\gamma$  (rad) η γωνιακή μεταβολή ολόκληρης της τυπικής καμπύλης,  
 $\tau_1$  (rad) η γωνία αλλαγής διεύθυνσης της κλωθοειδούς εισόδου,  
 $\tau_2$  (rad) η γωνία αλλαγής διεύθυνσης της κλωθοειδούς εξόδου.

Έπειτα, κάνοντας χρήση της 3.35 υπολογίζονται:

$$t_1 = (R + \Delta R_1) \tan \frac{\gamma}{2} \quad (3.37)$$

$$t_2 = (R + \Delta R_2) \tan \frac{\gamma}{2} \quad (3.38)$$

, όπου:  $t_1$  (m) η απόσταση επί της κύριας εφαπτομένης της εισόδου της καμπύλης, η οποία αντιστοιχεί στο μισό της γωνίας  $\gamma$ ,  
 $t_2$  (m) η απόσταση επί της κύριας εφαπτομένης της εξόδου της καμπύλης, η οποία αντιστοιχεί στο μισό της γωνίας  $\gamma$ ,  
 $\Delta R_1$  (m) η εκτροπή της κλωθοειδούς εισόδου,  
 $\Delta R_2$  (m) η εκτροπή της κλωθοειδούς εξόδου.

Στο Σχήμα 3.5 διακρίνεται ακόμη μία λεπτομέρεια της περιοχής του σημείου  $K$ . Παρατηρώντας ότι το  $BCK$  αποτελεί τρίγωνο, πρέπει:

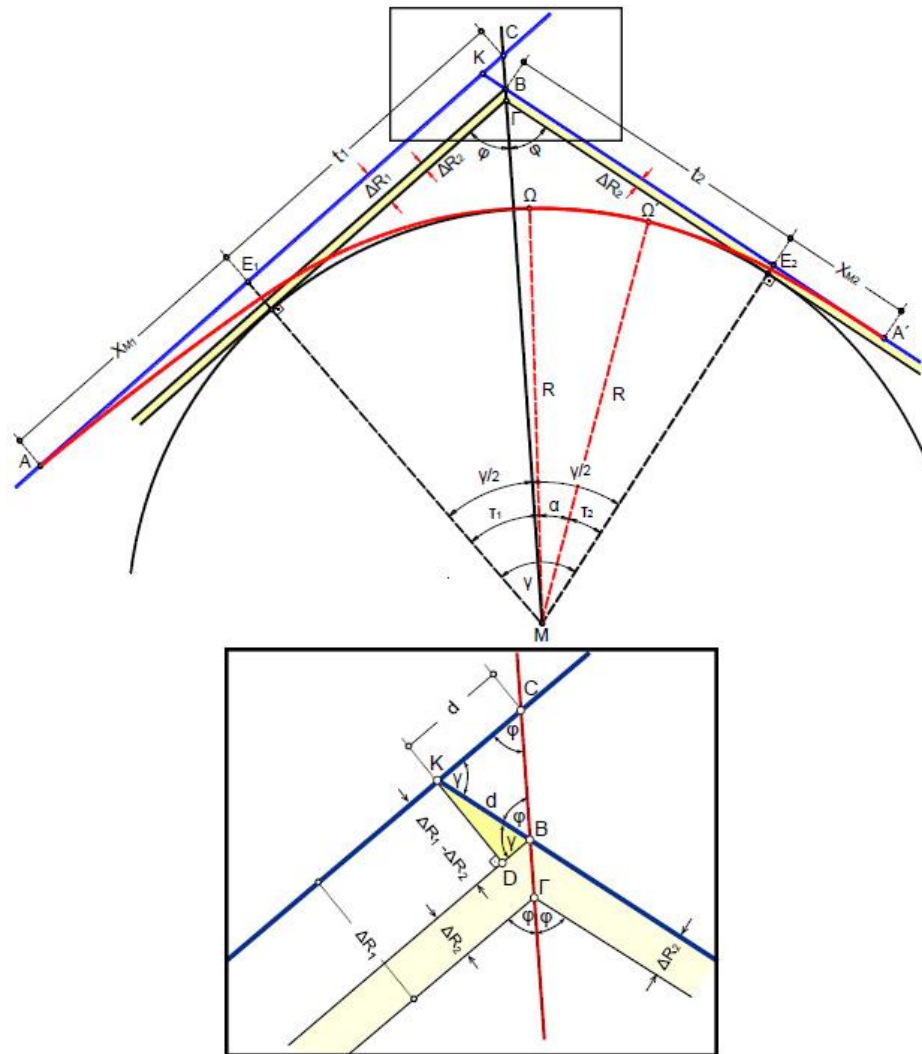
$$2\varphi + \gamma = \pi \Leftrightarrow \varphi = \frac{\pi - \gamma}{2} \quad (3.39)$$

, όπου:  $\varphi$  (rad) μια βοηθητική γωνία.

Εφαρμόζοντας τριγωνομετρία, προκύπτει:

$$d = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{\sin \gamma} \quad (3.40)$$

, όπου:  $d$  (m) ένα βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα.



Σχήμα 3.5 Μια άλλη απεικόνιση τυπικής καμπύλης με ασύμμετρες κλωθοειδείς και μεγέθυνση στην περιοχή της κορυφής της πολυγωνικής (Kasper et al., 1956).

Τελικά, ισχύει:

$$T_1 = X_{m1} + t_1 - d \quad (3.41)$$

$$T_2 = X_{m2} + t_2 + d \quad (3.42)$$

, όπου:  $T_1$  (m) η κύρια εφαπτομένη της τυπικής καμπύλης από τη μεριά της εισόδου,  
 $T_2$  (m) η κύρια εφαπτομένη της τυπικής καμπύλης από τη μεριά της εξόδου,  
 $X_{m1}$  (m) η τετμημένη του κέντρου του κύκλου ακτίνας  $R_i$  στο πέρας της κλωθοειδούς εισόδου,  
 $X_{m2}$  (m) η τετμημένη του κέντρου του κύκλου ακτίνας  $R_i$  στο πέρας της κλωθοειδούς εξόδου.

Τέλος, σχετικά με το μήκος του κυκλικού τόξου της τυπικής καμπύλης, με βάση τη γεωμετρία και σύμφωνα με την 3.36 ισχύει:

$$b = R \cdot \alpha = R(\gamma - \tau_1 - \tau_2) \quad (3.43)$$

, όπου:  $b$  (m) το μήκος του τμήματος εκείνου της τυπικής καμπύλης που είναι κυκλικό τόξο.

Έστω τώρα μια ειδική περίπτωση, στην οποία οι παράμετροι της κλωθοειδούς εισόδου και της κλωθοειδούς εξόδου είναι ίσες ( $A_1=A_2$ ). Τότε τα σημεία B, C και K ταυτίζονται ( $B=C=K$ ), ενώ το ευθύγραμμο τμήμα d έχει προφανώς μηδενικό μήκος ( $d=0$ ). Ταυτόχρονα, η τυπική καμπύλη είναι συμμετρική ως προς τον άξονα MK, όπου M είναι το κέντρο του κυκλικού τόξου ακτίνας  $R_i$  της τυπικής καμπύλης (σύμφωνα με το Σχήμα 3.5). Ο άξονας αυτός αποτελεί και τη διχοτόμο της γωνίας  $\pi-\gamma^{rad}$ , η οποία με βάση την 3.39 ισούται με  $2\varphi$ .

Η μονάδα μέτρησης της γωνίας στο SI είναι το ακτίνιο και συμβολίζεται με rad ή αφήνεται χωρίς μονάδα. Ως εκ τούτου, κάθε φορά που υπεισέρχεται γωνιακό μέγεθος σε κάποιον από τους παρακάτω τύπους και εφόσον ο τύπος δεν είναι κατάλληλα προσαρμοσμένος, θεωρείται πως η γωνία μετράται σε ακτίνια. Στην Οδοποιία, όμως, για διευκόλυνση και καλύτερη εποπτεία, συνηθίζεται οι γωνίες να εκφράζονται σε βαθμούς, μονάδα μέτρησης που συμβολίζεται με gon ή grad. Κάθε γωνία δοσμένη σε ακτίνια δύναται να εκφραστεί σε βαθμούς και αντιστρόφως, με τη χρήση των ακόλουθων μετασχηματισμών:

$$\omega^{gon} = \omega^{rad} \frac{200}{\pi} \quad (3.44)$$

$$\omega^{rad} = \omega^{gon} \frac{\pi}{200} \quad (3.45)$$

, όπου:  $\omega^{gon}$  μια τυχούσα γωνία εκφρασμένη σε βαθμούς,  
 $\omega^{rad}$  μια τυχούσα γωνία εκφρασμένη σε ακτίνια.

### 3.2.2 S-καμπύλη

Η καμπύλη τύπου “S”, η οποία αποκαλείται και σιγμοειδής καμπύλη, αποτελείται από δύο διαδοχικές αντίρροπες κλωθοειδείς, οι οποίες εφάπτονται μεταξύ τους στο κοινό σημείο αρχής. Ειδικότερα, ορίζεται ως μια αλληλουχία κλωθοειδούς εξόδου-κλωθοειδούς εισόδου, ενώ ορισμένες φορές συναντάται με μια μικρή ευθυγραμμία ανάμεσα στα δύο αυτά τόξα συναρμογής. Για λόγους αρμονίας της χάραξης, αλλά και για να μεταβάλλονται ομοιόμορφα οι επικλίσεις, οι δύο κλωθοειδείς πρέπει να εφαρμόζονται με περίπου ίσες παραμέτρους (Κανελλαΐδης και συν., 2017). Σύμφωνα με τις ελληνικές οδηγίες μελετών οδικών έργων (ΟΜΟΕ – X, 2001), όταν αυτό δεν είναι δυνατό και οι δύο παράμετροι διαφέρουν ( $A_1 \neq A_2$ ), πρέπει για  $A_2 \leq 200\text{m}$  να ισχύει η σχέση:

$$A_1 \leq 1.5A_2 \quad (3.46)$$

, όπου:  $A_1$  (m) η μεγαλύτερη από τις παραμέτρους των δύο κλωθοειδών,  
 $A_2$  (m) η μικρότερη από τις παραμέτρους των δύο κλωθοειδών.

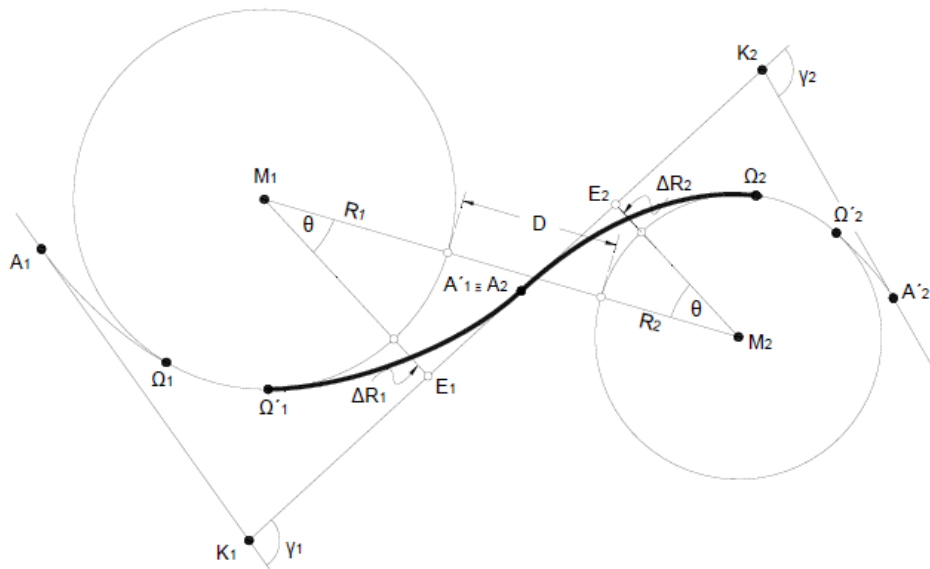
Στις ίδιες οδηγίες αναφέρεται, πως για να διέρχεται η χάραξη του οδικού τμήματος από τοπικά υποχρεωτικά σημεία, επιτρέπεται κατά συνθήκη η διάταξη ευθυγραμμίας μικρού μήκους μεταξύ των δύο σημείων αρχής των κλωθοειδών. Προκειμένου, όμως, να διατηρείται η οπτική εντύπωση της S-καμπύλης, ώστε ο οδηγός να μη θεωρήσει τις δύο αντίρροπες καμπύλες ως ανεξάρτητες, πρέπει η τιμή του μήκους της ενδιάμεσης ευθυγραμμίας να μην υπερβαίνει την τιμή:

$$L_z \leq 0.08(A_1 + A_2) \quad (3.47)$$

, όπου:  $A_i, i=1, 2$  (m) η παράμετρος της μιας κλωθοειδούς,

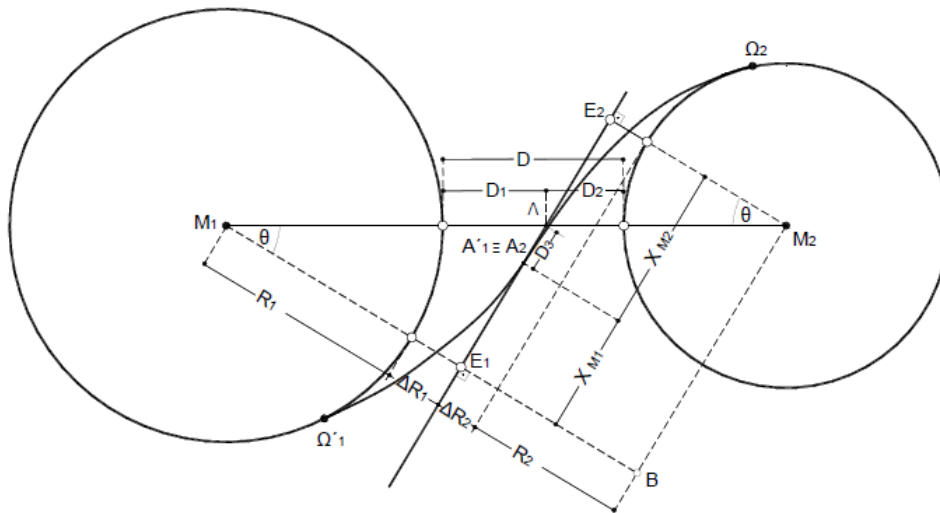
$L_z$  (m) το μήκος της ενδιάμεσης ευθυγραμμίας (ΟΜΟΕ – X, 2001).

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η χάραξη ενός οδικού τμήματος, μαζί με την πολυγωνική και ορισμένα γεωμετρικά στοιχεία ενδιαφέροντος. Η S-καμπύλη βρίσκεται ανάμεσα στις δύο διαδοχικές και αντίρροπες καμπύλες και επισημαίνεται με έντονο μαύρο χρώμα.



Σχήμα 3.6 Η τυπική διάταξη μιας S-καμπύλης σε ένα οδικό τμήμα (Κανελλαΐδης και συν., 2017).

Τα διάφορα γεωμετρικά στοιχεία μιας S-καμπύλης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Παράδειγμα S-καμπύλης (Κανελλαΐδης και συν., 2017).

Για τον υπολογισμό τους, λαμβάνοντας υπόψη την 3.33, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\Sigma X_M = X_{M1} + X_{M2} \quad (3.48)$$

$$\Sigma Y_M = Y_{M1} + Y_{M2} = R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2 \quad (3.49)$$

$$\tan \theta = \frac{\Sigma X_M}{\Sigma Y_M} \Rightarrow \theta = \tan^{-1} \frac{\Sigma X_M}{\Sigma Y_M} \quad (3.50)$$

$$D_3 = (R_1 - \Delta R_1) \tan \theta - X_{M1} = X_{M2} - (R_2 + \Delta R_2) \tan \theta \quad (3.51)$$

$$\overline{M_1 \Lambda} = \frac{X_{M1} + D_3}{\sin \theta} \quad (3.52)$$

$$\overline{\Lambda M_2} = \frac{X_{M2} - D_3}{\sin \theta} \quad (3.53)$$

$$\overline{M_1 M_2} = \overline{M_1 \Lambda} + \overline{\Lambda M_2} = \frac{\Sigma X_M}{\sin \theta} \quad (3.54)$$

$$D_1 = \overline{M_1 \Lambda} - R_1 \quad (3.55)$$

$$D_2 = \overline{\Lambda M_2} - R_2 \quad (3.56)$$

$$D = D_1 + D_2 = \overline{M_1 M_2} - (R_1 + R_2) \quad (3.57)$$

Το σύνηθες πρόβλημα κατά το σχεδιασμό μιας S-καμπύλης αφορά στον προσδιορισμό των παραμέτρων  $A_1$  και  $A_2$  των δύο κλωθοειδών, δοσμένων των ακτίνων  $R_1$  και  $R_2$  των αντίστοιχων κύκλων, καθώς και της ενδιάμεσης απόστασης  $D$  μεταξύ αυτών.

Στη γενική περίπτωση οι δύο κλωθοειδείς δεν έχουν ίσες παραμέτρους ( $A_1 \neq A_2$ ). Εφαρμόζοντας το Πυθαγόρειο θεώρημα στο τρίγωνο  $BM_1M_2$  ισχύει:

$$(R_1 + R_2 + D)^2 = (X_{M1} + X_{M2})^2 + (R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)^2 \quad (3.58)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις 3.12β, 3.14α, 3.27, 3.28, 3.31, 3.32 και 3.33, η 3.58 παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} (R_1 + R_2 + D)^2 = & \left( \frac{A_1^2}{R_1} - \frac{\left(\frac{A_1^2}{R_1}\right)^5}{40A_1^4} + \frac{\left(\frac{A_1^2}{R_1}\right)^9}{3456A_1^8} - R_1 \cdot \sin \frac{A_1^2}{2R_1^2} + \frac{A_2^2}{R_2} - \frac{\left(\frac{A_2^2}{R_2}\right)^5}{40A_2^4} + \frac{\left(\frac{A_2^2}{R_2}\right)^9}{3456A_2^8} - R_2 \cdot \sin \frac{A_2^2}{2R_2^2} \right)^2 + \\ & \left( \frac{\left(\frac{A_1^2}{R_1}\right)^3}{6A_1^2} - \frac{\left(\frac{A_1^2}{R_1}\right)^7}{336A_1^6} + \frac{\left(\frac{A_1^2}{R_1}\right)^{11}}{42240A_1^{10}} + R_1 \cdot \cos \frac{A_1^2}{2R_1^2} + \frac{\left(\frac{A_2^2}{R_2}\right)^3}{6A_2^2} - \frac{\left(\frac{A_2^2}{R_2}\right)^7}{336A_2^6} + \frac{\left(\frac{A_2^2}{R_2}\right)^{11}}{42240A_2^{10}} + R_2 \cdot \cos \frac{A_2^2}{2R_2^2} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.59)$$

Η 3.59 είναι εξίσωση δύο αγνώστων και άρα υπάρχει μονοπαραμετρική απειρία λύσεων. Για να μπορέσει να προσδιοριστεί μια λύση, απαιτείται μια ακόμη εξίσωση που να εμπεριέχει τις παραμέτρους  $A_1$  και  $A_2$ . Έστω ότι δίνεται:

$$A_1 = k \cdot A_2 \quad (3.60)$$

, όπου:  $k$  η (γνωστή) σταθερά αναλογίας για τις δύο παραμέτρους.

Αντικαθιστώντας την 3.60 στην 3.59 προκύπτει μια εξίσωση με μόνο έναν άγνωστο, η οποία, όμως, είναι αρκετά σύνθετη για να επιλυθεί αναλυτικά. Αντίθετα, παραμένει στην πεπλεγμένη της μορφή και δύναται να επιλυθεί με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα με δοκιμές, τροποποιώντας κατάλληλα την άγνωστη μεταβλητή έως ότου τα

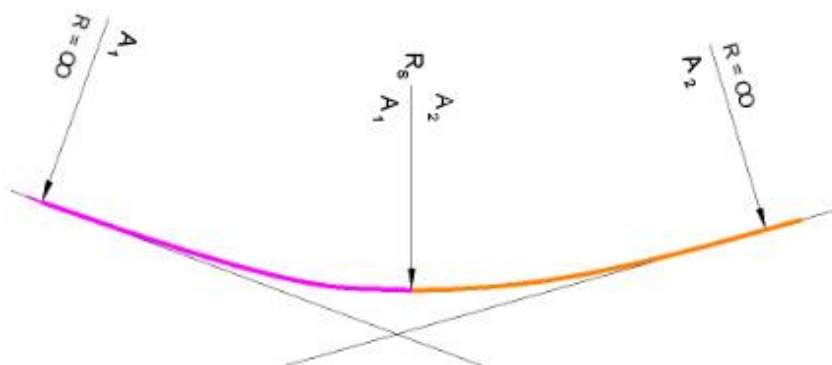


δύο μέλη της εξίσωσης γίνουν ίσα. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα βολικό να πραγματοποιείται με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων.

Στην ειδική περίπτωση που οι δύο κλωθοειδείς έχουν ίσες παραμέτρους ( $A_1=A_2$ ), η 3.59 είναι εξαρχής εξίσωση ενός αγνώστου και επομένως δύναται να επιλυθεί. Για την εύρεση της κοινής παραμέτρου ισχύουν οι ίδιοι περιορισμοί.

### 3.2.3 Κλωθοειδής κορυφής

Η κλωθοειδής κορυφής αποτελείται από δύο διαδοχικές ομόρροπες κλωθοειδείς με παραμέτρους  $A_1$  και  $A_2$ , οι οποίες εφάπτονται μεταξύ τους στο κοινό άκρο (και όχι στην αρχή). Ειδικότερα, ορίζεται ως μια αλληλουχία κλωθοειδούς εισόδου-κλωθοειδούς εξόδου, χωρίς την παρεμβολή κυκλικού τόξου. Στο σημείο επαφής τους έχουν εμφανίζονται ίσες ακτίνες καμπυλότητας  $R_1=R_2=R_S$ . Ένα παράδειγμα κλωθοειδούς κορυφής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8, στο οποίο τα δύο τόξα συναρμογής είναι σχεδιασμένα με διαφορετικό χρώμα για να είναι ευδιάκριτα και διακρίνονται με αχνή γραμμή και οι δύο εφαπτομένες.



Σχήμα 3.8 Η τυπική διάταξη μιας κλωθοειδούς κορυφής (Κανελλαΐδης και συν., 2017).

Γενικά εφαρμόζεται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις, επειδή η άμεση διαδοχή καμπύλης αυξανόμενης καμπυλότητας με καμπύλη μειούμενης καμπυλότητας προκαλεί δυσκολίες στην κίνηση των οχημάτων (ΟΜΟΕ – Χ, 2001). Ειδικότερα, η απουσία του κυκλικού τόξου συνεπάγεται την έλλειψη ενός τμήματος ηρεμίας για τον οδηγό, επειδή πρέπει να στρέφει συνέχεια το τιμόνι και μάλιστα στην κορυφή της καμπύλης να αλλάξει απότομα και τη φορά της στροφής (Pietzsch, 1976, p. 91). Ένας δεύτερος λόγος αφορά στην κατασκευαστική μόρφωση της εξωτερικής οριογραμμής, η οποία ανυψώνεται έως την κορυφή της καμπύλης και κατόπιν ταπεινώνεται, διαμόρφωση που πιθανώς να εκληφθεί από τον οδηγό σαν θλάση της οδού (Pietzsch, 1976, p 91). Οι παράμετροι των κλωθοειδών πρέπει κατά το δυνατόν να είναι ίσες ( $A_1=A_2$ ), ενώ παράλληλα πρέπει να αποφεύγεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης καμπύλης με ακτίνα μικρότερη από  $R_{S,min}=500m$  (ΟΜΟΕ – Χ, 2001). Όταν οι ακτίνες είναι μεγάλες και οι μεταβολές στην κατεύθυνση των εφαπτομένων της καμπύλης μικρές, τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα της κλωθοειδούς κορυφής αμβλύνονται και δεν υπάρχει λόγος αποφυγής της χρήσης της.

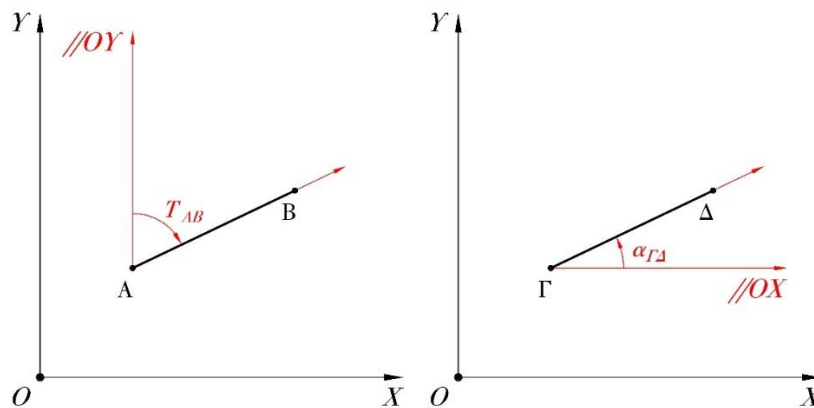
### 3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΩΝ

Ως γωνία διεύθυνσης ενός ευθύγραμμου τμήματος  $AB$  ορίζεται η δεξιόστροφη γωνία που διαγράφεται αν μια ημιευθεία που φέρεται από το σημείο  $A$  και είναι παράλληλη προς τον θετικό κατακόρυφο ημιάξονα περιστραφεί γύρω από το  $A$ , έως ότου ταυτιστεί με τη διεύθυνση του  $AB$ .

Στην περίπτωση, μάλιστα, που η διεύθυνση του θετικού κατακόρυφου ημιάξονα ταυτίζεται με τη διεύθυνση του γεωγραφικού Βορρά, η γωνία διεύθυνσης καλείται αζιμούθιο (Πατλάκης, 2018).

Το γωνιακό διάγραμμα (angle diagram) είναι η απεικόνιση της γωνίας διεύθυνσης που έχει μια καμπύλη σε ένα τυχαίο σημείο της, για όλα τα σημεία κατά μήκος της εν λόγω καμπύλης. Αντίστοιχα, αν η γωνία διεύθυνσης έχει διεύθυνση αναφοράς το Βορρά, το γωνιακό διάγραμμα καλείται διάγραμμα αζιμούθιων (azimuth diagram).

Η γωνία διεύθυνσης δεν πρέπει να συγχέεται με την κλίση, δηλαδή το συντελεστή διεύθυνσης ενός ευθύγραμμου τμήματος. Ως κλίση ενός ευθύγραμμου τμήματος  $\Gamma\Delta$  ορίζεται η αριστερόστροφη γωνία που διαγράφεται, αν μια ημιευθεία που φέρεται από το σημείο  $\Gamma$  και είναι παράλληλη προς τον θετικό οριζόντιο ημιάξονα περιστραφεί γύρω από το  $\Gamma$ , έως ότου ταυτιστεί με τη διεύθυνση του  $\Gamma\Delta$ . Η διαφορά στον τρόπο που ορίζονται η γωνία διεύθυνσης  $T_{AB}$  και η κλίση  $\alpha_{\Gamma\Delta}$  απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9.



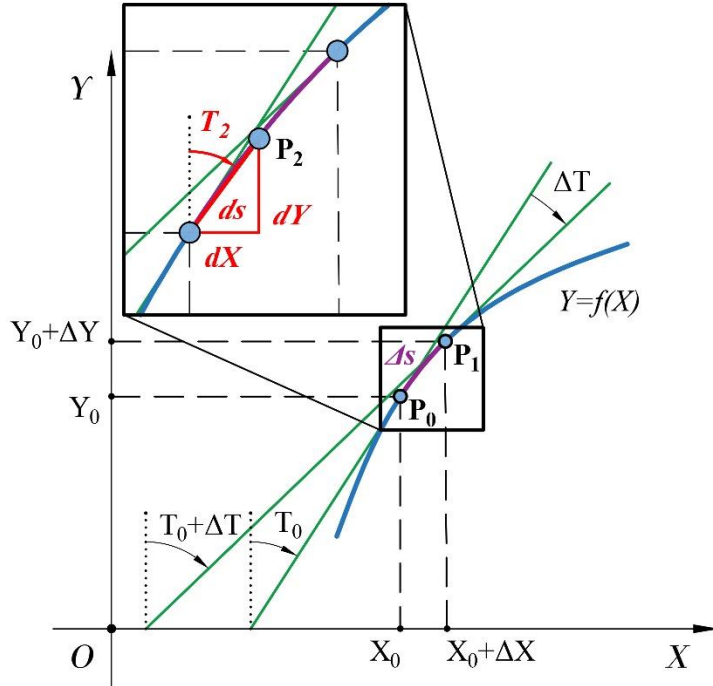
Σχήμα 3.9 Η γωνία διεύθυνσης ενός ευθύγραμμου τμήματος (αριστερά) και η κλίση του (δεξιά).

Αξίζει να σημειωθεί, πως αναλόγως με την εκάστοτε εφαρμογή, ένα γωνιακό διάγραμμα δύναται να απεικονίζει γωνίες διεύθυνσης (π.χ. σε τοπογραφικές αποτυπώσεις οδών, Βασιλάς, 2013) ή κλίσεις (π.χ. στη Μηχανική, στα προβλήματα των δοκών Bernoulli). Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αναφοράς συνήθως εξαρτάται από τη βολικότητα που αυτό παρουσιάζει και είναι προφανές πως οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κάθε φορά διαφέρουν.

#### 3.3.1 Περίπτωση συνεχούς συνάρτησης

Έστω μια συνάρτηση  $Y=f(X)$  που είναι τουλάχιστον  $C^2$ , δηλαδή τουλάχιστον δύο φορές παραγωγίσιμη στο πεδίο ορισμού της. Έστω, επίσης, τυχόν σημείο  $P_0(X_0, Y_0)$  στη

γραφική της παράστασης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10. Φέρνοντας την ευθεία που εφάπτεται της καμπύλης στο σημείο  $P_0$  σχηματίζεται η γωνία διεύθυνσης  $T_0$ . Αν το  $P_0$  μετακινηθεί κατά μήκος του τόξου της καμπύλης κατά απόσταση  $\Delta s$ , συναντάται το σημείο  $P_1(X_0+\Delta X, Y_0+\Delta Y)$ . Η ευθεία που εφάπτεται της καμπύλης στο σημείο  $P_1$  σχηματίζει με τον θετικό κατακόρυφο ημιάξονα γωνία διεύθυνσης  $T_0+\Delta T$ .



Σχήμα 3.10 Εύρεση της καμπυλότητας στη γραφική παράσταση μιας συνάρτησης με γεωμετρική επίλυση.

Συνεπώς, καθώς το σημείο μετατοπίζεται κατά απόσταση  $\Delta s$  επί της καμπύλης, η εφαπτόμενη ευθεία περιστρέφεται κατά γωνία  $\Delta T$ . Καθώς το  $\Delta s$  τείνει στο μηδέν, γίνεται δηλαδή απειροστά μικρό, προκύπτει το όριο:

$$\kappa(s) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta s} = \frac{dT}{ds} \tag{3.61}$$

Ο αριθμός  $\kappa=\kappa(s)$  ονομάζεται καμπυλότητα της καμπύλης σε ένα σημείο της και είναι συνάρτηση του μήκους πάνω στο τόξο της καμπύλης. Ουσιαστικά, η καμπυλότητα σε ένα σημείο μιας καμπύλης αποτελεί το ρυθμό (δηλαδή την ταχύτητα) με τον οποίο η εφαπτόμενη ευθεία της καμπύλης στο σημείο εκείνο περιστρέφεται (Pressley, 2010, p. 29). Ο αριθμός  $\kappa$  χρησιμοποιείται με το πρόσημό του, καθώς μπορεί να είναι θετικός, αρνητικό ή ίσος με μηδέν. Από την 3.61 και το Σχήμα 3.10 προκύπτει, πως η καμπυλότητα είναι θετική, όταν η εφαπτομένη στην καμπύλη περιστρέφεται κατά την ωρολογιακή φορά (δεξιόστροφα), καθώς κάποιος κινείται πάνω στην καμπύλη προς την κατεύθυνση που αυξάνεται το μήκος  $s$ .

Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό, η καμπυλότητα μιας καμπύλης σε ένα σημείο της ισοσύται με την ακτίνα του κύκλου εκείνου, ο οποίος εφάπτεται στην καμπύλη στο σημείο εκείνο από την πλευρά των κοίλων (Kline, 1977, p. 458-461). Επομένως, ισχύει:

$$|\kappa(s)| = \frac{1}{R} \tag{3.62}$$

, όπου:  $\kappa(s)$  (rad/m) η καμπυλότητα σε ένα σημείο μιας καμπύλης,

$R$  (m) η ακτίνα του κύκλου που εφάπτεται στην καμπύλη στο σημείο εκείνο, η οποία καλείται και ακτίνα καμπυλότητας της καμπύλης στο σημείο εκείνο.

Η 3.61 δίνει την καμπυλότητα στη μορφή μιας εξίσωσης Whewell. Συσχετίζεται, δηλαδή, η γωνία διεύθυνσης  $T$  με το μήκος τόξου  $s$  και καθορίζεται το σχήμα της καμπύλης, χωρίς να γίνεται αναφορά σε κάποιο αυθαίρετα επιλεγόμενο σύστημα συντεταγμένων (Yates, 1947, p. 123-126). Οι εξισώσεις Whewell έλαβαν το όνομά τους από τον ομώνυμο Άγγλο πολυμαθή και επιστήμονα.

Η καμπυλότητα, όμως, ενίοτε βολεύει να είναι εκφρασμένη στην Καρτεσιανή μορφή της. Με βάση το Σχήμα 3.10 και για απειροστά μικρές μεταβολές  $dX$  και  $dY$  μπορεί να γραφτεί:

$$T = \tan^{-1} \frac{dX}{dY} \quad (3.63)$$

Με παραγωγήσι ως προς το μήκος τόξου  $s$ , η 3.63 συνεπάγεται:

$$\frac{dT}{ds} = \frac{d}{ds} \left( \tan^{-1} \frac{dX}{dY} \right) = \frac{d}{ds} \left( \tan^{-1} \frac{1}{\frac{dY}{dX}} \right) \quad (3.64)$$

και χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας (chain rule) προκύπτει:

$$\frac{dT}{ds} = \frac{d}{dX} \left( \tan^{-1} \frac{1}{\frac{dY}{dX}} \right) \cdot \frac{dX}{ds} \quad (3.65)$$

Γράφοντας:

$$Y' = f'(X) = \frac{dY}{dX} \quad (3.66)$$

και αντικαθιστώντας την 3.66 στην 3.65, η τελευταία παίρνει τη μορφή:

$$\frac{dT}{ds} = \frac{d}{dX} \left( \tan^{-1} \frac{1}{Y'} \right) \cdot \frac{dX}{ds} \quad (3.67)$$

Χρησιμοποιώντας και πάλι τον κανόνα της αλυσίδας προκύπτει:

$$\frac{dT}{ds} = \frac{d}{dY'} \left( \tan^{-1} \frac{1}{Y'} \right) \cdot \frac{dY'}{dX} \cdot \frac{dX}{ds} \quad (3.68)$$

Εκτελώντας την πρώτη παραγωγήσι στο δεξιό μέλος της 3.68 και αντικαθιστώντας σε αυτήν την 3.66 προκύπτει:

$$\frac{dT}{ds} = -\frac{1}{Y'^2 + 1} \cdot \frac{d}{dX} \left( \frac{dY}{dX} \right) \cdot \frac{dX}{ds} = -\frac{1}{Y'^2 + 1} \cdot \frac{d^2Y}{dX^2} \cdot \frac{dX}{ds} \quad (3.69)$$

Από το Σχήμα 3.10 και το Πυθαγόρειο θεώρημα, για απειροστά μικρό μήκος τόξου ισχύει:

$$ds^2 = dX^2 + dY^2 \quad (3.70)$$

Η 3.70, μέσω και της 3.66 συνεπάγεται:

$$ds = \sqrt{dX^2 + dY^2} = \sqrt{dX^2 \left(1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2\right)} = dX (1 + Y'^2)^{1/2} \quad (3.71)$$

Αντικαθιστώντας την 3.71 στην 3.69 προκύπτει:

$$\frac{dT}{ds} = -\frac{\frac{d^2Y}{dX^2}}{Y'^2 + 1} \cdot \frac{1}{(1 + Y'^2)^{1/2}} \quad (3.72)$$

Γράφοντας:

$$Y'' = f''(X) = \frac{d^2Y}{dX^2} \quad (3.73)$$

, λαμβάνοντας υπόψη την 3.61 και αντικαθιστώντας την 3.73 στην 3.72, η τελευταία παίρνει τη μορφή:

$$\kappa = -\frac{Y''}{(Y'^2 + 1)^{3/2}} \quad (3.74)$$

Η 3.74 δίνει την καμπυλότητα εκφρασμένη στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, σε ένα σημείο μιας καμπύλης με γνωστό τύπο. Λαμβάνοντας υπόψη την 3.62, υπολογίζεται η ακτίνα καμπυλότητας στο εν λόγω σημείο της καμπύλης, ως εξής:

$$R = \left| -\frac{(Y'^2 + 1)^{3/2}}{Y''} \right| \quad (3.75)$$

Η καμπυλότητα μπορεί, ακόμη, να εκφραστεί στη μορφή μιας εξίσωσης Cesàro (βλ. 3.3.3). Οι εξισώσεις αυτές έλαβαν το όνομά τους από τον ομώνυμο Ιταλό μαθηματικό και συσχετίζουν το μήκος τόξου  $s$  από την αρχή της καμπύλης μέχρι ένα δοσμένο σημείο και την ακτίνα καμπυλότητας  $R$  (ή με την καμπυλότητα  $\kappa$  μέσω της 3.62) στο σημείο εκείνο (Yates, 1947, p. 123-126). Έχουν και αυτές το πλεονέκτημα, πως δίνουν τη μορφή μιας καμπύλης, χωρίς να είναι εξαρτημένες από κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Μια εξίσωση Cesàro προκύπτει παραγωγίζοντας μια φορά την αντίστοιχη εξίσωση Whewell.

Αν υπολογιστεί η καμπυλότητα για όλα τα σημεία μιας καμπύλης, δύναται να μορφωθεί το διάγραμμα καμπυλότητας της καμπύλης. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται η απόσταση του εκάστοτε σημείου από την αρχή, κατά μήκος της καμπύλης. Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται η καμπυλότητα του εκάστοτε σημείου της καμπύλης.

Μετασχηματίζοντας την 3.61, προκύπτει:

$$dT = \kappa(s) ds \quad (3.76)$$

Ολοκληρώνοντας την 3.76 κατά μήκος της καμπύλης, προκύπτει η γωνία διεύθυνσης της καμπύλης:

$$T(L) = \int \kappa(s) ds + c \quad (3.77)$$

, όπου:  $c$  η σταθερά ολοκλήρωσης,  
 $L$  (m) το μήκος της καμπύλης.

Αντίστοιχα, η γωνία διεύθυνσης μιας καμπύλης σε ένα συγκεκριμένο σημείο της υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την 3.76 κατά μήκος της καμπύλης από την αρχή έως και το σημείο ενδιαφέροντος. Λαμβάνοντας υπόψη και τις συνοριακές συνθήκες στην αρχή της καμπύλης, προκύπτει:

$$T(L) = T_0 + \int_0^L \kappa(s) ds \quad (3.78)$$

, όπου:  $T(s)$  (rad) η συνάρτηση που δίνει τη γωνία διεύθυνσης σε ένα τυχόν σημείο μιας καμπύλης,  
 $T_0$  (rad) η γωνία διεύθυνσης στο σημείο αρχής της καμπύλης,  
 $\kappa(s)$  (rad/m) η συνάρτηση που δίνει την καμπυλότητα σε κάθε σημείο της καμπύλης,  
 $L$  (m) το σημείο κατά μήκος της καμπύλης, στο οποίο αναζητείται η γωνία διεύθυνσης.

Αν υπολογιστούν οι γωνίες διεύθυνσης για όλα τα σημεία μιας καμπύλης, δύναται να μορφωθεί το γωνιακό διάγραμμα της καμπύλης. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται η απόσταση του εκάστοτε σημείου από την αρχή, κατά μήκος της καμπύλης. Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται η γωνία διεύθυνσης του εκάστοτε σημείου της καμπύλης.

Για την περίπτωση που χρησιμοποιείται το διάγραμμα αζιμούθιων, η γραφική παράσταση της καμπύλης ανέρχεται, όταν ο προσδιοριζόμενος προσανατολισμός απομακρύνεται από το Βορρά. Αντίστοιχα, η γραφική παράσταση της καμπύλης κατέρχεται, όταν ο προσδιοριζόμενος προσανατολισμός στρέφεται προς το Βορρά.

Με γνωστές τις γωνίες διεύθυνσης μιας καμπύλης μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες της στο καρτεσιανό σύστημα αξόνων. Για λόγους πληρότητας, ακολούθως παρατίθεται η σχετική διαδικασία. Από τη μεγέθυνση στο Σχήμα 3.10 προκύπτουν η τετμημένη και η τεταγμένη του σημείου  $P_2(X_0+dX, Y_0+dY)$  ως εξής:

$$dX = \sin T_2 ds \quad (3.79)$$

$$dY = \cos T_2 ds \quad (3.80)$$

Ολοκληρώνοντας τις 3.79 και 3.80 κατά μήκος της καμπύλης από το σημείο αρχής έως και ένα σημείο ενδιαφέροντος σε απόσταση  $L$  από αυτήν και λαμβάνοντας υπόψη και τις συνοριακές συνθήκες στην αρχή της καμπύλης, προκύπτει:

$$X(L) = X_0 + \int_0^L \sin T(s) ds \quad (3.81)$$

$$Y(L) = Y_0 + \int_0^L \cos T(s) ds \quad (3.82)$$

, όπου:  $X_0$  (m) η τετμημένη του σημείου αρχής της καμπύλης,  
 $Y_0$  (m) η τεταγμένη του σημείου αρχής της καμπύλης,  
 $L$  (m) η απόσταση κατά μήκος της καμπύλης του σημείου ενδιαφέροντος από την αρχή αυτής,  
 $T(s)$  (rad) η γωνία διεύθυνσης της καμπύλης στο σημείο ενδιαφέροντος,  
 $X(L)$  (m) η τετμημένη του σημείου ενδιαφέροντος,  
 $Y(L)$  (m) η τεταγμένη του σημείου ενδιαφέροντος.

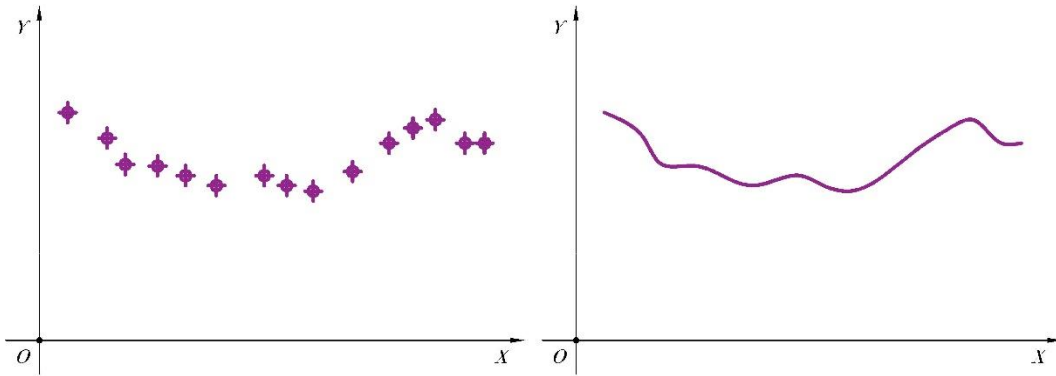
Αν υπολογιστούν οι συντεταγμένες για όλα τα σημεία μιας καμπύλης, δύναται να μορφωθεί η οριζοντιογραφία της καμπύλης, δηλαδή η τροχιά που ακολουθεί πάνω στο επίπεδο.

Από τις 3.78, 3.81 και 3.82 γίνεται εύκολα αντιληπτή η σχέση που συνδέει την τροχιά, τη γωνία διεύθυνσης και την καμπυλότητα μιας καμπύλης. Ειδικότερα, το γωνιακό διάγραμμα είναι (ποιοτικά) η πρώτη παράγωγος της οριζοντιογραφίας και το διάγραμμα καμπυλότητας είναι η πρώτη παράγωγος του γωνιακού διαγράμματος.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί, πως η κατάστρωση των εξισώσεων 3.61 έως και 3.82 πραγματοποιείται, έχοντας ως γωνία αναφοράς τη (δεξιόστροφη) γωνία διεύθυνσης. Αυτό δεν είναι σύνηθες, καθώς στον μαθηματικό κλάδο της διαφορικής γεωμετρίας η τετριμμένη περίπτωση είναι η καμπυλότητα και τα παράγωγα μεγέθη της να εκφράζονται με γωνία αναφοράς την (αριστερόστροφη) κλίση. Εντούτοις, η χρήση της γωνίας διεύθυνσης κρίνεται καταλληλότερη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και ως εκ τούτου το μαθηματικό υπόβαθρο θεμελιώνεται πάνω στο συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Για την κατάστρωση αντίστοιχων εξισώσεων με βάση την κλίση ακολουθείται παρόμοια διαδικασία, αλλά το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει προφανώς διαφορετικό.

### 3.3.2 Περίπτωση διακριτής συνάρτησης

Όταν ένα μέγεθος εκφράζεται από μια συνάρτηση που είναι συνεχής, η επίλυση του προβλήματος είναι, συνήθως, ευχερέστερη από μαθηματική σκοπιά. Εντούτοις, όταν το μέγεθος αυτό αποτελεί προϊόν μετρήσεων σε κάποιο πείραμα, κατά τη συνήθη περίπτωση η θεωρητική αυτή έννοια της συνέχειας καταλύεται. Αυτό οφείλεται στη συχνότητα συλλογής δεδομένων από την εκάστοτε συσκευή, η οποία αναγκαστικά είναι πεπερασμένη. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η συχνότητα, τόσο η συνάρτηση που εκφράζει το προσδιοριζόμενο μέγεθος εκφυλίζεται σε μια συνεχή γραμμή. Ωστόσο, κάποια ποσότητα πληροφορίας αναπόφευκτα θα διαφύγει της συσκευής μέτρησης, όσο μικρό και να είναι το χρονικό βήμα της καταγραφής. Συνεπώς, η συνάρτηση που τελικά προκύπτει δεν είναι μια συνεχής γραμμή, αλλά αποτελείται από μια διακριτή αλληλουχία διαδοχικών γνωστών σημείων στο χώρο ή το χρόνο, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί και σε μια ξεχωριστή μέτρηση. Αυτό που δεν είναι γνωστό, είναι το τι συμβαίνει στα διαστήματα ανάμεσα σε αυτά τα σημεία. Η διαφορά των δύο γίνεται εύκολα αντιληπτή στο *Σχήμα 3.11*, όπου παρουσιάζεται μια συνεχής συνάρτηση και μια αλληλουχία σημείων, τα οποία έχουν προέλθει από την εν λόγω συνάρτηση.



Σχήμα 3.11 Συγκριτική παράθεση της ίδιας συνάρτησης σε διακριτή (αριστερά) και συνεχή μορφή (δεξιά).

Αυτό το κενό της πληροφορίας καλύπτεται, συνήθως, ενώνοντας δύο διαδοχικά σημεία με κάποια γνωστή μαθηματική καμπύλη. Η διαδικασία αυτή, που αποτελεί αντικείμενο του κλάδου της αριθμητικής ανάλυσης, ονομάζεται “παρεμβολή” και ανάλογα το είδος της καμπύλης διακρίνεται μεταξύ άλλων σε γραμμική, πολυωνυμική και παρεμβολή με splines. Είναι προφανές, πως όσο πιο πυκνά είναι τα σημεία που καταγράφονται από το όργανο μέτρησης, τόσο πιο μικρό είναι το σφάλμα της παρεμβολής.

Το πρόβλημα αυτό εγείρεται σε πολλές εφαρμογές επιστημονικού αλλά και καθημερινού ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, η τροχιά ενός οχήματος που κινείται σε μια οδό και φέρει δέκτη GNSS δεν είναι μια καμπύλη, αλλά πολλά διακριτά δορυφορικά στίγματα τοποθετημένα στο χώρο. Μάλιστα, οι δέκτες του εμπορίου δεν έχουν πολύ μεγάλη συχνότητα καταγραφής της θέσης, επομένως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων είναι της τάξης των λίγων μέτρων.

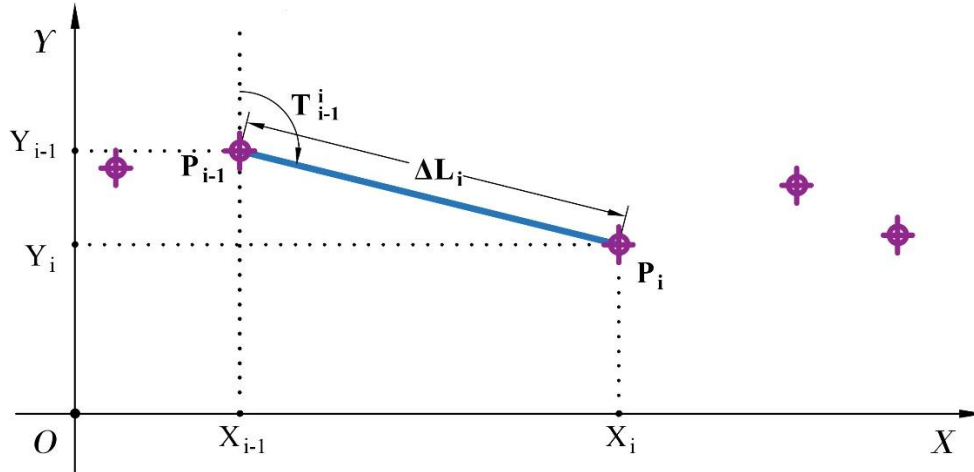
Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο μαθηματικός χειρισμός του προβλήματος είναι πιο περίπλοκος και περιλαμβάνει προσεγγίσεις και κατάλληλες παραδοχές. Η εύρεση του γωνιακού διαγράμματος μιας συνάρτησης είναι ένα πρόβλημα που δεν αποτελεί εξαίρεση. Η μέθοδος παρεμβολής που τελικά επιλέγεται επαφίεται στην κρίση του ερευνητή και αποτελεί μια διεκυστίνδα μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής απλότητας.

### 3.3.2.1 Προσέγγιση με ευθύγραμμο τμήματα

Η πλέον απλή προσέγγιση είναι τα σημεία της διακριτής συνάρτησης να ενωθούν με διαδοχικά ευθύγραμμο τμήματα και έτσι να σχηματιστεί μια τεθλασμένη γραμμή. Έπειτα, για κάθε σημείο του πεδίου ορισμού υπολογίζονται η απόσταση, κατά μήκος της τεθλασμένης γραμμής, από το σημείο αρχής και η γωνία διεύθυνσης. Τέλος, απεικονίζοντας αυτές τις δύο πληροφορίες σε ένα σύστημα συντεταγμένων, διαδοχικά και για όλα τα σημεία, μορφώνεται το γωνιακό διάγραμμα της συνάρτησης. Η διαδικασία είναι αλγοριθμική και συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

Στο Σχήμα 3.12 απεικονίζεται ένα τμήμα της γραφικής παράστασης μιας διακριτής συνάρτησης, καθώς και το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει δύο διαδοχικά σημεία της.





Σχήμα 3.12 Μεταβολή της απόστασης και της γωνίας διεύθυνσης κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος σε ένα τυχαίο σημείο μιας διακριτής συνάρτησης.

Για κάθε σημείο  $P_i(x_i, y_i)$ ,  $i=2, 3, \dots, n$ , όπου  $n$  το πλήθος των στοιχείων του πεδίου ορισμού της διακριτής συνάρτησης, χαράσσεται το ευθύγραμμο τμήμα  $P_{i-1}P_i$ .

Από την τριγωνομετρία ισχύει:

$$T_{i-1}^i = T_i = \tan^{-1} \frac{X_i - X_{i-1}}{Y_i - Y_{i-1}} \quad (3.83)$$

, όπου:  $T_{i-1}^i$  (rad) η γωνία διεύθυνσης του ευθύγραμμου τμήματος  $P_{i-1}P_i$ ,

$X_i$  (m) η τετμημένη του σημείου  $P_i$ ,

$Y_i$  (m) η τεταγμένη του σημείου  $P_i$ .

Στην 3.83 τα πρόσημα της διαφοράς των τετμημένων και της διαφοράς των τεταγμένων καθορίζουν το τεταρτημόριο στο οποίο ανήκει η  $T_{i-1}^i$  και συνεπώς δεν πρέπει να αγνοούνται κατά την επίλυση του τύπου.

Επιπλέον, από την αναλυτική γεωμετρία είναι γνωστό:

$$\Delta L_i = \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad (3.84)$$

, όπου:  $\Delta L_i$  (m) το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος  $P_{i-1}P_i$ .

Με τη βοήθεια της 3.84 και αθροίζοντας όλα τα επιμέρους ευθύγραμμα τμήματα έως και το σημείο  $P_i$  προκύπτει:

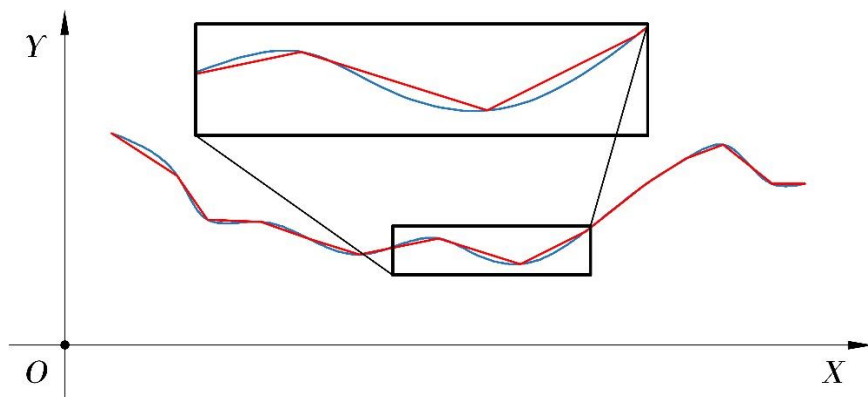
$$L_i = \sum_{i=2}^n \Delta L_i \quad (3.85)$$

, όπου:  $L_i$  (m) η απόσταση του σημείου  $P_i$  από το  $P_1$  κατά μήκος της τεθλασμένης γραμμής.

Τα ζεύγη  $(L_i, T_{i-1}^i)$  των σημείων  $P_i$ ,  $i=2, 3, \dots, n$  συνιστούν το γωνιακό διάγραμμα της διακριτής συνάρτησης. Πρέπει να σημειωθεί, πως σύμφωνα με τη θεώρηση των 3.83 και 3.84 το σημείο  $P_1$  δεν διαθέτει πληροφορία γωνίας και απόστασης και χρησιμοποιείται βοηθητικά. Εάν επιλεγόταν ως βοηθητικό το σημείο  $P_n$  δεν θα άλλαζε κάτι στο

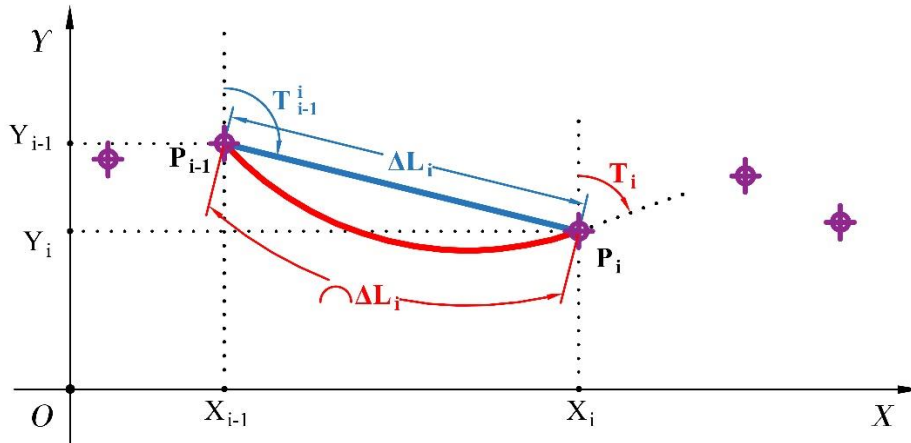
αποτέλεσμα, πέραν του ότι η γραφική παράσταση του γωνιακού διαγράμματος θα προέκυπτε μετατοπισμένη κατά ένα σημείο προς τις μικρότερες τιμές του οριζόντιου άξονα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην παραγωγή που επί της ουσίας λαμβάνει χώρα και στο ότι τα άγνωστα μεγέθη απαιτούν για τον υπολογισμό τους διάστημα και όχι σημείο. Συνιστάται, λοιπόν, το πρώτο ή το τελευταίο σημείο της διακριτής συνάρτησης να μην λαμβάνεται υπόψη καθόλου κατά το σχεδιασμό του γωνιακού διαγράμματος.

Παρόλο που η μέθοδος των ευθύγραμμων τμημάτων επιλύει το πρόβλημα γρήγορα και με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος, έρχεται με ορισμένα μειονεκτήματα. Από τη μια πλευρά, σε πειράματα που η συχνότητα καταγραφής δεδομένων δεν είναι επαρκώς μεγάλη, αυξάνει κατακόρυφα η πιθανότητα να εμφανιστεί μεγάλη απόκλιση μεταξύ της τεθλασμένης γραμμής και της “πραγματικής” γραφικής παράστασης της συνάρτησης. Με άλλα λόγια, η προσομοιωμένη καμπύλη παύει να περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στο *Σχήμα 3.13*. Άμεση συνέπεια αυτού είναι, πως το μήκος  $\Delta L_i$  στην 3.84 υπολογίζεται μικρότερο από ότι είναι στην πραγματικότητα. Αυτός ο παράγοντας γίνεται περισσότερο καθοριστικός, στις περιπτώσεις που η χρήση οργάνων μέτρησης μεγαλύτερης συχνότητας καταγραφής δεν αποτελεί επιλογή. Εξάλλου, όσο περισσότερα ευθύγραμμα τμήματα χρησιμοποιούνται, τόσο η τεθλασμένη γραμμή εκφυλίζεται σε καμπύλη και το σφάλμα μειώνεται.



*Σχήμα 3.13* Η απόκλιση μεταξύ μιας καμπύλης και μιας τεθλασμένης γραμμής αυξάνεται όσο αραιώνουν τα δεδομένα.

Από την άλλη πλευρά, σε ορισμένες πειραματικές διατάξεις η προσέγγιση της τεθλασμένης γραμμής αντιτίθεται θεμελιωδώς στα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος που προσομοιώνεται. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί η διακριτή συνάρτηση της τροχιάς ενός οχήματος που κινείται σε μια οδό. Δεδομένου πως μια ρεαλιστική συχνότητα καταγραφής από το GNSS είναι 10Hz, το σφάλμα στο μήκος που υπολογίζεται είναι ασήμαντο για μικρές ταχύτητες κυκλοφορίας και επομένως θα έλεγε κάποιος, πως η μέθοδος των ευθυγράμμων τμημάτων είναι μια καλή λύση. Παρόλα αυτά, στον υπολογισμό του γωνιακού διαγράμματος λογίζεται εκτός από το μήκος την τροχιάς και η γωνία διεύθυνσης του οχήματος στο κάθε σημείο  $P_i$ . Όπως απεικονίζεται και στο *Σχήμα 3.14*, η γωνία διεύθυνσης επηρεάζεται από τον τύπο της μαθηματικής καμπύλης που επιλέγεται κάθε φορά για την παρεμβολή.



**Σχήμα 3.14** Διαφορετική μέθοδος παρεμβολής οδηγεί σε διαφορετικές τιμές για το μήκος της τροχιάς και τη γωνία διεύθυνσης.

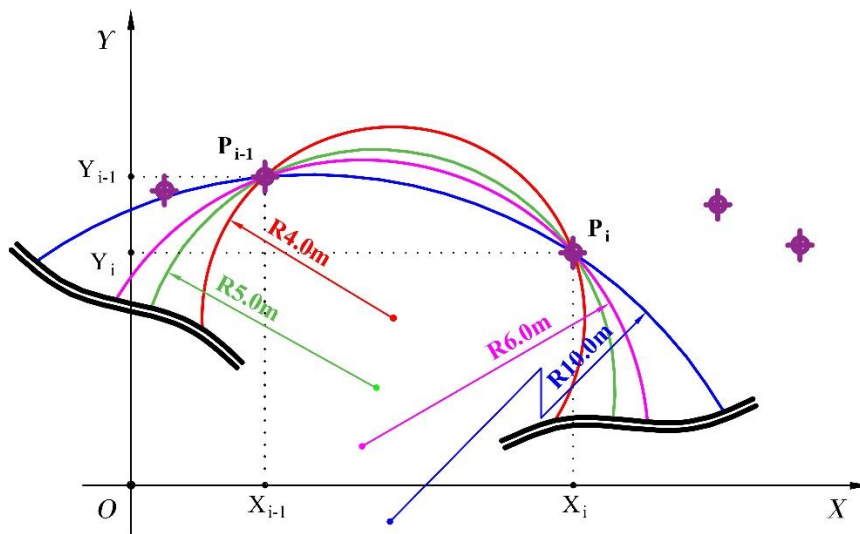
Η κίνηση ενός οχήματος σπάνια είναι ευθύγραμμη, αλλά αντίθετα καμπυλόγραμμη και μάλιστα με μια ομαλή μεταβολή του προσανατολισμού του. Η μετάβαση από το ένα ευθύγραμμο τμήμα στο επόμενο, στα σημεία  $P_i$ , προκαλεί μικρά άλματα ασυνέχειας της γωνίας διεύθυνσης, τα οποία όχι μόνο δεν παρατηρούνται στην πράξη, αλλά επιδρούν αρνητικά στην οδική ασφάλεια και την άνεση των επιβατών (αναλυτικά στην παράγραφο 2.3.1.4). Βέβαια, όποια μέθοδος παρεμβολής και να επιλεγεί, εφόσον η απόσταση μεταξύ των σημείων της διακριτής συνάρτησης δε μεταβάλλεται, τα άλματα ασυνέχειας αυτά θα εμφανίζονται πάντα. Εντούτοις, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα και πρέπει να τα ελαχιστοποιεί σε τέτοιο βαθμό, που να μην είναι καθοριστικά. Δεν θα ήταν παράλογο, λοιπόν, να υποθέσει κάποιος, πως ένα όχημα που εκτελεί καμπυλόγραμμη κίνηση, θα ήταν σωστότερο να προσομοιωθεί από μια συνάρτηση με καμπυλότητα διάφορη του μηδενός. Η θεώρηση αυτή πιθανότατα αποδίδει πιο “σωστές” τιμές στη γωνία διεύθυνσης  $T_i$ .

Προκύπτει, συνεπώς, η ανάγκη για μια διαφορετική μέθοδο παρεμβολής, τέτοια που η μαθηματική καμπύλη να προσαρμόζεται εξίσου εύκολα σε διαδοχικά γνωστά σημεία, αλλά να περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια μια καμπυλόγραμμη κίνηση.

### 3.3.2.2 Προσέγγιση με κυκλικά τόξα

Επιλέγεται ως καμπύλη παρεμβολής το κυκλικό τόξο. Με άλλα λόγια, πραγματοποιείται η παραδοχή, πως η γραφική παράσταση της διακριτής συνάρτησης αποτελείται από διαδοχικά κυκλικά τόξα, το τέλος του κάθε ενός από τα οποία αποτελεί την αρχή του επόμενου. Η ακτίνα των τόξων αυτών είναι κατάλληλη, ώστε να προσαρμόζονται με το βέλτιστο τρόπο στα γνωστά σημεία της διακριτής συνάρτησης. Επομένως, για κάθε ζεύγος σημείων και αφού είναι γνωστές οι συντεταγμένες τους, το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό της ακτίνας αυτής του εκάστοτε τόξου. Όμως, όπως είναι γνωστό από τη γεωμετρία, από δύο τυχόντα σημεία του επιπέδου μπορούν να διέρχονται άπειροι κύκλοι διαφορετικής ακτίνας. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 3.15, όπου έχουν χαραχθεί τέσσερις τυχαίοι κύκλοι διαφορετικής ακτίνας  $R$ , οι οποίοι διέρχονται από τα ίδια δύο σημεία ( $P_{i-1}$  και  $P_i$ ). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, πως το πρόβλημα είναι

αόριστο και δεν είναι σαφές κάθε φορά, το ποιος από όλους αυτούς τους κύκλους πρέπει να επιλεγεί. Απαιτείται, λοιπόν, να ληφθεί υπόψη κάποια επιπρόσθετη πληροφορία για να προσδιοριστεί το κυκλικό τόξο.

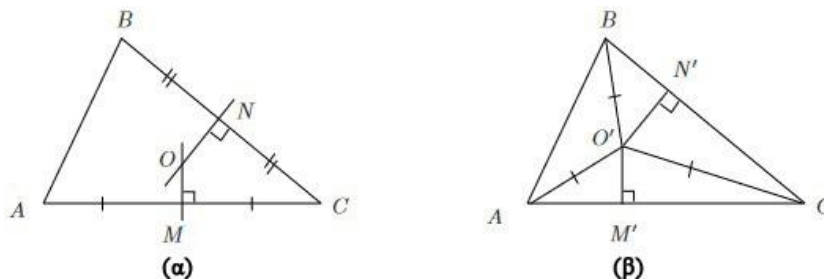


Σχήμα 3.15 Από δυο σημεία διέρχονται άπειροι κύκλοι διαφορετικής ακτίνας.

Την πληροφορία αυτή παρέχει το ακόλουθο γεωμετρικό θεώρημα.

**Θεώρημα 3.1** Υπάρχει ένας και μόνο ένας κύκλος που διέρχεται από οποιαδήποτε τρία δοσμένα μη συνευθειακά σημεία.

**Απόδειξη** Έστω  $A, B$  και  $C$  τρία μη συνευθειακά σημεία,  $M$  το μέσον του  $AC$  και  $N$  το μέσον του  $BC$ . Θεωρούνται οι μεσοκάθετοι των  $AC$  και  $BC$ . Επειδή τα  $A, B, C$  δεν είναι συνευθειακά, οι δύο εν λόγω μεσοκάθετοι δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους. Έστω  $O$  το σημείο τομής των δύο μεσοκαθέτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.16(α). Τα τρίγωνα  $AOM$  και  $COM$  είναι ίσα μεταξύ τους, με βάση το κριτήριο Π-Γ-Π, αφού  $OM_{AOM} = OM_{COM}$ ,  $\angle OMA = \angle OMC = \pi/2$  και  $AM = MC$ . Επομένως, θα ισχύει  $OA = OC$ . Ομοίως, από την ισότητα των τριγώνων  $BON$  και  $CON$  προκύπτει  $OB = OC$ . Συνάγεται, επομένως, το συμπέρασμα, πως ο κύκλος με κέντρο το  $O$  και ακτίνα  $OA$  διέρχεται και από τα τρία σημεία  $A, B$  και  $C$ .



Σχήμα 3.16 Σκαρίφημα για την απόδειξη του Θεωρήματος 3.1.

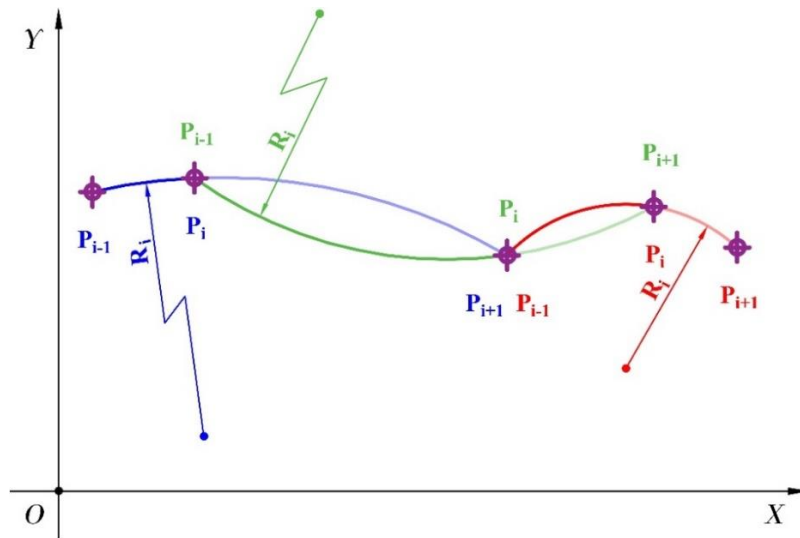
Μένει να δειχτεί, ότι ο κύκλος αυτός είναι και μοναδικός. Είναι προφανές, πως κανένας άλλος κύκλος με κέντρο το  $O$  δεν διέρχεται από τα  $A, B$  και  $C$ . Έστω τέτοιος κύκλος με κέντρο ένα άλλο σημείο  $O'$ . Έστω,

επίσης, τα σημεία  $M'$  και  $N'$ , ως οι προβολές του  $O'$  στο  $AC$  και στο  $BC$  αντίστοιχα. Ισχύει, δηλαδή,  $O'M' \perp AC$  και  $O'N' \perp BC$ , όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 3.16(β)*. Τα ορθογώνια τρίγωνα  $AO'M'$  και  $CO'M'$  που σχηματίζονται είναι ίσα μεταξύ τους, αφού  $AO'=CO'$  και  $O'M'=O'M'$ . Επομένως, θα ισχύει  $AM'=M'C$ . Αυτό σημαίνει, ότι το  $O'M'$  είναι μέρος της μεσοκαθέτου του  $AC$ , αφού  $O'M' \perp AC$  και το  $M'$  είναι το μέσον του  $AC$ . Ομοίως, το  $O'N'$  είναι μέρος της μεσοκαθέτου του  $BC$ . Άρα, το  $O'$  είναι η τομή των δύο μεσοκαθέτων. Όμως, οι δύο μεσοκάθετοι έχουν ένα μοναδικό σημείο τομής, το σημείο  $O$ . Αυτό έρχεται σε διαφωνία με την υπόθεση, ότι υπάρχει κύκλος που διέρχεται από τα  $A$ ,  $B$  και  $C$  και έχει κέντρο ένα σημείο  $O' \neq O$ .

Συνεπώς, ο κύκλος που διέρχεται από αυτά τα τρία μη συνευθειακά σημεία είναι μοναδικός. ■

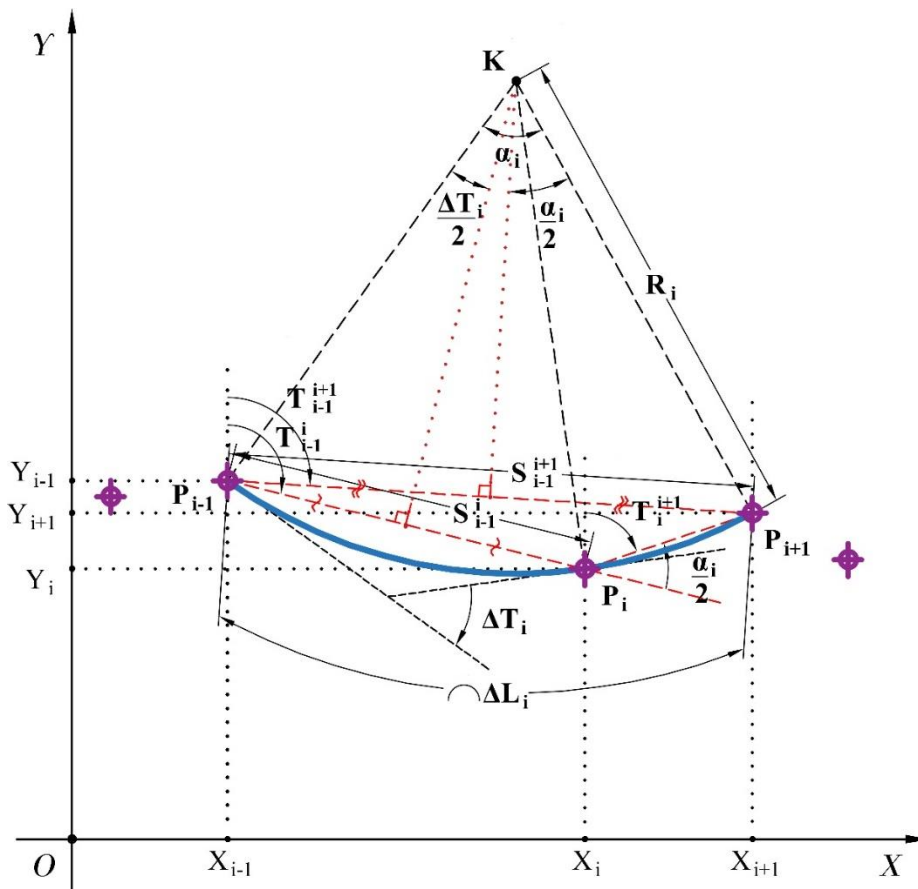
Συνεπώς, για τον υπολογισμό της απόστασης κατά μήκος της καμπύλης και της γωνίας διεύθυνσης σε κάθε σημείο  $P_i$ ,  $i=2, 3, \dots, n-1$ , όπου  $n$  το πλήθος των στοιχείων του πεδίου ορισμού μιας διακριτής συνάρτησης χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και τα σημεία  $P_{i-1}$  και  $P_{i+1}$ . Δεδομένων των τριών αυτών διαδοχικών σημείων χαράσσεται το κυκλικό τόξο  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$  που τα συνδέει. Έπειτα, θεωρείται χωριστά το  $\cap P_{i-1}P_i$ , το οποίο ονομάζεται κύριο μέρος του  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$  και υπολογίζεται η μεταβολή της γωνίας διεύθυνσης και της απόστασης κατά μήκος του. Το  $\cap P_iP_{i+1}$ , το οποίο ονομάζεται βοηθητικό μέρος, ουσιαστικά δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό των δύο αγνώστων μεγεθών αυτών, αφού το σημείο  $P_{i+1}$  δρα καθαρά ως βοηθητικό και υπεισέρχεται στην ανάλυση αποκλειστικά για να καταστούν δυνατοί οι υπολογισμοί για το  $P_i$ . Οι δύο μεταβολές που υπολογίζονται προστίθενται στη συνολική απόσταση και τη συνολική γωνία διεύθυνσης που έχουν ήδη υπολογιστεί ως προς την αρχή της συνάρτησης. Στη συνέχεια, το  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$  διαγράφεται, ο αλγόριθμος προχωράει στην επόμενη επανάληψη και η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή για το επόμενο σημείο.

Ένα σημείο που χρήζει προσοχής είναι, πως τα κυκλικά τόξα που χαράσσονται ανά τρία σημεία αλληλοεπικαλύπτονται. Αν δε συμβεί αυτό, τότε προσπερνώνται σημεία που ανήκουν στο πεδίο ορισμού της διακριτής συνάρτησης και δεν υπολογίζονται η απόσταση και η γωνία διεύθυνσης σε αυτά. Το γωνιακό διάγραμμα, σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει λανθασμένο. Η σωστή χάραξη των κυκλικών τόξων για να υπάρξει σωστό αποτέλεσμα, φαίνεται στο *Σχήμα 3.17*, όπου για οπτική διευκόλυνση το εκάστοτε κυκλικό τόξο έχει χαραχθεί με έντονη γραμμή στο κύριο και αχνή στο βοηθητικό του μέρος. Ένα αχνό μέρος τόξου πρέπει πάντα να επικαλύπτεται από το έντονο μέρος του επόμενου τόξου. Επιπλέον, το εν λόγω σχήμα είναι κωδικοποιημένο με χρώματα, έτσι που το κάθε σημείο στο οποίο υπολογίζεται η απόσταση και η γωνία διεύθυνσης αντιστοιχεί στο κυκλικό τόξο που χρησιμοποιείται για τους εν λόγω υπολογισμούς.



Σχήμα 3.17 Τα κυκλικά τόξα που προσαρμόζονται σε διαδοχικά σημεία της διακριτής συνάρτησης πρέπει να αλληλοεπικαλύπτονται.

Στο Σχήμα 3.18 απεικονίζεται ένα τμήμα της γραφικής παράστασης μιας διακριτής συνάρτησης, καθώς και το κυκλικό τόξο που συνδέει τρία διαδοχικά σημεία της. Επιπρόσθετα, πάνω στο σχήμα σημειώνονται όλα τα γεωμετρικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταβολής της απόστασης και της γωνίας διεύθυνσης κατά μήκος του κύριου μέρους του κυκλικού τόξου αυτού.



Σχήμα 3.18 Υπολογισμό της μεταβολής της απόστασης και της γωνίας διεύθυνσης κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος σε ένα τυχαίο σημείο μιας διακριτής συνάρτησης.

Για κάθε σημείο  $P_i(x_i, y_i)$ ,  $i=2, 3, \dots, n-1$ , χαράσσεται το  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$ , καθώς επίσης και οι χορδές  $P_{i-1}P_i$ ,  $P_iP_{i+1}$  και  $P_{i-1}P_{i+1}$ . Από την τριγωνομετρία ισχύει:

$$T_{i-1}^i = \tan^{-1} \frac{X_i - X_{i-1}}{Y_i - Y_{i-1}} \quad (3.86)$$

$$T_i^{i+1} = \tan^{-1} \frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{i+1} - Y_i} \quad (3.87)$$

$$T_{i-1}^{i+1} = \tan^{-1} \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{Y_{i+1} - Y_{i-1}} \quad (3.88)$$

, όπου:  $T_{i-1}^i$  (rad) η γωνία διεύθυνσης της χορδής  $P_{i-1}P_i$  στο σημείο  $P_{i-1}$ ,  
 $X_i$  (m) η τετμημένη του σημείου  $P_i$ ,  
 $Y_i$  (m) η τεταγμένη του σημείου  $P_i$ .

Επιπλέον, από τη γεωμετρία είναι γνωστό το ακόλουθο θεώρημα (Αργυρόπουλος και συν.).

**Θεώρημα 3.2** Κάθε εγγεγραμμένη γωνία ισούται με το μισό της επίκεντρης γωνίας που βαίνει στο ίδιο τόξο.

Από το Θεώρημα 3.2 θα ισχύει:

$$\angle P_{i-1}P_iP_{i+1} = \frac{4L - \angle P_{i-1}KP_{i+1}}{2} \equiv \frac{4L - \alpha_i}{2} \quad (3.89)$$

, όπου:  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$  (rad) η εγγεγραμμένη γωνία που βαίνει στο τόξο  $2\pi - \cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$ ,  
 $\angle P_{i-1}KP_{i+1} \equiv \alpha_i$  (rad) η επίκεντρη γωνία που βαίνει στο τόξο  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$ .

Ονομάζοντας προσωρινά την παραπληρωματική γωνία της  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$  ως  $\angle \omega$  και αντικαθιστώντας στην 3.89, προκύπτει:

$$2L - \angle \omega = \frac{4L - \alpha_i}{2} \quad (3.90)$$

Επιλύοντας την 3.90 ως προς  $\angle \omega$ , προκύπτει:

$$\angle \omega = \frac{\alpha_i}{2} \quad (3.91)$$

Αποδεικνύεται, επομένως, πως η εξωτερική γωνία  $\angle \omega$  του τριγώνου  $P_{i-1}P_iP_{i+1}$  ισούται με το μισό της επίκεντρης γωνίας που βαίνει στο τόξο  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$ . Όμως, η τιμή της  $\angle \omega$  δεν έχει βρεθεί ακόμα. Για να υπολογιστεί χρησιμοποιούνται οι 3.86 και 3.87:

$$\angle \omega \equiv \frac{\alpha_i}{2} = T_i^{i+1} - T_{i-1}^i \quad (3.92)$$

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να υπενθυμιστεί, πως ως θετικές έχουν οριστεί οι δεξιόστροφες γωνίες. Επιπλέον, ο συμβολισμός  $\angle \omega$  για την παραπληρωματική γωνία της  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$  παύει να χρησιμοποιείται και στο εξής η ονομασία της βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με το Σχήμα 3.18. Εάν αυτό κριθεί απαραίτητο, η επίκεντρη γωνία  $\alpha_i$  δύναται να προσδιοριστεί με αναδιάταξη της 3.92.

Με χρήση τριγωνομετρίας και με τη βοήθεια των 3.86 και 3.88 υπολογίζονται:

$$S_{i-1}^i = \frac{X_i - X_{i-1}}{\sin T_{i-1}^i} = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{\cos T_{i-1}^i} \quad (3.93\alpha, \beta)$$

, όπου:  $S_{i-1}^i$  (m) το μήκος της χορδής  $P_{i-1}P_i$ , και:

$$S_{i-1}^{i+1} = \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{\sin T_{i-1}^{i+1}} = \frac{Y_{i+1} - Y_{i-1}}{\cos T_{i-1}^{i+1}} \quad (3.94\alpha, \beta)$$

, όπου:  $S_{i-1}^{i+1}$  (m) το μήκος της χορδής  $P_{i-1}P_{i+1}$ .

Το απόστημα από το Κ έως τη χορδή  $S_{i-1}^{i+1}$  αποτελεί ταυτόχρονα τη διάμεσο της  $S_{i-1}^{i+1}$  και τη διχοτόμο της  $\alpha_i$ . Εφαρμόζοντας τον ορισμό του ημιτόνου, σε όποιο από τα δύο τρίγωνα που προκύπτουν, ισχύει:

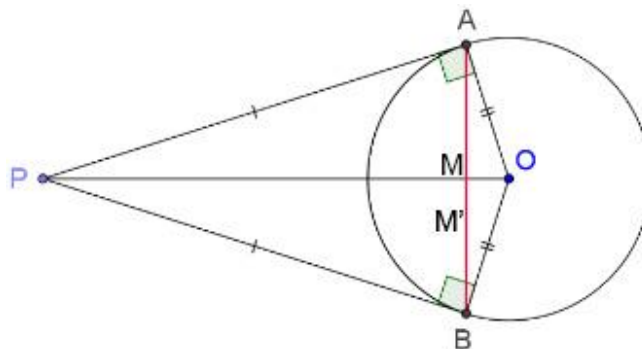
$$\sin \frac{\alpha_i}{2} = \frac{S_{i-1}^{i+1}}{2R_i} \Leftrightarrow R_i = \frac{S_{i-1}^{i+1}}{2 \sin \frac{\alpha_i}{2}} \quad (3.95)$$

, όπου:  $R_i$  (m) η ακτίνα του κυκλικού τόξου  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$ .

Για την εύρεση της αλλαγής διεύθυνσης των εφαπτομένων  $\angle \Delta T_i$  χρησιμοποιούνται το ακόλουθο θεώρημα και πορίσματα. Για διευκόλυνση στην αναφορά ονομάζεται προσωρινά  $\Pi$  το σημείο τομής των τμημάτων που εφάπτονται στο  $\cap P_{i-1}P_iP_{i+1}$  στα σημεία  $P_{i-1}$  και  $P_i$ .

**Θεώρημα 3.3** Τα εφαιπτόμενα τμήματα κύκλου, που άγονται από σημείο εκτός αυτού είναι ίσα μεταξύ τους.

**Απόδειξη** Έστω PA και PB οι δύο εφαπτομένες που άγονται από το σημείο P εκτός του κύκλου. Φέρνοντας τις ακτίνες OA και OB, όπως στο Σχήμα 3.19, σχηματίζονται οι γωνίες  $\angle PAO$  και  $\angle PBO$ , οι οποίες είναι ορθές, αφού μια ευθεία που εφάπτεται σε έναν κύκλο είναι πάντα κάθετη στην ακτίνα που καταλήγει στο σημείο επαφής. Από την ισότητα τριγώνων, προκύπτει πως τα τρίγωνα PAO και PBO είναι ίσα μεταξύ τους, αφού είναι ορθογώνια και επιπλέον ισχύει PO=PO και OA=OB. Επομένως, PA=PB. ■



Σχήμα 3.19 Σκαρίφημα για την απόδειξη του Θεωρήματος 3.3.



**Πόρισμα 3.1** Η διακεντρική ευθεία διχοτομεί τη γωνία των εφαπτόμενων τμημάτων και τη γωνία των ακτίνων εκείνων, που καταλήγουν στα σημεία επαφής.

**Απόδειξη** Αφού τα τρίγωνα ΡΑΟ και ΡΒΟ είναι ίσα μεταξύ τους, οι αντίστοιχες γωνίες τους είναι επίσης ίσες. Επομένως, για τις γωνίες της διακεντρικής ευθείας και των εφαπτόμενων ισχύει  $\angle OPA = \angle OPB$ , ενώ για τις γωνίες της διακεντρικής ευθείας και των ακτίνων ισχύει  $\angle POB = \angle POA$ . Συνεπώς, η  $\angle APB$  και η  $\angle BOA$  διχοτομούνται από τη διακεντρική ευθεία. ■

**Πόρισμα 3.2** Η διακεντρική ευθεία είναι μεσοκάθετος της χορδής που έχει σαν άκρα τα σημεία επαφής των εφαπτόμενων στον κύκλο τμημάτων.

**Απόδειξη** Έστω Μ το σημείο τομής της χορδής ΑΒ και της διακεντρικής ευθείας ΡΟ. Τότε τα τρίγωνα ΑΟΜ και ΒΟΜ είναι ίσα μεταξύ τους με βάση το κριτήριο Π-Γ-Π, αφού  $OA = OB$ ,  $\angle AOM = \angle BOM$  και  $OM = OM$ . Επομένως, θα ισχύει  $AM = MB$ , που σημαίνει πως το σημείο Μ είναι το μέσον της χορδής ΑΒ.

Μένει να αποδειχτεί η καθετότητα. Έστω Μ' η προβολή του Ρ πάνω στη χορδή ΑΒ. Αφού τα τρίγωνα ΑΟΜ και ΒΟΜ είναι ίσα μεταξύ τους και το Μ' ανήκει στην ίδια χορδή με το Μ, συνεπάγεται πως  $\angle OAM' = \angle OBM'$ . Επομένως θα ισχύει και  $\angle M'AP = \angle M'BP$ . Λαμβάνοντας το τελευταίο υπόψη και δεδομένου πως επιπλέον ισχύει  $PA = PB$ , προκύπτει το συμπέρασμα, πως τα ορθογώνια τρίγωνα Μ'ΑΡ και Μ'ΒΡ είναι ίσα μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει, πως  $AM' = M'B$ , άρα δηλαδή πως το Μ' είναι το μέσον της χορδής ΑΒ. Όμως και το Μ είναι το μέσον της χορδής ΑΒ και άρα τελικά  $M \equiv M'$ . Συνεπώς, η διακεντρική ακτίνα ΡΟ είναι η μεσοκάθετος της χορδής ΑΒ. ■

Από τα παραπάνω προκύπτει, πως το απόστημα από το Κ έως τη χορδή  $S_{i-1}^i$  έχει την ίδια διεύθυνση με τη διακεντρική ευθεία ΠΚ. Δεδομένου, πως οι  $\angle P_{i-1}PP_i$  και  $\angle \Delta T_i$  είναι παραπληρωματικές μεταξύ τους και πως η  $\angle KP_{i-1}P$  (ομοίως η  $\angle KP_iP$ ) είναι ορθή, στο σχηματιζόμενο τρίγωνο  $KP_{i-1}P$  (ομοίως στο  $KP_iP$ ) θα ισχύει:

$$\angle P_{i-1}PK + \angle P_{i-1}KP + \angle PP_{i-1}K = 2L \Leftrightarrow \frac{2L - \Delta T_i}{2} + \angle P_{i-1}KP + 1L = 2L \quad (3.96)$$

Επιλύοντας την 3.96 προκύπτει:

$$\angle P_{i-1}KP = \frac{\Delta T_i}{2} = \angle P_iKP \quad (3.97)$$

Το βοηθητικό σημείο Π παύει να χρησιμοποιείται και στο εξής ο συμβολισμός βρίσκεται εκ νέου σε πλήρη συμφωνία με το Σχήμα 3.18. Εφαρμόζοντας τον ορισμό του ημίτονου σε όποιο από τα δύο τρίγωνα που σχηματίζονται από τη χορδή  $S_{i-1}^i$  και το απόστημά της, προκύπτει:

$$\sin \frac{\Delta T_i}{2} = \frac{S_{i-1}^i}{R_i} \Rightarrow \Delta T_i = 2 \sin^{-1} \frac{S_{i-1}^i}{2R_i} \quad (3.98)$$

, όπου:  $\Delta T_i$  (rad) η μεταβολή της γωνίας διεύθυνσης στο μήκος του  $\cap P_{i-1}P_i$ .

Από το Πόρισμα 3.2 και την 3.97 συνεπάγεται, πως η επίκεντρη γωνία  $\angle P_{i-1}KP_i$  που βαίνει στο  $\cap P_{i-1}P_i$  ισούται με  $\Delta T_i$ . Όμως, είναι γνωστό πως το μήκος ενός κυκλικού τόξου, η ακτίνα του και η επίκεντρη γωνία που βαίνει σε αυτό σχετίζονται. Επομένως, υπολογίζεται:

$$\Delta L_i = R_i \cdot \Delta T_i \quad (3.99)$$

, όπου:  $\Delta L_i$  (m) το μήκος του  $\cap P_{i-1}P_i$ .

Με τη βοήθεια των 3.98 και 3.99 και αθροίζοντας για όλα τα επιμέρους κύρια μέρη των κυκλικών τόξων έως και το σημείο  $P_1$  προκύπτει:

$$T_i = \sum_{i=2}^{n-1} \Delta T_i \quad (3.100)$$

, όπου:  $L_i$  (m) η απόσταση του σημείου  $P_i$  από το  $P_1$  κατά μήκος της καμπύλης που σχηματίζεται από τα διαδοχικά κυκλικά τόξα, και:

$$L_i = \sum_{i=2}^{n-1} \Delta L_i \quad (3.101)$$

, όπου:  $T_i$  (rad) η γωνία διεύθυνσης του σημείου  $P_i$  σε σχέση με τη γωνία διεύθυνσης του  $P_1$ .

Τα ζεύγη  $(L_i, T_i)$  των σημείων  $P_i, i=2, 3, \dots, n-1$  συνιστούν το γωνιακό διάγραμμα της διακριτής συνάρτησης. Πρέπει να σημειωθεί, πως σύμφωνα με τη θεώρηση των 3.98 και 3.99 το σημείο  $P_1$  δεν διαθέτει πληροφορία γωνίας και απόστασης (απαιτείται διάστημα και όχι σημείο) και χρησιμοποιείται βοηθητικά. Επιπλέον, το σημείο  $P_n$  χρησιμοποιείται και αυτό βοηθητικά, καθώς χρησιμεύει στο να χαραχθεί το κυκλικό τόξο  $\cap P_{n-2}P_{n-1}P_n$  και έτσι δεν διαθέτει ούτε αυτό πληροφορία γωνίας και απόστασης. Συνιστάται, λοιπόν, το πρώτο και το τελευταίο σημείο της διακριτής συνάρτησης να μη λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του γωνιακού διαγράμματος.

### 3.3.3 Εφαρμογές στην Οδοποιία

Στην Οδοποιία το σχέδιο που απεικονίζει την οδό όταν κάποιος την κοιτάζει από ψηλά, η κάτοψη της οδού δηλαδή, ονομάζεται οριζοντιογραφία. Η οριζοντιογραφία αποτυπώνεται σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ενώ οι τετμημένες και οι τεταγμένες είναι συναρτήσεις με ανεξάρτητη μεταβλητή το χρόνο. Σε πλήρη αναλογία με αυτό, όταν γίνεται αναφορά στην κίνηση ενός οχήματος, το σχέδιο που απεικονίζει τη διαδρομή που ακολούθησε το όχημα όταν κάποιος την κοιτάζει από ψηλά, ονομάζεται τροχιά. Επιπλέον, στην Οδοποιία χρησιμοποιείται ο όρος “χιλιομετρική θέση” (Χ.Θ.) της οδού σε μια συγκεκριμένη διατομή, που υποδηλώνει την απόσταση από το σημείο αρχής της οδού έως και τη διατομή ενδιαφέροντος, μετρημένη επί του άξονα της οδού.

Επομένως, το γωνιακό διάγραμμα ενός οδικού τμήματος είναι η γωνία διεύθυνσης που έχει το υπόψη οδικό τμήμα σε κάθε χιλιομετρική θέση, συναρτήσει της χιλιομετρικής θέσης. Αξίζει να σημειωθεί, πως στην Οδοποιία πολλές φορές οι γωνίες διεύθυνσης είναι εκφρασμένες σε σχέση με το Βορρά και άρα το γωνιακό διάγραμμα που αντιστοιχεί σε μια οδό αποτελεί ουσιαστικά το διάγραμμα αζιμούθιων της οδού αυτής.

Τα στοιχειώδη γεωμετρικά στοιχεία που αποτελούν την οριζοντιογραφία μιας οδού είναι η ευθυγραμμία, το κυκλικό τόξο και η κλωθοειδής. Αυτά, ύστερα, συνδυάζονται μεταξύ τους για τη δημιουργία πιο σύνθετων καμπυλών.

Τα γεωμετρικά αυτά στοιχεία βολεύει να γραφούν στη μορφή μιας εξίσωσης Cesàro, δηλαδή η καμπυλότητα  $\kappa$  να είναι συνάρτηση της Χ.Θ.  $L$  της οδού. Αρχικά, όσον αφορά στην ευθυγραμμία ισχύει:

$$\kappa(L) = 0 \quad (3.102)$$

, σχέση που προκύπτει άμεσα και από την 3.61, αφού σε μια ευθεία δεν μεταβάλλεται η γωνία διεύθυνσης. Ομοίως, για το κυκλικό τόξο ισχύει:

$$\kappa(L) = \frac{1}{R} \quad (3.103)$$

, όπως δείχτηκε και στην 3.62, όπου  $R$  (m) είναι η ακτίνα του κύκλου αυτού. Τέλος, για την κλωθοειδή ισχύει:

$$\kappa(L) = C \cdot L \quad (3.104)$$

, όπως δείχτηκε και στην 3.8. Μάλιστα, όπως δείχτηκε στην 3.10,  $C=1/A^2$ , όπου  $A$  (m) είναι η παράμετρος της κλωθοειδούς.

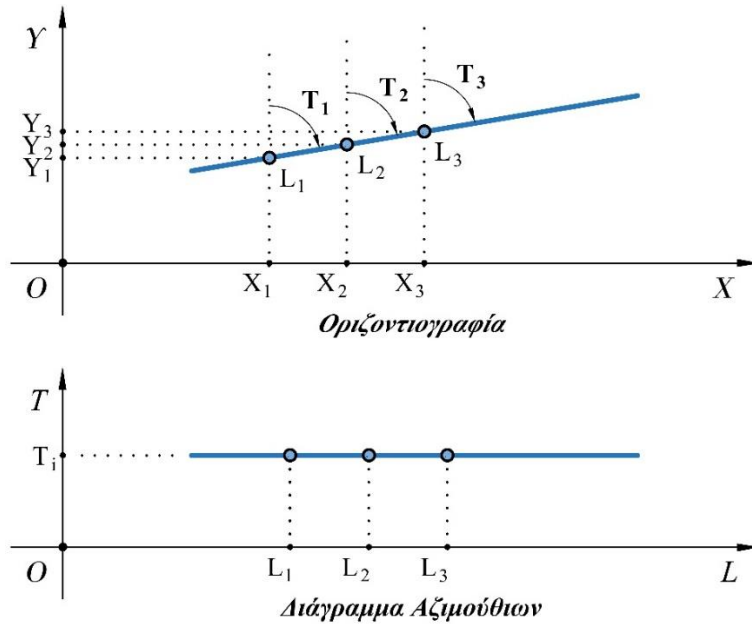
Αν οι 3.102, 3.103 και 3.104 ολοκληρωθούν μια φορά ως προς τη Χ.Θ.  $L$ , προκύπτει η γωνία διεύθυνσης  $T$  ως συνάρτηση της Χ.Θ. για κάθε ένα από τα παραπάνω γεωμετρικά στοιχεία. Μια εξίσωση γραμμένη σε αυτή τη μορφή ονομάζεται εξίσωση Whewell.

Για την ευθυγραμμία ισχύει:

$$T(L) = c_1 \quad (3.105)$$

, όπου:  $c_1$  η σταθερά ολοκλήρωσης.

Επομένως, το διάγραμμα αζιμούθιων ενός οδικού τμήματος που αποτελείται από ευθυγραμμία είναι μια οριζόντια ευθεία. Η οριζοντιογραφία του εν λόγω οδικού τμήματος και το διάγραμμα αζιμούθιων που αντιστοιχεί σε αυτή απεικονίζονται στο Σχήμα 3.20.



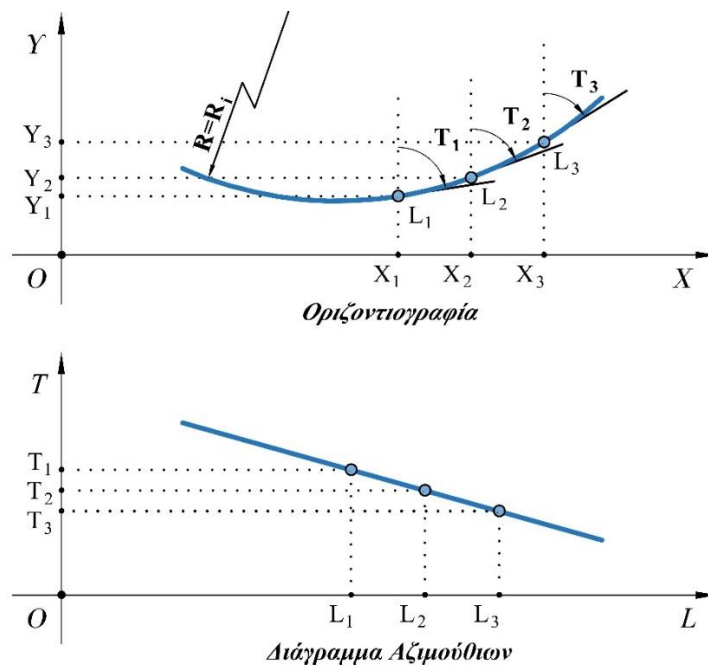
Σχήμα 3.20 Το διάγραμμα αζιμούθιων μιας ευθυγραμμίας είναι μιας οριζόντια γραμμής.

Για το κυκλικό τόξο ισχύει:

$$T(L) = \frac{1}{R} \cdot L + c_2 \quad (3.106)$$

, όπου  $c_2$  η σταθερά ολοκλήρωσης.

Επομένως, το διάγραμμα αζιμούθιων ενός οδικού τμήματος που αποτελείται από κυκλικό τόξο είναι μια κεκλιμένη ευθεία, η οποία μάλιστα έχει συντελεστή διεύθυνσης το αντίστροφο της ακτίνας του κυκλικού τόξου αυτού. Η οριζοντιογραφία του εν λόγω οδικού τμήματος και το διάγραμμα αζιμούθιων που αντιστοιχεί σε αυτή απεικονίζονται στο Σχήμα 3.21.



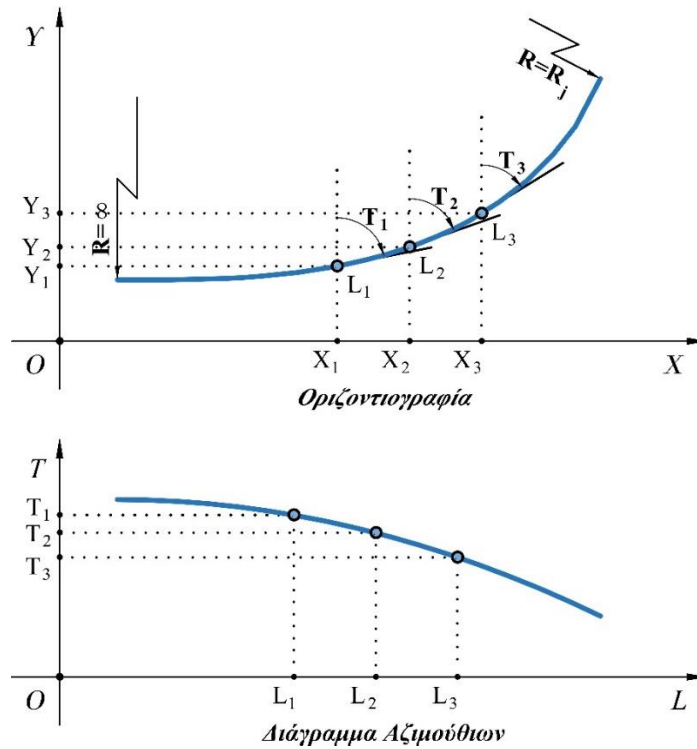
Σχήμα 3.21 Το διάγραμμα αζιμούθιων ενός κυκλικού τόξου είναι μια κεκλιμένη γραμμής.

Για την κλωθοειδή ισχύει:

$$T(L) = \frac{1}{R} \cdot L^2 + c_2 \cdot L + c_3 \quad (3.107)$$

, όπου  $c_3$  η σταθερά ολοκλήρωσης.

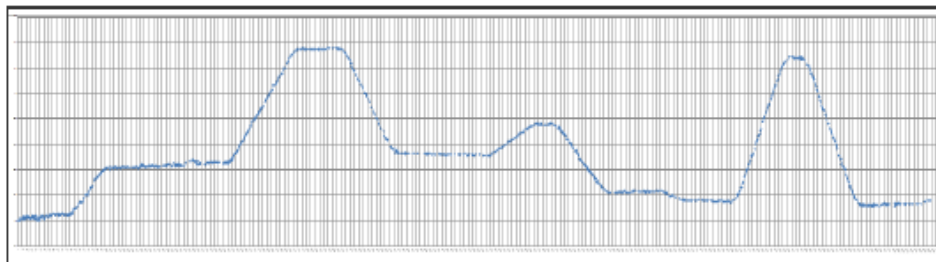
Επομένως, το διάγραμμα αζιμούθιων ενός οδικού τμήματος που αποτελείται από κλωθοειδή είναι μια παραβολή. Η οριζοντιογραφία του εν λόγω οδικού τμήματος και το διάγραμμα αζιμούθιων που αντιστοιχεί σε αυτή απεικονίζονται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22 Το διάγραμμα αζιμούθιων μιας κλωθοειδούς είναι μια παραβολή.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα, πως όταν στην οριζοντιογραφία υπάρχει μια αριστερόστροφη καμπύλη, η γραφική παράσταση του διαγράμματος αζιμούθιων κατέρχεται. Αντίστοιχα, όταν στην οριζοντιογραφία υπάρχει μια δεξιόστροφη καμπύλη, η γραφική παράσταση του διαγράμματος αζιμούθιων ανέρχεται.

Στο Σχήμα 3.23 απεικονίζεται το διάγραμμα αζιμούθιων ενός υφιστάμενου οδικού τμήματος, το οποίο περιλαμβάνει ευθυγραμμίες (οριζόντιες ευθείες) και κυκλικά τόξα (κεκλιμένες ευθείες). Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τέσσερις δεξιόστροφες και τρεις αριστερόστροφες καμπύλες, μεταξύ των οποίων υπάρχουν οι εν λόγω ευθυγραμμίες.



Σχήμα 3.23 Το διάγραμμα αζιμούθιων που αντιστοιχεί σε ένα υφιστάμενο οδικό τμήμα (Βασιλάς, 2013).

Μια πολύ συχνή εφαρμογή του γωνιακού διαγράμματος στην οδοποιία είναι η αποτύπωση της χάραξης μιας οδού. Πολλές φορές είναι επιθυμητό να βρεθούν τα γεωμετρικά στοιχεία της οριζοντιογραφίας σε μια υφιστάμενη οδό, αλλά δε δύναται να αναζητηθούν στα σχέδια της αρχικής μελέτης. Αυτό μπορεί να συμβαίνει, επειδή τα τελευταία δεν είναι διαθέσιμα ή επειδή υπάρχουν υποψίες, πως κατά την κατασκευή δημιουργήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στις θεωρητικές τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων.

Η τοπογραφική αποτύπωση είναι απλή υπόθεση, καθώς η απαιτούμενη διάταξη περιλαμβάνει ένα όχημα εξοπλισμένο με GNSS, το οποίο πρέπει να διανύσει το οδικό τμήμα ενδιαφέροντος σε όλο του το μήκος. Κατόπιν, τα στίγματα θέσης σε κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιούνται για να οριστεί μια διακριτή συνάρτηση, η οποία αποτελεί την απεικόνιση, στο χώρο ή το επίπεδο, της τροχιάς που ακολούθησε το όχημα. Στη συνέχεια, μορφώνεται το γωνιακό διάγραμμα της τροχιάς του οχήματος με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω. Κάνοντας την εύλογη παραδοχή, πως το όχημα κινείται στο μέσον της λωρίδας κυκλοφορίας, χωρίς να αποκλίνει εγκαρσίως από το διαμήκη άξονα αυτής, τότε το γωνιακό διάγραμμα της τροχιάς του οχήματος και το γωνιακό διάγραμμα της οδού ταυτίζονται. Ύστερα, πραγματοποιούνται στατιστικές μέθοδοι παλινδρόμησης στο γωνιακό διάγραμμα της οδού, ώστε να εξαχθούν οι ακριβείς αριθμητικές τιμές για τις παραμέτρους των επιμέρους στοιχείων της οριζοντιογραφίας.

Το γωνιακό διάγραμμα αποτελεί μια διαισθητική και εποπτική απεικόνιση της οριζοντιογραφίας. Επιπλέον, σε σχέση με το σχέδιο της οριζοντιογραφίας οι γεωμετρικές καμπύλες της οδού απεικονίζονται σε μια πιο απλή μορφή τους, από μαθηματική σκοπιά. Αυτό συμβαίνει, επειδή στο γωνιακό διάγραμμα απεικονίζεται η γωνία διεύθυνσης συναρτήσει του μήκους της τροχιάς, ενώ η οριζοντιογραφία αποτελεί μια ταυτόχρονη απεικόνιση στο ίδιο επίπεδο, των χρονοσειρών των τετμημένων και των τεταγμένων. Είναι, δηλαδή, η απεικόνιση των συντεταγμένων της τροχιάς του οχήματος συναρτήσει του χρόνου. Το σημαντικό πλεονέκτημα, όμως, του γωνιακού διαγράμματος είναι, πως προσφέρει μια σαφή οπτική διακριτοποίηση των επιμέρους γεωμετρικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται μια οδός. Έτσι, η οριζοντιογραφία μπορεί εύκολα να αποσυντεθεί στις επιμέρους γεωμετρικές καμπύλες, των οποίων οι παράμετροι υπολογίζονται, κατόπιν, με απλές διαδικασίες. Για όλους τους παραπάνω λόγους, η χρήση του γωνιακού διαγράμματος συναντάται ευρέως στη διεθνή πρακτική.

Το γωνιακό διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μελέτη της γενικότερης κίνησης ενός οχήματος μέσα στην οδό. Η μόνη διαφοροποίηση έγκειται στο ότι η παραδοχή που έγινε παραπάνω καταλύεται, καθώς η τροχιά του οχήματος αποκλίνει από τη διεύθυνση της οδού. Επιπλέον, αντί για τον όρο “οριζοντιογραφία της οδού”, πλέον χρησιμοποιείται ο όρος “τροχιά του οχήματος”. Με αυτόν τον τρόπο δύναται να εξαχθούν σχέσεις και παράμετροι για λιγότερο τετριμμένες κινήσεις που μπορεί να εκτελέσει ένα όχημα καθώς ταξιδεύει σε μια οδό. Μια τέτοια κίνηση είναι η αλλαγή λωρίδας, που εκτελείται τόσο ανεξάρτητα όσο και ως μέρος ενός ελιγμού προσπέρασης.

### 3.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ

Το 1978 η κυβέρνηση των ΗΠΑ πραγματοποίησε την εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου ραδιοπλοήγησης, στο πλαίσιο του προγράμματος Navstar Global Positioning System (GPS). Ακολούθησαν πολλές ακόμα και τελικά το 1993 τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία ο πλήρης σχηματισμός των 24 δορυφόρων. Κάπως έτσι, η πλοήγηση άλλαξε για πάντα. Το GPS δεν είναι παρά ένα μόνο από τα διάφορα, πλέον, κρατικά συστήματα δορυφορικής πλοήγησης, μιας υπηρεσίας που ονομάζεται Global Navigation Satellite System (GNSS).

#### 3.4.1 Global Navigation Satellite System

Ένα GNSS αποτελείται από ένα σχηματισμό δορυφόρων, οι οποίοι βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη και εκπέμπουν συνεχώς σήματα κατευθυνόμενα προς την επιφάνειά της. Το κάθε σήμα περιέχει ως πληροφορία τη χρονική στιγμή κατά την οποία αυτό εκπέμφθηκε, καθώς και την ακριβή θέση που έχει ο συγκεκριμένος δορυφόρος εκείνη τη χρονική στιγμή. Με τη βοήθεια ενός κατάλληλα συντονισμένου δέκτη κάποιος μπορεί να προσδιορίσει την τοποθεσία του (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο), μέσω της σύγκρισης του κωδικοποιημένου χρόνου εκπομπής από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους ταυτόχρονα. Το σήμα που εκπέμπεται από έναν πομπό διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις, επομένως κινούμενο για ορισμένο χρόνο σχηματίζει το κέλυφος μιας σφαιράς. Ως εκ τούτου, η μοναδική θέση στην οποία βρίσκεται ο δέκτης τοποθετείται στο σημείο τομής των τεσσάρων σφαιρών, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.24.



*Σχήμα 3.24 Το σημείο τομής τεσσάρων σφαιρών στο χώρο αντιπροσωπεύει το σημείο στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης GNSS (GISGeography, 2021).*

Μια συσκευή GNSS δύναται να προσδιορίσει τη θέση του κατόχου της με ακρίβεια πολύ λίγων μέτρων. Για παράδειγμα, η ακρίβεια ενός δέκτη GPS μονής συχνότητας, χωρίς καμία τεχνική βελτίωσης (standalone GNSS) προσδιορίζεται θεωρητικά στα 16m, με την πραγματική τιμή να είναι αρκετά μικρότερη, κοντά στα 3-5m (Clynch, 2001). Ακόμη, ένας δέκτης GPS μονής συχνότητας τοποθετημένος σε έξυπνο κινητό

(smartphone) προσδιορίζει τη θέση συνήθως εντός ακτίνας 4.9m, κάτω από ανοικτό ουρανό (GPS.GOV). Βέβαια, η ακρίβεια είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το πόσοι δορυφόροι είναι στο οπτικό πεδίο κάθε χρονική στιγμή, η συχνότητα εκπομπής των δορυφόρων στην οποία συντονίζεται ο δέκτης, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, η ύπαρξη υψηλών εμποδίων πέριξ του δέκτη κλπ. Σε γενικές γραμμές, με όσους περισσότερους δορυφόρους έχει οπτική επαφή ένας δέκτης, τόσο καλύτερη η ακρίβεια. Επιπλέον, όταν ο δέκτης είναι συντονισμένος σε διπλή συχνότητα (dual frequency GNSS) παρέχει καλύτερο προσδιορισμό θέσης.

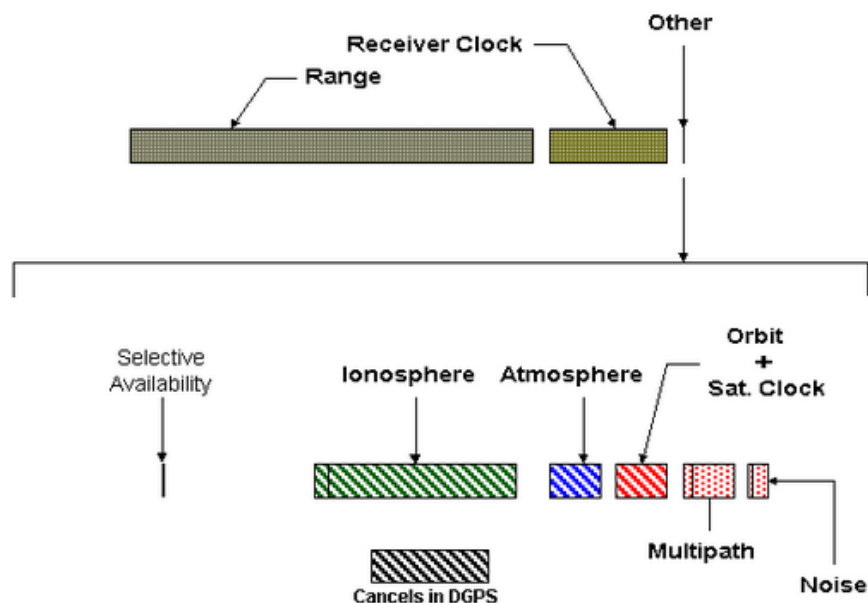
Ένας ακόμη λόγος που μειώνεται η ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης είναι ο ανθρώπινος παράγοντας. Κάποια κυρίαρχη δύναμη ενδέχεται να προκαλεί παρεμβολές στο σήμα που εκπέμπουν οι δορυφόροι, καθώς αυτό ταξιδεύει ακόμα στην ατμόσφαιρα και πριν φτάσει στο έδαφος, με σκοπό να υποβαθμίσει την απόδοση του συστήματος πλοήγησης προς ίδιον όφελος. Ακόμα δε, ο ίδιος ο διαχειριστής του συστήματος GNSS έχει τη δυνατότητα να μην επιτρέπει την ανεμπόδιστη χρήση του από το κοινό και να αυξάνει σκόπιμα κατά πολύ την ακτίνα προσδιορισμού θέσης για συγκεκριμένους χρήστες.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα GPS, το οποίο αρχικά προοριζόταν από τις ΗΠΑ αποκλειστικά για στρατιωτική χρήση. Σταδιακά έγινε διαθέσιμο και για πολιτική χρήση, αλλά κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 η κυβέρνηση των ΗΠΑ είχε επιβάλλει στο σύστημα έναν περιορισμό, γνωστό ως “επιλεκτική διαθεσιμότητα” (selective availability). Με τον περιορισμό αυτό αυξανόταν κατά πολύ η οριζόντια ακτίνα σφάλματος για όλες τις χρήσεις εκτός από τις στρατιωτικές εφαρμογές, σε παγκόσμιο επίπεδο (GPS.GOV). Η επιλεκτική διαθεσιμότητα άρτησε την 1<sup>η</sup> Μαΐου του 2000. Παρότι η εισαγωγή της σε πρώτη φάση απέτρεψε την εκμετάλλευση της πλήρους δυνατότητας της δορυφορικής πλοήγησης σε καθημερινές δραστηριότητες, τελικά συντέλεσε σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη τεχνικών που παρακάμπτουν εντελώς τον επιβαλλόμενο περιορισμό. Εξάλλου, όπως λέει μια παροιμία, “η αναγκαιότητα είναι η μητέρα της εφεύρεσης” (necessity is the mother of invention).

### 3.4.2 Παράγοντες αύξησης σφαλμάτων στα GNSS

Κάθε φορά που ένας δέκτης GNSS προσδιορίζει την τοποθεσία του, η επίλυση αποτελείται από την αληθινή απόσταση του σημείου από το δορυφόρο και μια επιπλέον απόσταση, η οποία είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη και αποτελεί το σφάλμα της μέτρησης. Αν το σφάλμα αυτό, το οποίο μεταβάλλεται με το χρόνο και το χώρο, συνυπολογιστεί για όλους τους δορυφόρους από τους οποίους προκύπτει ο προσδιορισμός της θέσης, δημιουργείται ένας κύκλος με κέντρο την αληθινή θέση του δέκτη και ακτίνα μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή αυτή κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι λίγα εκατοστά και αποτελεί την ακρίβεια του GNSS. Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία τα οποία συνιστούν την υπολογιζόμενη απόσταση από το δορυφόρο του GNSS έως και το δέκτη στην επιφάνεια της Γης. Είναι προφανές, πως όσες περισσότερες από τις συνιστώσες που αποτελούν σφάλματα εξαλειφθούν, τόσο βελτιώνεται η ακρίβεια της μέτρησης.



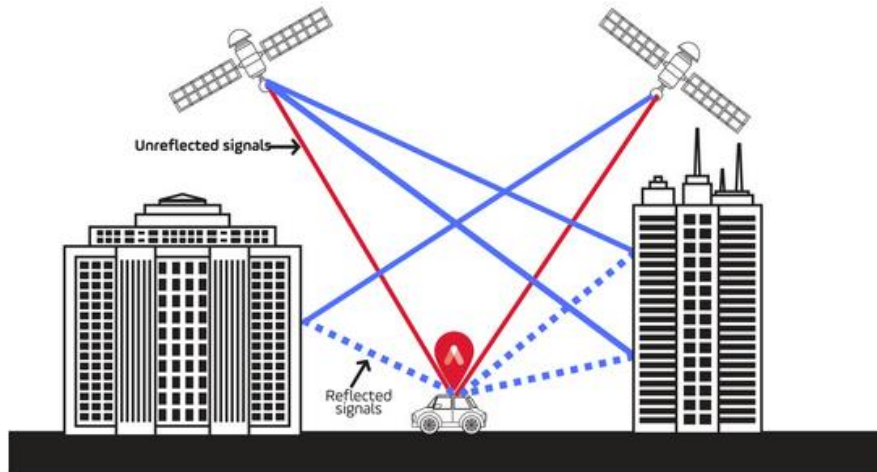


Σχήμα 3.25 Η φαινόμενη απόσταση ενός δέκτη από ένα δορυφόρο GNSS αυξάνεται κατά διάφορες ποσότητες που καλούνται σφάλματα (Clynech, 2000).

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια μιας μέτρησης. Αυτοί που σχετίζονται με το δέκτη GNSS στο έδαφος (station-dependent) και αυτοί που σχετίζονται με τους δορυφόρους του σχηματισμού (distance-dependent). Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία, περιλαμβάνονται σφάλματα όπως η “πολλαπλή διαδρομή σήματος” (signal multipath), ο θερμικός θόρυβος του δέκτη (thermal noise) και η μετατόπιση του κέντρου φάσης της κεραίας (Antenna Phase Center Variation, PCV). Αντίστοιχα, στη δεύτερη κατηγορία σφαλμάτων ανήκουν η διάθλαση του σήματος στις διαφορετικές ατμοσφαιρικές στρώσεις και οι αβεβαιότητες στην ακριβή τροχιά κίνησης των δορυφόρων (Rietdorf et al., 2006, March). Παρακάτω επεξηγούνται συνοπτικά το κάθε ένα από αυτά τα σφάλματα.

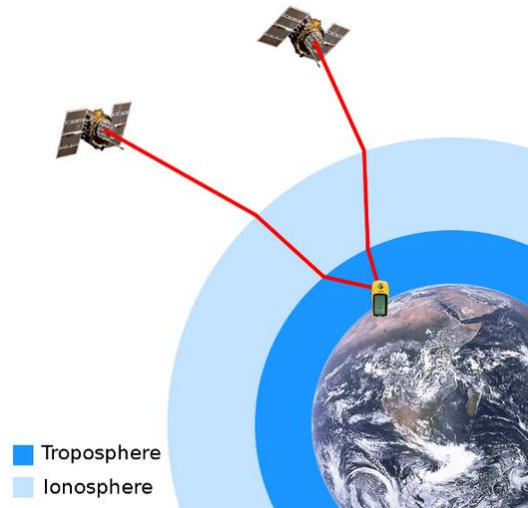
Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα στο επιστημονικό πεδίο των σημάτων και των τηλεπικοινωνιών είναι η πολλαπλή διαδρομή σήματος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται, όταν η συσκευή που λειτουργεί ως δέκτης βρίσκεται σε μια περιοχή που περιτριγυρίζεται από ψηλά κτίρια, κατασκευές ή γενικότερα κατακόρυφες επιφάνειες. Ουσιαστικά, όπως απεικονίζεται σκαριφηματικά στο Σχήμα 3.26, το σήμα ανακλάται στις διάφορες επιφάνειες και φτάνει στο δέκτη παραπάνω από μια φορές, μέσω διαφορετικών διαδρομών. Επομένως, η συσκευή διαβάζει πολλές φορές το ίδιο σήμα και της προκαλείται σύγχυση, κάτι που μεταφράζεται σε χειρότερη ακρίβεια. Σε μεγάλα αστικά κέντρα το πρόβλημα είναι αρκετά έντονο και μάλιστα οι δυσμενείς αυτές συνθήκες αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως “αστικά φαράγγια” (urban canyons). Οι σύγχρονες συσκευές αντιπαρέρχονται αυτό το πρόβλημα με διάφορους αλγορίθμους. Για παράδειγμα, μπορούν να μη λαμβάνονται υπόψη σήματα από δορυφόρους που βρίσκονται πιο χαμηλά από μια συγκεκριμένη ανύψωση στον ουρανό (elevation mask), αφού όσο λιγότερο κατακόρυφο το αρχικό σήμα, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να υποστεί ανάκλαση σε κάποια επιφάνεια. Βέβαια, αυτό έχει το μειονέκτημα, πως κινδυνεύει να μη ληφθούν υπόψη σήματα, που δύνανται να φτάσουν στο δέκτη μόνο μέσω ανάκλασης και όχι από μετάδοση σε ευθεία γραμμή. Μια καλύτερη λύση είναι να αγνοούνται όλα τα διαδοχικά μηνύματα που έχουν ακριβώς το ίδιο περιεχόμενο, εκτός από το πρώτο που φτάνει στο

δέκτη. Δεδομένου πως ο πιο σύντομος δρόμος μεταξύ δύο σημείων είναι η ευθεία, μόνο το χρονικά πρώτο σήμα δεν θα έχει υποστεί ανάκλαση. Σε κάθε περίπτωση, η πολλαπλή διαδρομή συνιστά έναν καθοριστικό παράγοντα στην ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης και σίγουρα η ποιότητα της εκάστοτε συσκευής GNSS παίζει ρόλο στο μετριασμό του φαινομένου. Παρόλα αυτά, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα, τα αστικά φαράγγια πρέπει να αποφεύγονται.



*Σχήμα 3.26 Σε αστικά κέντρα με υψηλά κτίρια το ίδιο σήμα φτάνει στο δέκτη από πολλές διαφορετικές διαδρομές (ARGUS TRACKING, 2020).*

Το κάθε σήμα εκπέμπεται από τους δορυφόρους με την ταχύτητα που διαδίδεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο κενό, δηλαδή με την ταχύτητα του φωτός. Καθώς, όμως, εισέρχεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, η ταχύτητά του μειώνεται εξ αιτίας των διάφορων τριβών που αναπτύσσονται με τα μικροσωματίδια. Όλο αυτό προκαλεί τη διάθλαση του σήματος, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.27*. Έως ότου φτάσει στην επιφάνεια της Γης και το δέκτη, το σήμα υπόκειται σε διάθλαση αρκετές φορές και συγκεκριμένα κάθε φορά που εισέρχεται σε κάποιο ατμοσφαιρικό στρώμα με μετρήσιμα μεγαλύτερη πυκνότητα από το προηγούμενο. Ενώ, όμως, τα σφάλματα που οφείλονται στην ιονόσφαιρα παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διακύμανση μέσα στην ημέρα και ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, δεν ισχύει το ίδιο με τα σφάλματα που οφείλονται στην τροπόσφαιρα, τα οποία είναι πολύ λιγότερο μεταβλητά (Wanninger, 2008). Συνεπώς, είναι καλή πρακτική η επίδραση της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας πάνω στην ακρίβεια του GNSS να λογίζεται ανεξάρτητα. Τα σφάλματα που οφείλονται στην ιονόσφαιρα εξαλείφονται με τη χρήση κάποιου δέκτη με δυνατότητα συντονισμού σε δύο κανάλια μετάδοσης ταυτόχρονα (dual frequency receiver). Για παράδειγμα, πέραν της κλασσικής συχνότητας  $L_1$ , οι τελευταίας γενιάς δορυφόροι του GPS εκπέμπουν σήματα και στη συχνότητα  $L_2$ , ακριβώς για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με την ιονόσφαιρα. Από την άλλη, τα σφάλματα που οφείλονται στην τροπόσφαιρα μοντελοποιούνται σχετικά εύκολα ως συνάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, δηλαδή του υψομέτρου του δέκτη και επομένως μπορούν και αυτά με τη σειρά τους να εξαλειφθούν (Clynch, 2000).



*Σχήμα 3.27 Ένα δορυφορικό σήμα διαθλάται κάθε φορά που εισέρχεται στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας (Wikimedia Commons).*

Οι δορυφόροι που αποτελούν ένα σχηματισμό GNSS κινούνται σε αυστηρά προκαθορισμένες και ελεγχόμενες τροχιές. Εντούτοις, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων (τριβές με μικροσωματίδια στα ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας, κλπ.) η πραγματική πορεία που τελικά ακολουθεί ο δορυφόρος διαφέρει από την προσδοκώμενη, έστω και ελάχιστα, κάτι που ο εσωτερικός υπολογιστής του, όμως, δεν μπορεί να αντιληφθεί. Αυτό συμβαίνει, επειδή παρακολουθεί την πορεία του δορυφόρου σε πραγματικό χρόνο, αλλά απλώς διατηρεί στη μνήμη του τις συντεταγμένες στις οποίες αυτός αναμένεται να βρίσκεται στο μέλλον. Επομένως, η πληροφορία της θέσης που συμπεριλαμβάνεται στο μήνυμα που λαμβάνει ο δέκτης στην επιφάνεια της Γης είναι απλώς μια πρόβλεψη της θέσης του δορυφόρου και όχι η πραγματική του θέση. Αυτό σημαίνει, πως όταν πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων από το δέκτη, η πηγή του σήματος είναι μετατοπισμένη κατά άγνωστη ποσότητα, κάτι που συνεπάγεται αναπόφευκτα την αύξηση του σφάλματος. Για να μην επιτραπεί στις αποκλίσεις να συσσωρευτούν σε μεγάλες χρονικές περιόδους, οι υπηρεσίες που διαχειρίζονται τους σχηματισμούς των δορυφόρων ανανεώνουν τις προβλεπόμενες τροχιές σε ημερήσια βάση (Clyne, 2000). Ακόμα και αυτό, όμως, δεν είναι αρκετό για κάποιες εφαρμογές. Έτσι, οι πραγματικές τροχιές που ακολουθούν οι δορυφόροι (ephemeris) δημοσιεύονται από την αρμόδια υπηρεσία κάποιες ημέρες αργότερα και διατίθενται σε κάθε ενδιαφερόμενο. Με κατάλληλα λογισμικά, τα δεδομένα αυτά ενσωματώνονται στα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο και έτσι εξαλείφεται πλήρως το σφάλμα που οφείλεται στις τροχιακές αποκλίσεις.

Παρόμοια είναι και η διαδικασία που ακολουθείται για τη διόρθωση των αποκλίσεων που σχετίζονται με το χρόνο. Παρότι ένας σχηματισμός δορυφόρων GNSS συντονίζεται σε μια κοινή ώρα με τη βοήθεια ενός ατομικού ρολογιού στην επιφάνεια της Γης, το εσωτερικό ρολόι του καθενός φθίνει με την πάροδο της ημέρας και εμφανίζει απόκλιση. Μαζί με την ανανέωση της τροχιάς που στέλνεται στους δορυφόρους από κάποιον επίγειο σταθμό ανανεώνονται και τα εσωτερικά ρολόγια τους. Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όμως, χρησιμοποιούνται οι λεπτομερείς διορθώσεις ως προς το χρόνο, οι οποίες αντίστοιχα δημοσιεύονται μερικές ημέρες μετά από την ημερομηνία που πραγματοποιήθηκε η εκάστοτε μέτρηση. Αυτές ενσωματώνονται ύστερα

στα δεδομένα με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών και εξαλείφεται το σφάλμα του εσωτερικού ρολογιού της πηγής.

Η συσκευή που δέχεται το δορυφορικό σήμα και εκτελεί την επίλυση για τον προσδιορισμό της θέσης είναι πάνω από όλα μια ηλεκτρονική συσκευή. Ως τέτοια, από τη λειτουργία της και μόνο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα, οπότε αναπόφευκτα ένα μέρος της βρίσκεται στη συχνότητα εκπομπής των σημάτων των GNSS. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται “θερμικός θόρυβος” (thermal noise) και εισάγει ένα ακόμη σφάλμα στη διαδικασία προσδιορισμού της θέσης, το μέγεθος του οποίου διαφέρει ανάλογα με τη συσκευή. Οι πλέον σύγχρονες συσκευές GNSS διαθέτουν την τεχνολογία “στενής συσχέτισης” (narrow correlator technology), με τη χρήση της οποίας υποπολλαπλασιάζεται αισθητά ο παραγόμενος θερμικός θόρυβος. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται και το αντίστοιχο σφάλμα σε λιγότερο από 10cm (Clyne, 2000).

Τέλος, μια ακόμη μεγάλη αβεβαιότητα είναι η απόκλιση που εμφανίζει το εσωτερικό ρολόι της εκάστοτε συσκευής του δέκτη GNSS. Στο Σχήμα 3.25 απεικονίζεται ως “Receiver Clock”, αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό της μέτρησης και διαφέρει από δέκτη σε δέκτη. Επομένως, είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ακριβής τιμή του σφάλματος. Η μέθοδος που ακολουθείται, ώστε να εξαλειφθεί πλήρως, είναι να εισαχθεί το μέγεθος αυτό ως άγνωστη μεταβλητή στις εξισώσεις του προβλήματος προσδιορισμού της θέσης. Η αύξηση των αγνώστων, όμως, επιβάλλει και την αύξηση των διαθέσιμων εξισώσεων, ειδάλλως το σύστημα θα ήταν αόριστο. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται το σήμα από έναν επιπρόσθετο δορυφόρο. Δεδομένου πως ήδη υπάρχουν οι τρεις άγνωστες χωρικές συντεταγμένες που πρέπει να προσδιοριστούν, η θεώρηση του εσωτερικού σφάλματος στο ρολόι του δέκτη ως επιπλέον προσδιοριστέου αγνώστου οδηγεί στην απαίτηση για οπτική επαφή με τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Στην περίπτωση που σε μια εφαρμογή δεν ενδιαφέρει να υπολογιστεί το υψόμετρο, μια λύση δύναται να προσδιοριστεί και με οπτική επαφή με μόνο τρεις δορυφόρους.

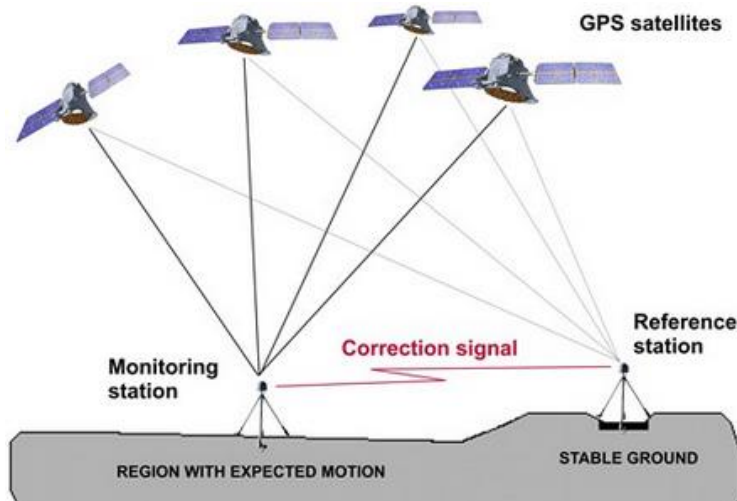
### 3.4.3 Differential GNSS

Όταν κατέστη σαφές πως το GPS θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα παλαιότερα συστήματα πλοήγησης, βελτιώνοντας παράλληλα το παραγόμενο αποτέλεσμα, υπηρεσίες όπως η πολιτική αεροπορία (FAA) και η ακτοφυλακή των ΗΠΑ (US Coast Guard) αιτήθηκαν την άρση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας. Αυτό, όμως, δε συνέβη και έτσι αναγκάστηκαν να καταφύγουν σε άλλες λύσεις για να παρακάμψουν τον περιορισμό της μειωμένης ακρίβειας στο χωρικό προσδιορισμό θέσης.

Κάποια στιγμή έγινε η παρατήρηση, πως το σφάλμα που εισαγόταν τυχαία στο τελικό αποτέλεσμα ήταν το ίδιο για μια περιοχή δεδομένης έκτασης. Συνεπώς, αν προσδιοριζόταν με κάποιο τρόπο αυτή η τιμή της οριζόντιας μετατόπισης και ύστερα αφαιρούσαν από το τελικό αποτέλεσμα, θα προέκυπταν οι πραγματικές συντεταγμένες της ζητούμενης τοποθεσίας. Με άλλα λόγια, η επιλεκτική διαθεσιμότητα θα εξακολουθούσε να υπάρχει, αλλά θα είχε παρακαμφθεί πλήρως. Η ιδέα ήταν αρκετά απλή και εφαρμόσιμη, αφού για τον υπολογισμό της επιτηδευμένης οριζόντιας απόκλισης αρκούσε ένας σταθμός αναφοράς με εκ των προτέρων γνωστή την ακριβή του τοποθεσία και ένας

τρόπος κοινοποίησης της υπολογιζόμενης μετατόπισης σε όλους τους ενδιαφερόμενους. Η τεχνική αυτή ονομάστηκε διαφορικό GPS (DGPS) και πλέον είναι διαθέσιμη και σε άλλα συστήματα δορυφορικής πλοήγησης, με την ονομασία DGNSS.

Η αρχή στην οποία βασίζεται το DGNSS είναι η ίδια και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.28. Αρχικά, η συσκευή την οποία χειρίζεται ο χρήστης λαμβάνει και διαβάζει το περιεχόμενο των δορυφορικών σημάτων και επιλύοντας τις εξισώσεις προσδιορίζει τη θέση στην οποία βρίσκεται. Η επίλυση αυτή, όμως, εμπεριέχει ένα σφάλμα μέτρησης, το οποίο εξαρτάται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Παράλληλα, λοιπόν, με τη λήψη δεδομένων στην τοποθεσία ενδιαφέροντος, χρησιμοποιείται ένας επιπρόσθετος σταθερός δέκτης GNSS σε κάποια άλλη τοποθεσία για λήψη δεδομένων, της οποίας η ακριβής θέση είναι εκ των προτέρων γνωστή. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο τριγωνομετρικό σημείο του γεωδαιτικού δικτύου μιας χώρας ή κάποιος σταθμός δορυφόρων. Ο δέκτης στο γνωστό σημείο ονομάζεται σταθμός αναφοράς.



Σχήμα 3.28 Η αρχή λειτουργίας του DGPS (CGS Europe).

Μέσω των δεδομένων που λαμβάνει ο σταθμός αναφοράς από τους δορυφόρους προσδιορίζεται η θέση του και αντιπαραβάλλεται με την ήδη γνωστή θέση. Η διαφορά μεταξύ των δύο αποτελεί το σφάλμα προσδιορισμού. Κατόπιν, οι διορθώσεις που απαιτείται να γίνουν για να μηδενιστεί αυτό το σφάλμα μεταδίδονται στο δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στο σημείο που πραγματοποιείται η μέτρηση, μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο, εφόσον ο διάυλος επικοινωνίας παραμείνει ανοικτός και μέσω αυτής μειώνεται αισθητά το σφάλμα μέτρησης στην τοποθεσία ενδιαφέροντος.

Από τη στιγμή που σήμερα η επιλεκτική διαθεσιμότητα έχει πάψει να υφίσταται, το DGNSS χρησιμεύει στο να εξαλειφθούν από τη διαδικασία της μέτρησης άλλου είδους, εξίσου σημαντικά σφάλματα. Συγκεκριμένα, η τεχνική αυτή είναι πλήρως αποτελεσματική στη διόρθωση της τροχιακής απόκλισης και του σφάλματος των χρονομέτρων των δορυφόρων. Αυτό είναι δυνατό, αφού τα σφάλματα αυτά είναι χαρακτηριστικά του εκάστοτε δορυφόρου και ισχύουν εξίσου για όλους τους δέκτες στην επιφάνεια της Γης. Επιπλέον, το DGNSS δύναται να εξαλείφει κατά ένα μέρος τις αποκλίσεις που οφείλο-

νται στην ιονόσφαιρα και την τροπόσφαιρα. Αυτό επιτυγχάνεται, όταν ο δέκτης βρίσκεται σχετικά κοντά στο σταθμό αναφοράς, αφού τότε οι συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα είναι οι ίδιες και τα δύο σήματα επηρεάζονται εξίσου. Γενικά, όμως, το ποσοστό του σφάλματος λόγω ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας που εξαλείφεται με το DGNSS είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ του δέκτη και του σταθμού αναφοράς και μάλιστα οι δύο αυτές μεταβλητές συνδέονται με μια σχέση αναλογίας.

Από την άλλη μεριά, η τεχνική αυτή δεν έχει κανένα αποτέλεσμα στον μετριάσμο των σφαλμάτων που σχετίζονται με τον δέκτη DGNSS στο έδαφος (station-dependent). Κάτι τέτοιο είναι λογικό, καθώς αυτά αφορούν αποκλειστικά στην εκάστοτε τοποθεσία που βρίσκεται ο δέκτης και δεν παρατηρούνται στην τοποθεσία του σταθμού αναφοράς. Επομένως, η εξάλειψη των σφαλμάτων που προκαλούν ο θερμικός θόρυβος και η πολλαπλή διαδρομή του σήματος επαφίεται αποκλειστικά στο χειριστή της συσκευής, αλλά και στην τεχνολογία που αυτή ενσωματώνει.

Σε κάθε περίπτωση, η τεχνική του DGNSS αποτελεί μια σαφώς ανώτερη πρακτική από το απλό GNSS και με τη χρήση σύγχρονων συσκευών, που φέρουν τη δυνατότητα αυτή, επιτυγχάνεται συνολικό σφάλμα προσδιορισμού θέσης της τάξης των 10cm (Clynch, 2001).

#### 3.4.4 Real Time Kinematics

Οι τεχνικές του απλού GNSS και του DGNSS αφορούν στην εκμετάλλευση της πληροφορίας που μεταφέρεται από τα δορυφορικά σήματα, ώστε να προσδιοριστεί η τοποθεσία του δέκτη. Υπάρχει, όμως, ένας ακόμη τρόπος να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία από τα δορυφορικά σήματα και αυτός είναι μετρώντας, εκτός από το ίδιο το περιεχόμενο, τη φάση του φέροντος κύματος, με το οποίο μεταφέρεται το δορυφορικό σήμα. Γνωρίζοντας τη φάση με την οποία προσπίπτει το κάθε κύμα στη συσκευή του δέκτη, το μήκος κύματος του σήματος και χρησιμοποιώντας διορθώσεις που στέλνονται σε πραγματικό χρόνο από ένα σταθμό αναφοράς, ο δέκτης μπορεί να υπολογίσει την απόσταση που απέχει από τον εκάστοτε δορυφόρο. Το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό του ακέραιου αριθμού κύκλων (περιόδων) του κύματος, που μεσολαβούν από το δορυφόρο έως και το δέκτη. Το πρόβλημα αυτό καλείται πρόβλημα ασάφειας φάσης (integer ambiguity search problem). Η επίλυσή του είναι αρκετά περίπλοκη, απαιτεί τη χρήση προχωρημένων στατιστικών μεθόδων και περιλαμβάνει τη σύγκριση των μετρούμενων φάσεων από περισσότερα του ενός σήματα, αλλά και τη σύγκριση των αποστάσεων από πολλαπλούς δορυφόρους. Η τεχνική αυτή προσδιορισμού της θέσης ονομάζεται Real Time Kinematics (RTK).

Ουσιαστικά, βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με το DGNSS, με τη διαφορά ότι στην τεχνική RTK, ο δέκτης αγνοεί εντελώς το περιεχόμενο του δορυφορικού σήματος. Αντίθετα, μετράει μόνο τη φάση του κύματος που μεταφέρει το μήνυμα (carrier wave). Παρομοίως, ο σταθμός αναφοράς παρατηρεί αποκλειστικά τη φάση των κυμάτων που προσπίπτουν σε αυτόν και τη μεταδίδει σε πραγματικό χρόνο στο δέκτη, υπό μορφή διορθώσεων. Για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση των διορθώσεων δημιουργείται ένας διάλογος επικοινωνίας, που στηρίζεται συνήθως στα ραδιοκύματα ή το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Αφού υπολογιστούν οι αποστάσεις από τους δορυφόρους, η συσκευή του

GNSS προσδιορίζει τις χωρικές συντεταγμένες της, κατά τα γνωστά, ως το σημείο τομής τεσσάρων τουλάχιστον σφαιρών.

Γενικά, η μέθοδος προσδιορισμού της απόστασης από τους δορυφόρους, που βασίζεται στη μέτρηση της φάσης, εισάγει πολύ μικρή απόκλιση στο τελικό αποτέλεσμα, συγκριτικά με την κλασσική επίλυση που βασίζεται στο περιεχόμενο του δορυφορικού σήματος. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της τεχνικής RTK, έναντι των υπολοίπων, είναι ότι επηρεάζεται λιγότερο από το φαινόμενο της πολλαπλής διαδρομής του σήματος. Επιπλέον, και σε αυτήν την τεχνική υπάρχει η δυνατότητα να γίνει επεξεργασία και διορθωθούν οι τροχιές των δορυφόρων σε δεύτερο χρόνο και άρα να εξαλειφθεί το σχετικό σφάλμα από τα δεδομένα. Έτσι, η συνολική ακρίβεια στίγματος που επιτυγχάνεται είναι μικρότερη και από αυτή του DGNSS και κυμαίνεται στην τάξη μεγέθους των 4cm (Clynch, 2001), ενώ μπορεί να είναι ακόμα καλύτερη, έως και 1cm για συστήματα υψηλής ακρίβειας (AG-NAV).

Παρόλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει, όμως, το RTK GNSS έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία δεν πρέπει να αγνοούνται. Ειδικότερα, η απόσταση μεταξύ του δέκτη και του σταθμού αναφοράς δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10-20km, ώστε να μπορούν να επιλυθούν γρήγορα και αξιόπιστα οι ασάφειες φάσης (Matias et al., 2015, May; Wanninger, 2008; Henning, 2014). Επιπλέον, ο σταθμός αναφοράς στέλνει περισσότερα μηνύματα με διορθώσεις σε σχέση με τα μηνύματα που στέλνει κατά την τεχνική DGNSS και άρα ο διάυλος επικοινωνίας με το δέκτη απαιτεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Τέλος, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης, καθώς απαιτείται ένα χρονικό διάστημα μέχρι να θεωρηθεί πως έχει ξεκινήσει με επιτυχία η επίλυση του προβλήματος των ασαφειών φάσης. Επιπλέον, κάθε φορά που χάνεται η οπτική επαφή του δέκτη με τους δορυφόρους (π.χ. κίνηση μέσα σε τούνελ), ακόμα και για απειροελάχιστα δευτερόλεπτα, η επίλυση των ασαφειών φάσης παύει να πραγματοποιείται ή έστω πραγματοποιείται αλλά με χειρότερο αποτέλεσμα. Έτσι, καλό είναι να μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα λίγων λεπτών προτού συνεχιστεί η καταγραφή δεδομένων από το δέκτη, ειδάλλως ο προσδιορισμός της θέσης θα γίνεται πρακτικά χωρίς να λειτουργεί καθόλου η τεχνική RTK, παρά μόνο με τον απλό εντοπισμό (standalone GNSS). Σε αυτό το ολιγόλεπτο χρονικό διάστημα, ξεκινάει πάλι από την αρχή η επίλυση των ασαφειών φάσης και η ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης είναι και πάλι η βέλτιστη. (Henning, 2014).

Συμπερασματικά, το Real Time Kinematics GNSS αποτελεί την κορωνίδα των τεχνικών προσδιορισμού θέσης υψηλής ακρίβειας και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εφαρμογές ανώτερης γεωδαισίας και στην πλοήγηση αυτόνομων οχημάτων και UAVs (Unmanned Aerial Vehicles).

---

## 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

---

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή της μεθοδολογίας. Αρχικά, η ενότητα 4.1 αναφέρεται στο οδικό πείραμα προσπεράσεων που διενεργήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων. Καταγράφονται και τεκμηριώνονται η επιλογή της τοποθεσίας, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, το πρωτόκολλο που εφαρμόστηκε για την όλη διαδικασία, ορισμένες πληροφορίες για τη διεξαγωγή του πειράματος και το δείγμα που προέκυψε από τις μετρήσεις. Στη συνέχεια, στην ενότητα 4.2 παρουσιάζεται η επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα του πειράματος, ώστε να έρθουν σε μια μορφή κατάλληλη για την τελική στατιστική ανάλυση. Η επεξεργασία αυτή αφορά με τη σειρά στη βελτίωση της ακρίβειας του προσδιορισμού θέσης, στη δημιουργία εκ του μηδενός μιας βάσης δεδομένων με τροχιές προσπέρασης και τελικά στην εξαγωγή των απαιτούμενων γεωμετρικών παραμέτρων από τις τροχιές αυτές. Τέλος, στην ενότητα 4.3 παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Αυτή διακρίνεται στην πλήρη στατιστική περιγραφή των αποτελεσμάτων και στην κατασκευή κατάλληλων μοντέλων πρόβλεψης για τις κυριότερες από τις παραμέτρους.

### 4.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας απαιτήσε την ύπαρξη μιας βάσης δεδομένων από τροχιές προσπέρασης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια εκτεταμένη αναζήτηση για κατάλληλα πακέτα δεδομένων προσπεράσεων, τα οποία να διανέμονται ελεύθερα, αλλά η έρευνα δεν απέδωσε ιδιαίτερους καρπούς. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την ανάγκη για δείγμα με πολύ συγκεκριμένη οδηγική συμπεριφορά, οδήγησε στην απόφαση να δημιουργηθεί εκ του μηδενός μια νέα βάση δεδομένων με τροχιές προσπεράσεων.

Προκειμένου να μην υπάρχει καμία πιθανότητα να καταστρατηγηθεί η αμεροληψία του συλλεγόμενου δείγματος, η ιδανική λύση θα ήταν να καταγραφούν οι τροχιές τυχαίων οχημάτων που εκτελούν προσπέραση σε ένα συγκεκριμένο οδικό τμήμα, χωρίς να είναι ενήμεροι οι οδηγοί τους. Η μέθοδος καταγραφής αυτή συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία. Έχει το πλεονέκτημα, πως οι οδηγοί δεν μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους, γνωρίζοντας πως συμμετέχουν σε ένα πείραμα ή φοβούμενοι τυχόν κυρώσεις για τον τρόπο που οδηγούν. Επιπλέον, δύναται να πραγματοποιηθεί συλλογή δεδομένων σε οποιοδήποτε περιβάλλον και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, ακόμα και σε συνθήκες που είναι πολύ επικίνδυνο να προσομοιωθούν με τη διενέργηση ενός πειράματος.

Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση έχει και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, η μέθοδος καταγραφής πρέπει να είναι κάποιας μορφής βιντεοσκόπηση, από σταθερή εξέδρα στο πλάι της οδού ή από κάποια κινητή πλατφόρμα με δυνατότητα πτήσης (drone). Στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν περιορισμοί στη μέγιστη απόσταση που μπορούν να δουν οι κάμερες, με συνέπεια να χάνονται η αρχή και το τέλος από τους



ελιγμούς προσπέρασης. Θα μπορούσαν, βέβαια, να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές εξέδρες καταγραφής, αλλά με αυξανόμενο κόστος απόκτησης εξοπλισμού, περισσότερη πολυπλοκότητα στο συγχρονισμό των καμερών και μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνουν αντιληπτές από τους διερχόμενους οδηγούς και να μεταβάλλουν την οδηγική τους συμπεριφορά. Στη δεύτερη περίπτωση εγείρεται το ζήτημα του κόστους απόκτησης τόσο του μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος όσο και των καμερών που αυτό θα φέρει. Εξάλλου, οι προδιαγραφές των καμερών είναι πολύ υψηλές. Ενδεικτικά αναφέρονται τα πολλά fps και η πολύ καλή ευκρίνεια και δυνατότητα μεγέθυνσης, ώστε να αποτυπώνεται στην καταγραφή η επιθυμητή ακρίβεια στη θέση των οχημάτων, ακόμα και από μεγάλα ύψη πτήσης ή απομακρυσμένη βιντεοσκόπηση. Επιπλέον, δεν πρέπει να έχουν μεγάλο βάρος και όγκο, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να παρεμποδίζουν την ίδια την πτητική ικανότητα του drone. Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, η τροχιά του εκάστοτε οχήματος εξάγεται ύστερα από επεξεργασία των καταγραφών με κατάλληλο λογισμικό φωτογραμμετρίας. Η μέθοδος αυτή δεν προσφέρει τη βέλτιστη δυνατή ακρίβεια και είναι πιθανό να μην επαρκούσε για το σκοπό της παρούσας εργασίας.

Δεύτερον, στην παρούσα εργασία διερευνώνται μόνο οι τροχιές των οχημάτων που εκτελούν επιταχυνόμενη προσπέραση και μόνο όταν αυτά κινούνται με συγκεκριμένες ταχύτητες. Επομένως, από όλες τις προσπεράσεις που θα καταγράφονταν, όσες δε θα ήταν επιταχυνόμενες ή δε θα πραγματοποιούνταν ακριβώς με τις ταχύτητες ενδιαφέροντος θα έπρεπε να απορρίπτονται. Ακόμη, για να θεωρηθεί έγκυρη και αξιοποιήσιμη μια προσπέραση πρέπει και τα δύο οχήματα να κινούνται στο μέσον των λωρίδων τους και στο μέτρο του δυνατού να μην παρεκκλίνουν από αυτό. Γίνεται αντιληπτό, πως οι απαιτήσεις αυτές δεν ικανοποιούνται πάντα και έτσι υπάρχει το ενδεχόμενο, ο χρόνος που χρειάζεται για να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός καταγεγραμμένων έγκυρων προσπεράσεων να τείνει ασυμπτωτικά στο άπειρο. Σε αυτό παίζει ρόλο και ο τύπος της οδού, το όριο ταχύτητας και η ημερήσια κυκλοφορία οχημάτων. Για να αυξηθούν οι πιθανότητες να συμπληρωθεί το στατιστικό δείγμα με προσπεράσεις που πληρούν τα κριτήρια, θα έπρεπε η καταγραφή να πραγματοποιηθεί σε μια οδό που να διαθέτει όριο ταχύτητας ίσο με την εκάστοτε επιθυμητή ταχύτητα κίνησης. Στην περίπτωση αυτή, όμως, ίσως δεν πληρούνταν κάποιο από τα κριτήρια τοποθεσίας, τα οποία αναλύονται στην ακόλουθη ενότητα.

Τρίτον, το να παρακολουθείται ένα οδικό τμήμα αδιαλείπτως μέχρι να συμπληρωθεί το απαραίτητο δείγμα προσπεράσεων είναι ένας πολύ μη αποδοτικός τρόπος συλλογής δεδομένων. Υπάρχει ο κίνδυνος, η περάτωση ολόκληρης της έρευνας να μετατοπίζεται συνέχεια, για αόριστο χρόνο κάθε φορά, επειδή καθυστερεί να συμπληρωθεί το στατιστικό δείγμα. Επιπλέον, προκειμένου να αναπτυχθεί η κατάλληλη μεθοδολογία για την επεξεργασία των δεδομένων, απαιτήθηκαν κάποιες δοκιμαστικές καταγραφές προσπεράσεων. Αυτό ήταν ένα σημαντικό βήμα, καθώς υπήρξε εξοικείωση με τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου αντικειμένου. Όμως, η όλη αναμονή για την καταγραφή κάποιας ιδανικής προσπέρασης θα καθυστερούσε αρκετά ακόμα και την οριστικοποίηση της μεθοδολογίας που θα ακολουθούνταν. Συνεπώς, η εξάρτηση από τέτοιους εξωγενείς παράγοντες κατά τη συλλογή των δεδομένων περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα για ευελιξία από τη μεριά των ερευνητών και αυξάνει σημαντικά το χρόνο περάτωσης της έρευνας.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην τροχιά που ακολουθεί ένα όχημα καθώς προσπερνάει. Δεν ασχολείται με τις αιτίες που οδηγούν στην πραγματοποίηση μιας προσπέρασης ή την επιρροή της γύρω κυκλοφορίας στην ταχύτητα κίνησης και το χρόνο περάτωσης του ελιγμού. Συνεπώς, αρκεί να χρησιμοποιούνται δύο οχήματα κάθε φορά ως βάση για τη συλλογή δεδομένων, ένα που θα εκτελεί την προσπέραση και ένα που θα προσπερνάται. Για όλους τους παραπάνω λόγους, αποφασίστηκε η βάση δεδομένων για την παρούσα εργασία να δημιουργηθεί με τη διενέργηση ενός οδικού πειράματος. Στο πείραμα αυτό, δύο οχήματα εκτελούσαν διαδοχικές προσπεράσεις μεταξύ τους και οι τροχιές τους καταγράφονται με υψηλή ακρίβεια, με την τοποθέτηση ενός δέκτη GPS στην οροφή του καθενός από αυτά.

#### 4.1.1 Τοποθεσία

Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για την εκτέλεση του πειράματος δεν είναι μια απόφαση που λήφθηκε αβασάνιστα. Λήφθηκε κατόπιν ώριμης σκέψης και πάντα με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του κέρδους που αναμένεται να αποκομίσει η μελέτη. Το κέρδος αυτό, όμως, είναι δίκικο μαχαίρι. Από τη μια πλευρά, υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις, οι οποίες διαφέρουν από μελέτη σε μελέτη και γενικά πρέπει να ικανοποιούνται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος πρέπει να είναι αποδοτική και να εφαρμόζεται με το μικρότερο δυνατό κόστος, τόσο για τους ερευνητές όσο και για τους συμμετέχοντες. Γίνεται σαφές, λοιπόν, πως η μεγιστοποίηση του κέρδους συνήθως συνεπάγεται την αύξηση του τιμήματος. Επομένως, κατά την τελική επιλογή της τοποθεσίας έπρεπε να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι.

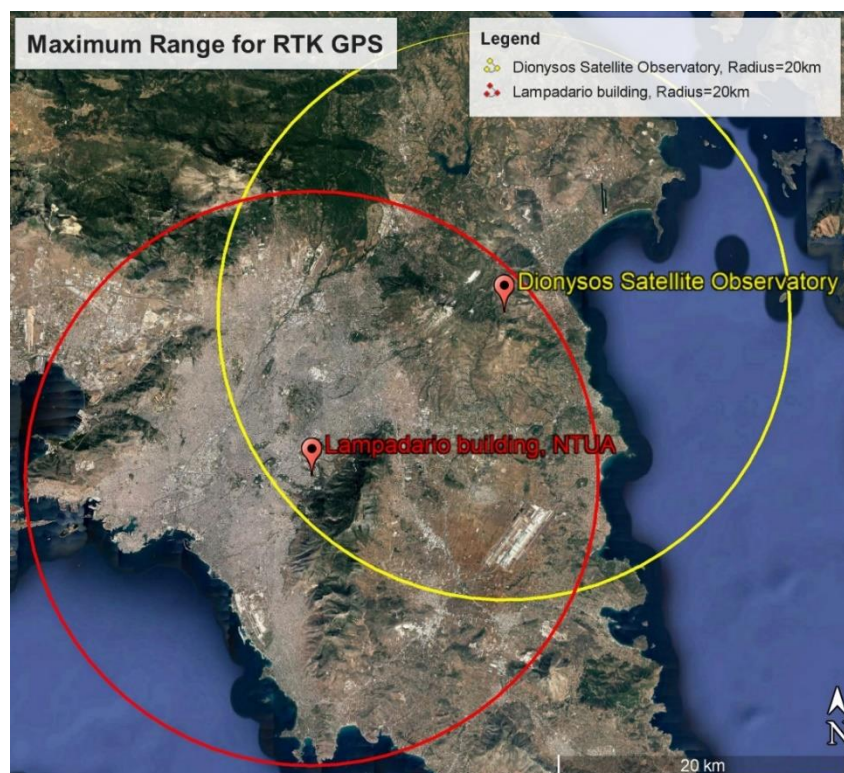
##### 4.1.1.1 Κριτήρια επιλογής

Οι απαιτήσεις της παρούσας εργασίας αφορούν στον τρόπο διεξαγωγής και καταγραφής των προσπεράσεων, αλλά και στην ασφάλεια των οδηγών που συμμετέχουν. Δεδομένου πως η παρούσα έρευνα πραγματοποιείται τη μελέτη της προσπέρασης στην ευθυγραμμία, οι προσπεράσεις στο πείραμα επιβάλλεται να πραγματοποιηθούν μόνο σε απολύτως ευθύγραμμα τμήματα της οδού. Με τη βοήθεια ορισμένων δοκιμαστικών καταγραφών, προσδιορίστηκε η μέση απόσταση ολοκλήρωσης μιας προσπέρασης. Αν συνυπολογιστεί μια επιπλέον απόσταση ως συντελεστής ασφαλείας, ένα ενδεικτικό άνω φράγμα στην απόσταση που απαιτεί η εκτέλεση μιας προσπέρασης είναι τα 600m. Με βάση αυτήν την απόσταση, η τοποθεσία διεξαγωγής του πειράματος πρέπει να διαθέτει ευθυγραμμίες με μήκος μεγαλύτερο από 600m.

Μία ακόμα σημαντική απαίτηση, η σημαντικότερη ίσως, είναι αυτή της ασφάλειας. Η τοποθεσία στην οποία θα διεξαχθεί το πείραμα πρέπει να υποστηρίζει την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων και να διαθέτει οδόστρωμα με καλά συντηρημένη και αντιολισθητική επιφάνεια κύλισης. Ταυτόχρονα, είναι επιβεβλημένη η ύπαρξη ελεγχόμενης εισόδου, ώστε να μην υπάρχει ο κίνδυνος εμπλοκών μεταξύ οχημάτων σε σημεία στα οποία δεν προβλέπεται και δεν υπάρχει η κατάλληλη σήμανση. Πίστες αεροδρομίων, οι οποίες πληρούν τα παραπάνω κριτήρια, δυστυχώς δεν αποτελούν ρεαλιστική επιλογή,

καθώς στο οδόστρωμα των διαδρόμων και των τροχοδρόμων δεν υπάρχουν σχεδιασμένες λωρίδες κυκλοφορίας για οχήματα, αλλά λωρίδες που απευθύνονται σε αεροσκάφη. Για τον ίδιο λόγο απορρίφθηκαν και πίστες ταχύτητας. Επομένως, το πείραμα πρέπει αναγκαστικά να διεξαχθεί σε κανονική οδό. Παρότι, όμως, η παρούσα έρευνα κάνει λόγο για προσπέραση σε οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας, στο πείραμα δε γίνεται να ζητείται από τους οδηγούς να εισέρχονται στο αντίθετο ρεύμα, καθώς κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ ριψοκίνδυνο και μπορεί να προκαλούνταν ατύχημα. Άρα, η οδός πρέπει να διαθέτει τουλάχιστον τέσσερις λωρίδες κυκλοφορίας, με ή χωρίς κεντρικό στηθαίο ασφαλείας. Μια καλή επιλογή είναι το πείραμα να πραγματοποιηθεί σε κλειστό αυτοκινητόδρομο, καθώς έτσι ικανοποιούνται τα παραπάνω κριτήρια σχετικά με την ασφάλεια.

Μεγάλο ρόλο στην απόφαση για την τοποθεσία του πειράματος παίζουν και οι απαιτήσεις που έχουν τα όργανα καταγραφής. Ως μέθοδος προσδιορισμού της θέσης των οχημάτων έχει επιλεγεί ένας συνδυασμός οργάνων GNSS και της τεχνικής Real Time Kinematics. Συνεπώς, διακρίνονται δύο σημαντικά στοιχεία που πρέπει να διαθέτει η οδός που θα επιλεγεί. Αρχικά, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική RTK, οι δέκτες GNSS δεν πρέπει σε καμία χρονική στιγμή να απέχουν από το σταθμό αναφοράς απόσταση μεγαλύτερη από 20km. Παρότι υπάρχουν αρκετοί σταθμοί αναφοράς στην ελληνική επικράτεια, υπήρχε πρόσβαση σε δύο συγκεκριμένους. Ο ένας βρίσκεται στην οροφή του Λαμπαδάριου κτιρίου, της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ο άλλος στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου (ΚΔΔ), στην Πεντέλη. Επομένως, το ζητούμενο οδικό τμήμα πρέπει να βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός ακτίνας 20km από μια εκ των δύο αυτών τοποθεσιών. Οι περιοχές που οριοθετούνται από τους δύο αυτούς κύκλους απεικονίζονται στην *Εικόνα 4.1*, στο λογισμικό Google Earth Pro.



*Εικόνα 4.1* Η περιοχή της Αττικής στην οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί η τεχνική RTK GNSS.

Στη συνέχεια, το ίδιο το οδικό τμήμα πρέπει να ευνοεί τον εντοπισμό υψηλής ακρίβειας. Αυτό σημαίνει, πως καλό θα ήταν να αποφεύγονται τοποθεσίες που περιβάλλονται από υψηλά κτίρια και γενικότερα κατακόρυφες επιφάνειες, ώστε να μην εμφανιστεί το φαινόμενο της πολλαπλής διαδρομής σήματος (signal multipath). Το ιδανικό είναι η οδός να διέρχεται από σχετικά επίπεδες περιοχές, εκτός κατοικημένων ζωνών και χωρίς να υπάρχουν φυτεμένα υψηλά δέντρα πλησίον των οριογραμμών του οδοστρώματος. Όσο περισσότερο ικανοποιούνται αυτές οι απαιτήσεις, τόσο λιγότερο αυξάνεται το σφάλμα προσδιορισμού θέσης. Παράλληλα, είναι υψίστης σημασίας να μην υπάρχουν εμπόδια πάνω από τις ευθυγραμμίες που αναμένεται να πραγματοποιηθούν οι προσπεράσεις. Κάθε φορά που το όχημα διέρχεται μέσα από μια σήραγγα ή κάτω από μια γέφυρα χάνεται η οπτική επαφή με τους δορυφόρους και άρα και το σήμα του GNSS. Αυτό συμβαίνει, έως ότου το όχημα εξέλθει από τη σήραγγα ή φύγει από τη “σκιά” της γέφυρας και έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατόν να προσδιοριστεί σωστά η θέση του σε εκείνες τις χιλιομετρικές θέσεις της οδού. Με άλλα λόγια, η τροχιά του οχήματος όπως τη δίνει το GNSS δεν θα είναι συνεχής, αλλά θα εμφανίζει ακραία μεγάλες διακυμάνσεις και διασκορπισμένα σημεία. Είναι σαφές, λοιπόν, πως μια τέτοια προσπέραση δεν θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη στη μετέπειτα ανάλυση. Ένας δεύτερος λόγος που πρέπει να αναζητηθεί οδικό τμήμα χωρίς γέφυρες ή άνω διαβάσεις είναι, πως στην τεχνική RTK δεν πρέπει να χάνεται η επικοινωνία μεταξύ του δέκτη στο όχημα και των δορυφόρων. Αν συμβεί αυτό για περισσότερο από ελάχιστες χρονικές στιγμές, το όχημα θα πρέπει να ακινητοποιηθεί και να περιμένει ένα χρονικό διάστημα, ώστε να μπορέσει να ξεκινήσει ξανά η επίλυση του προβλήματος των ασαφειών φάσης.

Υπάρχουν και ορισμένες δευτερεύουσες απαιτήσεις, οι οποίες δεν έχουν τη σπουδαιότητα των υπολοίπων, αλλά πρέπει να λογαριάζονται κατά το σχεδιασμό ενός οδικού πειράματος. Συγκεκριμένα, έχουν να κάνουν με την εκτέλεση του πειράματος και το πόσο πολύ μπορεί να αυξηθεί η αποδοτικότητα της όλης διαδικασίας. Δεδομένου πως τις προσπεράσεις θα εκτελούν εθελοντές οδηγοί, οι οποίοι θα εναλλάσσονται συνεχώς μεταξύ τους, η διαδρομή που θα ακολουθείται πρέπει να ξεκινάει και να καταλήγει στο ίδιο σημείο. Πρέπει να έχει, δηλαδή, τη μορφή μιας πίστας, στην οποία ο κάθε οδηγός θα πραγματοποιεί έναν αριθμό γύρων και ύστερα θα τερματίζει. Όσο μεγαλύτερο μήκος αυτής της πίστας είναι κατάλληλο για να εκτελεστούν προσπεράσεις, τόσο πιο οικονομική και αποδοτική κρίνεται η εν λόγω διαδρομή. Μάλιστα, το σημείο εκκίνησης και τερματισμού δεν πρέπει να δημιουργεί εμπλοκές με την κανονική κυκλοφορία της οδού, αλλά ούτε και κίνδυνο ατυχήματος για τους συμμετέχοντες στο πείραμα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, ιδιαίτερα στην περίπτωση του κλειστού αυτοκινητόδρομου. Εξάλλου, στο σημείο εκκίνησης πρέπει να τοποθετούνται και τα όργανα GNSS στα οχήματα, αλλά και να γίνεται η ενημέρωση των οδηγών για το πρωτόκολλο διεξαγωγής του πειράματος. Επομένως, το οδικό τμήμα που αναζητείται πρέπει να διαθέτει χώρο στάθμευσης. Επιπλέον, πρέπει να δύναται να αποτελέσει τμήμα μιας ευρύτερης κυκλικής διαδρομής που να καταλήγει στο σημείο εκκίνησης, χωρίς όμως να έχει μεγάλο ανεκμετάλλετο μήκος.

Επιπρόσθετα, το οδικό τμήμα δεν πρέπει να έχει μεγάλους κυκλοφοριακούς φόρτους, διότι οι οδηγοί του πειράματος δεν θα είναι σε θέση να εκτελούν τις προκαθορισμένες προσπεράσεις κατά το δοκούν. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για δύο λόγους. Αφενός, αν

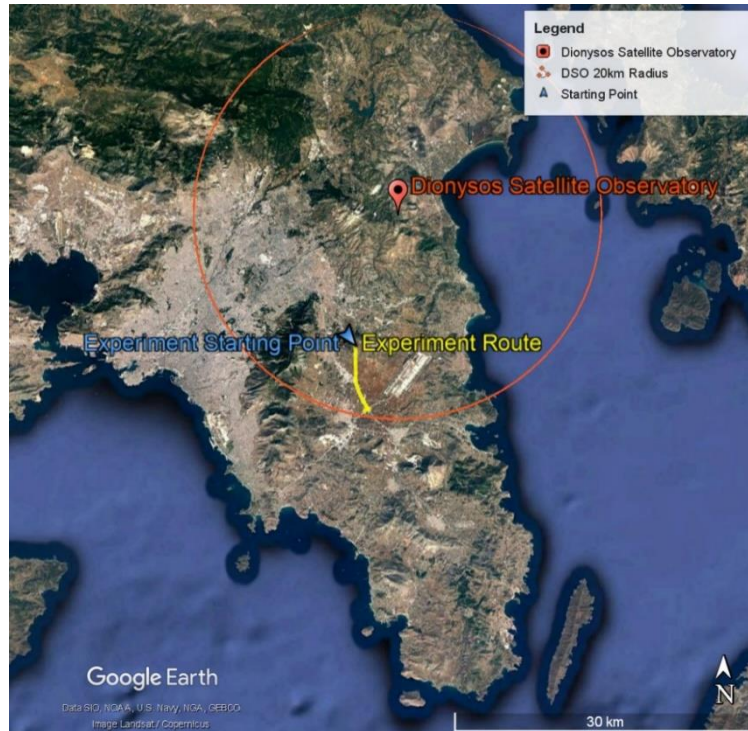
κυκλοφορούν πολλά οχήματα, είναι αρκετά πιθανό να μην είναι διαθέσιμη η μεσαία λωρίδα, ώστε να πραγματοποιηθεί ο ελιγμός της προσπέρασης. Αφετέρου, μπορεί ο χώρος στη δεξιά λωρίδα, μπροστά από το όχημα που είναι να προσπεραστεί, να καταλαμβάνεται από άλλο όχημα. Τότε, το όχημα που προσπερνάει δεν θα μπορεί να εκτελέσει τη δεύτερη αλλαγή λωρίδας και να επανέλθει στη δεξιά λωρίδα. Και στις δύο περιπτώσεις, η προσπέραση δε θα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με ικανοποιητικό τρόπο και τα οχήματα του πειράματος θα αναγκάζονται σε άσκοπη οδήγηση. Συμπερασματικά, όσο μικρότερος ο κυκλοφοριακός φόρτος, τόσο καλύτερα για το πείραμα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω απαιτήσεις αναζητήθηκε η βέλτιστη τοποθεσία για τη διεξαγωγή του οδικού πειράματος.

#### 4.1.1.2 Τελική επιλογή

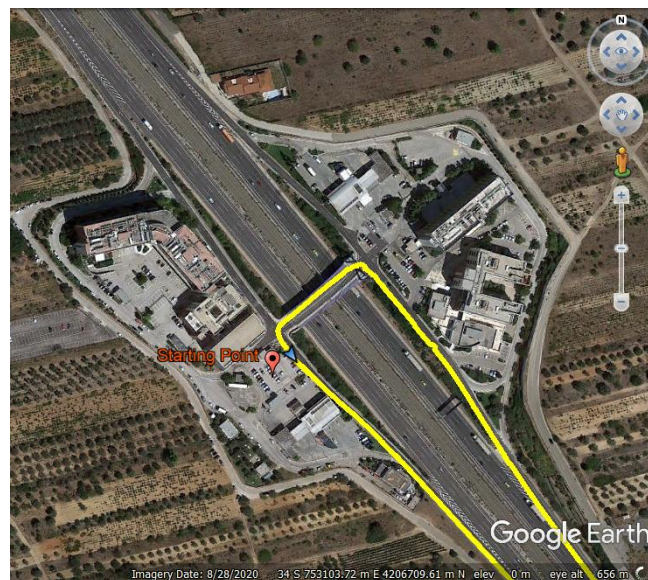
Το οδικό πείραμα πραγματοποιήθηκε στο ανατολικό τμήμα του αυτοκινητόδρομου Α6, ο οποίος συνδέει την Ελευσίνα με το Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών, στο Νομό Αττικής. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένα οδικό τμήμα στα περίχωρα του Κορωπίου, το οποίο κρίθηκε πως ικανοποιεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τις απαιτήσεις του πειράματος. Ως σταθμός αναφοράς χρησιμοποιήθηκε, εν τέλει, ο δορυφορικός δέκτης στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, στην Πεντέλη, κυρίως επειδή διαθέτει δυνατότητα πλήρους χειρισμού εξ αποστάσεων. Αυτή η δυνατότητα προσέφερε τελικά μεγαλύτερη ευχέρεια ως προς το ωράριο πραγματοποίησης του πειράματος, επειδή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων ένα εξειδικευμένο μέλος της ερευνητικής ομάδας έπρεπε να χειρίζεται τα όργανα του σταθμού αναφοράς.

Το σημείο εκκίνησης ορίστηκε στο Σταθμό Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών (ΣΕΑ) Μεσογείων, στην κατεύθυνση προς Αεροδρόμιο και η ακριβής του τοποθεσία μέσα στο Ν. Αττικής σημειώνεται στην *Εικόνα 4.2*, στο πρόγραμμα Google Earth Pro. Στην ίδια εικόνα σημειώνονται, επίσης, η διαδρομή του πειράματος και η νοητή ακτίνα των 20km γύρω από το Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου. Αμέσως γίνεται η παρατήρηση, πως η διαδρομή του πειράματος βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός του νοητού ορίου των 20km από το ΚΔΔ, έστω και οριακά, κάτι που κρίθηκε ικανοποιητικό.



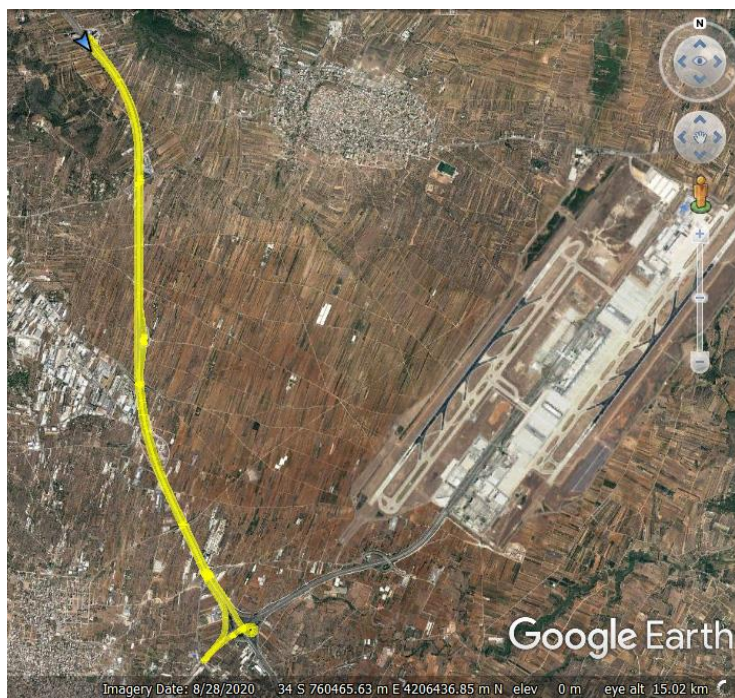
*Εικόνα 4.2 Η τοποθεσία της διαδρομής του οδικού πειράματος μέσα στην Αττική.*

Στην *Εικόνα 4.3* απεικονίζεται σε δορυφορικό στιγμιότυπο του Google Earth Pro το σημείο εκκίνησης του οδικού πειράματος, καθώς επίσης και με κίτρινο χρώμα ένα μέρος από τη διαδρομή του πειράματος. Ο παρακείμενος χώρος στάθμευσης χρησιμοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα ως βάση επιχειρήσεων, αλλά και ως το σημείο συνάντησης με τους εθελοντές οδηγούς.



*Εικόνα 4.3 Το σημείο εκκίνησης του οδικού πειράματος στο ΣΕΑ Μεσογείων στον Α6.*

Στην ακόλουθη *Εικόνα 4.4* φαίνεται το ανατολικό τμήμα του αυτοκινητόδρομου Α6 και ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών. Η διαδρομή του πειράματος επισημαίνεται με κίτρινο χρώμα, ξεκινώντας και τερματίζοντας στο σημείο εκκίνησης, το οποίο σημειώνεται με ένα μπλε βέλος. Για την απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε το Google Earth Pro.



*Εικόνα 4.4 Η διαδρομή του οδικού πειράματος στο ανατολικό τμήμα του Α6.*

Χρησιμοποιώντας ως βάση το εν λόγω οδικό τμήμα και ξεκινώντας από το σημείο εκκίνησης, η ακριβής διαδρομή που χαράχθηκε για τις ανάγκες του οδικού πειράματος ήταν η εξής:

- εκκίνηση του οχήματος στο ΣΕΑ Μεσογείων και κίνηση στον κλάδο εισόδου του κόμβου, προς τον Α6, στην κατεύθυνση προς Αεροδρόμιο,
- κίνηση στη λωρίδα επιταχύνσεως του Α6 και είσοδος στην κυκλοφορία,
- κίνηση στη δεξιά λωρίδα του Α6,
- έξοδος από τον Α6 στον κόμβο Κ20 και κίνηση στον κλάδο εξόδου του κόμβου, στην κατεύθυνση προς Κορωπί,
- κίνηση στη Λεωφόρο Κορωπίου-Αεροδρομίου, και άμεση μετάβαση στην αριστερή λωρίδα,
- κίνηση στην αποκλειστική λωρίδα αριστερής στροφής, στην κατεύθυνση προς Μαρκόπουλο,
- αναμονή στην αποκλειστική λωρίδα αριστερής στροφής για το φωτεινό σηματοδότη,
- εκτέλεση αναστροφής και κίνηση στη Λεωφόρο Κορωπίου-Αεροδρομίου, στην κατεύθυνση προς Αεροδρόμιο, στη δεξιά λωρίδα,
- είσοδος στον Α6 στον κόμβο Κ20 και κίνηση στον κλάδο εισόδου του κόμβου, στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα,
- κίνηση στη λωρίδα επιταχύνσεως του Α6 και είσοδος στην κυκλοφορία,
- κίνηση στην δεύτερη από αριστερά λωρίδα του Α6,
- σταδιακή μετάβαση στη δεξιά λωρίδα του Α6,
- μετάβαση σε μια λωρίδα e-PASS και διέλευση από τα διώδια Κορωπίου,
- μετάβαση στη δεξιά λωρίδα του Α6,
- έξοδος από την κυκλοφορία στον κόμβο για το ΣΕΑ Μεσογείων και κίνηση στη λωρίδα επιβραδύνσεως,

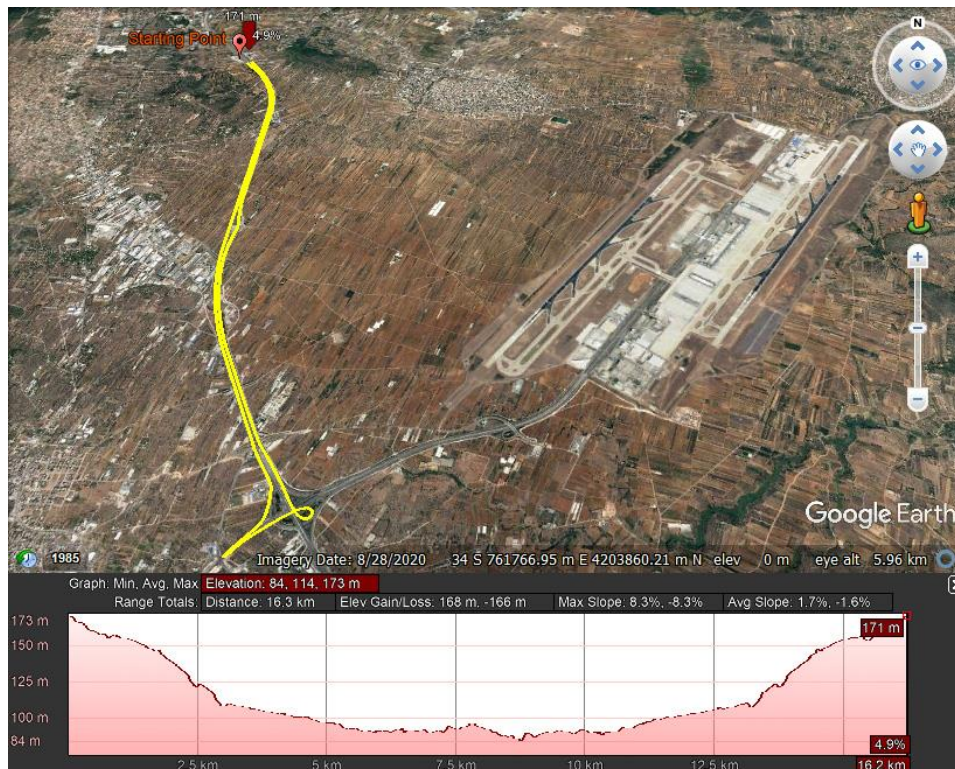
- κίνηση στον κλάδο εξόδου του κόμβου για το ΣΕΑ Μεσογείων,
- εκτέλεση αριστερής στροφής στο ΣΕΑ Μεσογείων, διέλευση από την άνω διάβαση του Α6 και άφιξη στο σημείο εκκίνησης.

Στην *Εικόνα 4.5* απεικονίζεται σε μεγέθυνση η διαδρομή του οδικού πειράματος, η οποία μάλιστα έχει επισημανθεί με μια πολύ αχνή κίτρινη γραμμή για να είναι ευδιάκριτη. Η αποτύπωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Google Earth Pro. Αμέσως παρατηρούνται δύο μεγάλες ευθυγραμμίες, καθώς και η διαπλάτυνση του οδοστρώματος στο μετωπικό σταθμό διοδίων Κορωπίου.



*Εικόνα 4.5* Μεγεθυμμένη άποψη της διαδρομής του οδικού πειράματος.

Επιπλέον, στην *Εικόνα 4.6* απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα η διαδρομή του πειράματος, σε αξονομετρικό χαρτογραφικό υπόβαθρο της ανατολικής Αττικής στο Google Earth Pro. Στην ίδια εικόνα αποτυπώνεται και η μηκοτομή της εν λόγω διαδρομής. Σύμφωνα με τις πληροφορίες που παρέχει το λογισμικό στο σχέδιο της μηκοτομής, το συνολικό μήκος της διαδρομής του πειράματος είναι 16.3km και η μέση διαμήκης κλίση 1.7%.



*Εικόνα 4.6* Αξονομετρική άποψη και μηκοτομή της διαδρομής του οδικού πειράματος.



Τα τμήματα της διαδρομής που ανήκουν στον Α6 διαθέτουν διατομή τριών λωρίδων κυκλοφορίας και μιας λωρίδας έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ), με στηθαίο τύπου New Jersey εξωτερικά της αριστερής οριογραμμής. Αντίστοιχα, τα τμήματα που ανήκουν στη Λεωφόρο Κορωπίου-Αεροδρομίου διαθέτουν διατομή δύο λωρίδων κυκλοφορίας, οι οποίες αυξάνονται σε τρεις, αν συνυπολογιστεί η αποκλειστική λωρίδα αριστερής στροφής στην κατεύθυνση προς Μαρκόπουλο. Οι δύο κατευθύνσεις διαχωρίζονται με διαγράμμιση διπλής συνεχούς γραμμής. Στην *Εικόνα 4.7* απεικονίζεται η τυπική διατομή στη μια κατεύθυνση του αυτοκινητόδρομου Α6, σε μια τυχαία χιλιομετρική θέση της διαδρομής του πειράματος στην κατεύθυνση προς Αεροδρόμιο, μέσω της εφαρμογής Street View του Google Earth Pro.



*Εικόνα 4.7 Η τυπική διατομή του Α6 σε τμήμα της διαδρομής του οδικού πειράματος.*

Όσον αφορά στις μέγιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες, στον Α6 το όριο ανέρχεται στα 120km/h, ενώ στη Λεωφόρο Κορωπίου-Αεροδρομίου στα 60km/h. Οι κλάδοι των κόμβων ΣΕΑ Μεσογείων και Κ20 διαθέτουν όριο ταχύτητας ίσο με 40km/h.

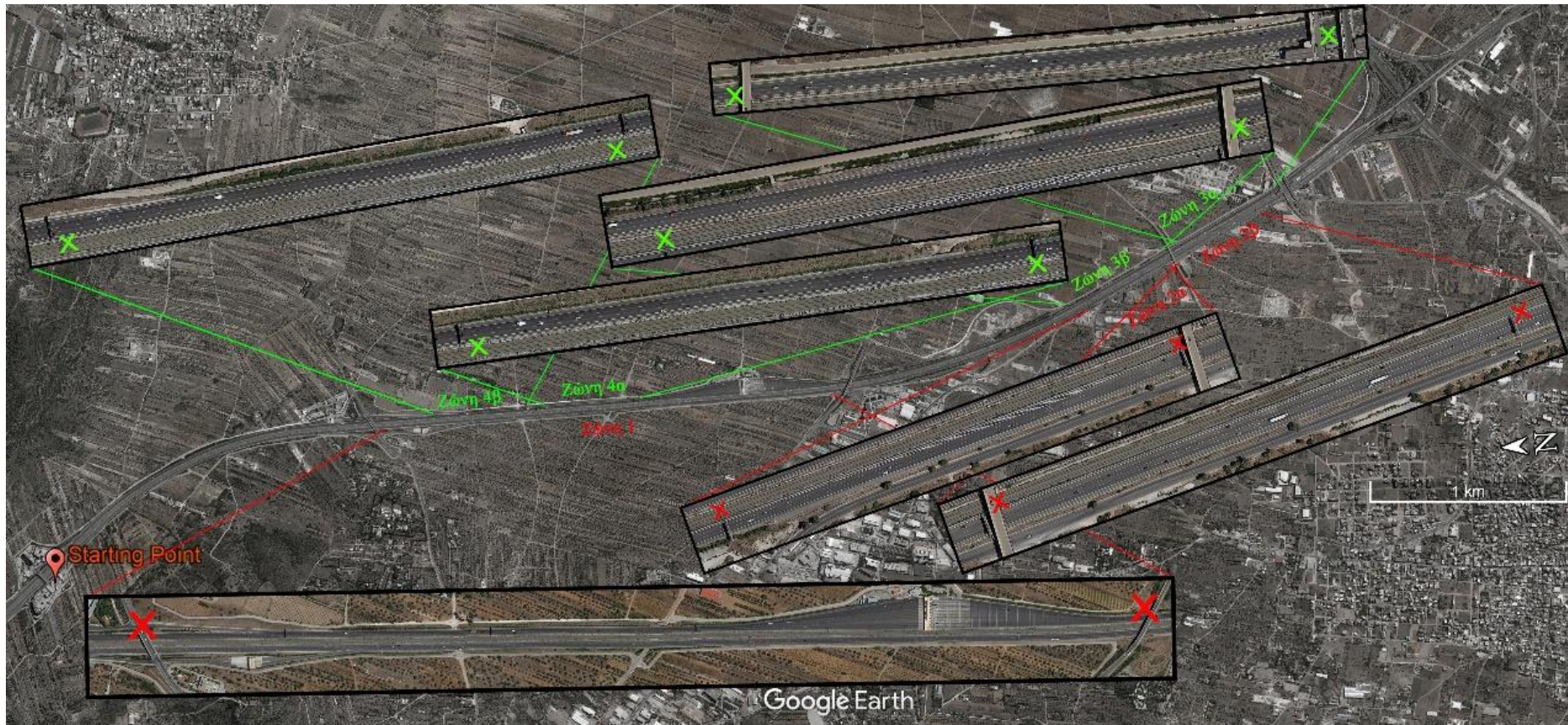
Όλες οι προσπεράσεις πραγματοποιήθηκαν για λόγους οδικής ασφάλειας σε οδικά τμήματα του Α6, εξαιτίας του διαχωρισμού των δύο κατευθύνσεων, της ύπαρξης τριών λωρίδων κυκλοφορίας, αλλά και επειδή υπάρχει η δυνατότητα να αναπτυχθεί η απαιτούμενη από το σενάριο μέγιστη ταχύτητα. Τα οδικά τμήματα της Λεωφόρου Κορωπίου-Αεροδρομίου χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για να πραγματοποιηθεί η αντιστροφή πορείας στον Α6, δηλαδή η μετάβαση από την κατεύθυνση προς Αεροδρόμιο στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα.

Με βάση τους περιορισμούς για μεγάλη ευθυγραμμία και απουσία εμποδίων πάνω από την οδό, η διαδρομή κατακερματίστηκε σε επιμέρους οδικά τμήματα, στα οποία ήταν δυνατή η πραγματοποίηση προσπεράσεων. Τα οδικά αυτά τμήματα αποτελούσαν τις ζώνες προσπέρασης του πειράματος. Η αρχή και το πέρας της κάθε μιας από αυτές καθορίστηκε από την ύπαρξη στροφής, έστω και πολύ μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας, την ύπαρξη άνω διαβάσεων ή την ύπαρξη μεγάλων εναέριων ταμπελών που καταλαμβάνουν όλο το πλάτος της οδού.

Παρατηρήθηκε, όμως, πως η επιρροή των εμποδίων πάνω από την οδό στο σήμα GPS δεν περιοριζόταν στην αμέσως κοντινή περιοχή εκατέρωθέν τους. Αντίθετα, έπαιρνε λίγο χρόνο στο δέκτη GPS να επαναπροσδιορίσει τη θέση του οχήματος με τη μέγιστη

δυνατή ακρίβεια. Συνεπώς, κρίθηκε αναγκαίο να καθοριστούν και τα πραγματικά σημεία αρχής και πέρατος της κάθε ζώνης προσπέρασης, τα οποία διαχωρίζονταν από τα προαναφερθέντα θεωρητικά σημεία. Τα πραγματικά σημεία καθορίστηκαν με εμπειρικό τρόπο και είχαν τη μορφή ενός χρονικού συντελεστή ασφαλείας. Αυτός ο συντελεστής, ύστερα από εντατική παρατήρηση της ποιότητας των καταγεγραμμένων στιγμάτων GPS προσδιορίστηκε στα 4s. Η εφαρμογή του δε, κατά την εκτέλεση του πειράματος, ήταν αρμοδιότητα αποκλειστικά των μελών της ερευνητικής ομάδας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω χωροθετήθηκαν τέσσερις ζώνες προσπέρασης, κάποιες από τις οποίες κατακερματίστηκαν περαιτέρω σε υπό-ζώνες. Η υπό-ζώνη αποτέλεσε κβαντισμένο μέγεθος, καθώς διέθετε επαρκές μήκος για μόνο μια προσπέραση. Οι ζώνες αυτές, μαζί με τα θεωρητικά συνοριακά τους σημεία απεικονίζονται στην *Εικόνα 4.8*, τόσο πάνω στη διαδρομή του πειράματος όσο και ανεξάρτητα σε μεγέθυνση. Με τα κόκκινα “X” υποδεικνύονται τα θεωρητικά σημεία αρχής και πέρατος της κάθε ζώνης προσπέρασης στην κατεύθυνση προς Αεροδρόμιο, ενώ με τα πράσινα “X” υποδεικνύονται τα αντίστοιχα σημεία για τις ζώνες στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα.



Εικόνα 4.8 Οι τέσσερις ζώνες προσπέρασης στη διαδρομή του οδικού πειράματος.

Τα θεωρητικά μήκη της κάθε ζώνης αναγράφονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο Πίνακα 4.1. Οι τιμές αυτές είναι προσεγγιστικές, με αναμενόμενη ακρίβεια  $\pm 6\text{m}$  και ως εκ τούτου πρέπει να λογίζονται ως ενδεικτικές. Τα θεωρητικά μήκη είναι αυτά που αντιστοιχούν στα θεωρητικά συνοριακά σημεία και δεν πρέπει να συγχέονται με τα πραγματικά μήκη της εκάστοτε ζώνης προσπέρασης.

Πίνακας 4.1 Ενδεικτικές τιμές για τα θεωρητικά μήκη των ζωνών προσπέρασης.

Ζώνη Προσπέρασης		Μήκος (m)
1		2,383
2	α	476
	β	473
3	α	636
	β	527
4	α	491
	β	491

Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα της εν λόγω διαδρομής είναι, πως βρίσκεται σε σχετικά επίπεδο έδαφος και πως εκατέρωθεν του Αυτοκινητόδρομου 6 δεν υπάρχουν σε κοντινή απόσταση υψηλά εμπόδια. Χαρακτηριστική είναι η *Εικόνα 4.7*, η οποία έχει τραβηχτεί από τη ζώνη προσπέρασης 1 και αναδεικνύει την τυπική κατάσταση που επικρατεί στα περίξ της οδού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ελαττώνεται σημαντικά το σφάλμα του GPS που οφείλεται στην πολλαπλή διαδρομή σήματος.

#### 4.1.2 Όργανα συλλογής δεδομένων

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, ο προσδιορισμός της θέσης του οχήματος γινόταν με τη βοήθεια ενός ειδικού δέκτη GNSS. Δεδομένου πως οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν κάθε φορά με ζεύγη οδηγών, αυτό σημαίνει πως χρησιμοποιούνταν ταυτόχρονα δύο οχήματα. Επομένως, απαιτούνταν τουλάχιστον δύο δέκτες GNSS, ένας για το κάθε όχημα.

Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δέκτες GNSS χαμηλού κόστους (low-cost) τύπου u-blox. Συνολικά αποκτήθηκαν τρεις πλήρεις διατάξεις u-blox, οι οποίες αποτελούνταν από τον ίδιο το δέκτη, το “σώμα” και τα απαιτούμενα καλώδια σύνδεσης. Εν γένει, οι δέκτες των u-blox είναι σχεδιασμένοι για μετρήσεις στο ύπαιθρο και αποτελούν συσκευές παντός καιρού.

Η μια διάταξη u-blox ήταν τύπου EVK-6T-0 και απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.9*. Ο δέκτης GNSS είναι το μαύρο παραλληλεπίπεδο με την κουλούρα καλωδίου στο κέντρο αριστερά και έχει διαστάσεις περίπου 4.5cm x 4.5cm x 1.5cm. Αυτός συνδεόταν στο κυρίως σώμα της διάταξης, που είναι το λευκό παραλληλεπίπεδο στο κάτω αριστερό μέρος της εικόνας, μέσω του κυλινδρικού κοχλιωτού βύσματος. Το καλώδιο πάνω αριστερά συνέδεε τη θύρα USB του κυρίως σώματος με κάποια ηλεκτρονική συσκευή καταγραφής, στην οποία συνδεόταν μέσω του βύσματος USB στο άλλο άκρο του. Μέσω αυτής της σύνδεσης γινόταν η μεταφορά δεδομένων, αλλά και η τροφοδοσία του u-blox με ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 4.9 Η συσκευή u-blox EVK-6T-0.

Η δεύτερη διάταξη u-blox ήταν τύπου NEO-7P και απεικονίζεται στην Εικόνα 4.10(α) με τα επιμέρους στοιχεία μεμονωμένα και στην Εικόνα 4.10(β) με τα στοιχεία σε πλήρη σύνδεση. Ο δέκτης GNSS είναι και πάλι το μαύρο παραλληλεπίπεδο με το τυλιγμένο καλώδιο και έχει και αυτός διαστάσεις περίπου 4.5cm x 4.5cm x 1.5cm. Το πιο μεγάλο μαύρο παραλληλεπίπεδο είναι το κυρίως σώμα της διάταξης και ενσωματώνει τη μπαταρία. Εκτός από τον κλασικό τρόπο με το καλώδιο USB, μπορεί να συνδεθεί στην εκάστοτε ηλεκτρονική συσκευή καταγραφής και μέσω Bluetooth. Στην περίπτωση αυτή, το καλώδιο USB δεν χρησιμοποιούνται κάπου και στο σώμα έπρεπε να συνδεθεί μόνο ο δέκτης GNSS, μέσω του κυλινδρικού κοχλιωτού βύσματος. Παράλληλα, το u-blox τροφοδοτούνταν με ενέργεια από την ενσωματωμένη μπαταρία. Όταν η σύνδεση πραγματοποιούνταν με το καλώδιο USB, πέρα από τη μεταφορά δεδομένων πραγματοποιούνταν και φόρτιση του u-blox από την ηλεκτρονική συσκευή.



Εικόνα 4.10 Η συσκευή u-blox NEO-7P.

Η τρίτη διάταξη u-blox ήταν τύπου C94-M8P-3 και απεικονίζεται στην Εικόνα 4.11(α) με τα επιμέρους στοιχεία μεμονωμένα και στην Εικόνα 4.11(β) με τα στοιχεία σε πλήρη σύνδεση. Το μαύρο παραλληλεπίπεδο με το τυλιγμένο καλώδιο είναι και εδώ ο δέκτης GNSS και έχει διαστάσεις περίπου 4.5cm x 4.5cm x 1.5cm. Η πλακέτα με το μπλε καπάκι αποτελεί το κυρίως σώμα της διάταξης, πάνω στο οποίο συνδεόταν η μακρόστενη μαύρη κεραία και ο δέκτης GNSS. Και οι δύο αυτές συνδέσεις πραγματοποιούνταν μέσω των κυλινδρικών κοχλιωτών βυσμάτων. Επιπρόσθετα, η πλακέτα διαθέτει και θύρα Micro-USB, στην οποία συνδεόταν το καλώδιο μεταφοράς δεδομένων. Το

τελευταίο, στη συνέχεια, συνδεόταν μέσω του βύσματος USB με κάποια ηλεκτρονική συσκευή, ώστε να πραγματοποιείται η μεταφορά δεδομένων και η φόρτιση του u-blox.



Εικόνα 4.11 Η συσκευή u-blox C94-M8P-3.

Τα όργανα αυτά συντονίστηκαν αποκλειστικά στους δορυφόρους του GPS και πραγματοποιούσαν απόλυτο εντοπισμό θέσης (standalone GPS). Επιπλέον, τα τρία αυτά u-blox έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν σήματα μόνο στη συχνότητα L1 και δεν λειτουργούν ως δέκτες διπλής συχνότητας, δηλαδή δεν δέχονται σήματα στη συχνότητα L2. Με βάση τα παραπάνω, η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης των οχημάτων, σε πρώτη φάση τουλάχιστον, ήταν η αντίστοιχη ακρίβεια που έχει ένας μονοφασικός δέκτης GPS. Η ακρίβεια αυτή είναι της τάξης των 5m.

Σε δεύτερο χρόνο, όμως, οι καταγραφές των GPS διορθώθηκαν με την τεχνική Real Time Kinematics. Έτσι, η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης των οχημάτων βελτιώθηκε σημαντικά και προέκυψε αντίστοιχη της ακρίβειας που πετυχαίνεται στις εφαρμογές RTK. Επειδή, όμως, αυτή επηρεάζεται σε πραγματικό χρόνο από μια πληθώρα παραγόντων, δεν κατέστη δυνατό να προσδιοριστεί μια συγκεκριμένη τιμή της. Εντελώς ενδεικτικά, η αναμενόμενη ακρίβεια ήταν μικρότερη των 10cm και μάλλον πιο κοντά στα 3-5cm. Σημειώνεται, πως αυτές οι τιμές αφορούν στα σημεία που η επίλυση των ασαφειών φάσης γινόταν χωρίς προβλήματα και με καλά αποτελέσματα. Στις περιοχές άνω διαβάσεων και ταμπελών, αλλά και στην περιοχή του σταθμού διοδίων παρατηρήθηκαν αποκλίσεις που ήταν τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες.

Τα όργανα έχουν μέγιστη συχνότητα καταγραφής δεδομένων 10Hz. Ωστόσο, αυτή η συχνότητα δεν παρατηρείται πάντα. Πρακτικά περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα ή μη, πολλών δορυφόρων πάνω από μια περιοχή σε μια χρονική στιγμή, καθώς και από την παλαιότητα του εκάστοτε οργάνου. Σε γενικές γραμμές πάντως παρατηρήθηκε, πως για ένα όργανο η συχνότητα καταγραφής δεδομένων ήταν σε πολύ μεγάλο βαθμό σταθερή για ολόκληρη τη χρονική διάρκεια που αυτό λάμβανε μετρήσεις.

Ύστερα από τη διενέργηση δοκιμαστικών μετρήσεων διαπιστώθηκε, πως το όργανο EVK-6T-0 κατέγραφε στίγματα GPS με χρονικό βήμα 0.3s κυρίως, αλλά ενίοτε και ανά 0.2s ή 0.4s. Για σύγκριση, το όργανο NEO-7P είχε συχνότητα καταγραφής δεδομένων 5Hz κυρίως, αλλά πολλές φορές και 10Hz. Τέλος, το όργανο C94-M8P-3 εμφάνιζε πάντα συχνότητα καταγραφής ίση με 10Hz.

Για ταχύτητα κίνησης ίση με 70km/h, συχνότητα καταγραφής δεδομένων ίση με 10Hz σημαίνει, πως δύο διαδοχικά γνωστά σημεία της τροχιάς του οχήματος απέχουν μεταξύ

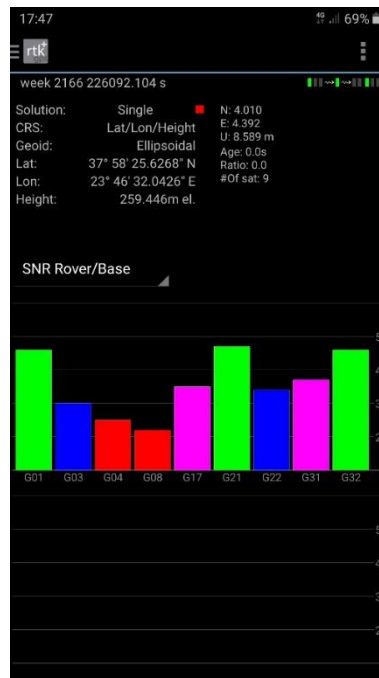
τους 1.94m. Για συχνότητα καταγραφής ίση με 5Hz, η απόσταση αυτή αυξάνεται στα 3.89m, ενώ χρονικό βήμα 0.3s στις καταγραφές συνεπάγεται απόσταση 5.83m μεταξύ δύο στιγμάτων GPS. Για ταχύτητα κίνησης ίση με 90km/h, οι αντίστοιχες τιμές είναι 2.5m για τα 10Hz, 5m για τα 5Hz και 7.5m για χρονικό βήμα 0.3s. Τέλος, για ταχύτητα κίνησης ίση με 110km/h, οι αντίστοιχες τιμές αυξάνονται ακόμη περισσότερο και συγκεκριμένα γίνονται 3.06m για τα 10Hz, 6.11m για τα 5Hz και 9.17m για χρονικό βήμα 0.3s.

Υπενθυμίζεται, πως η παρούσα εργασία/έρευνα πραγματεύεται τη μαθηματική περιγραφή των τροχιών και τη μόρφωση κατάλληλων μοντέλων πρόβλεψης. Επομένως, είναι προφανές, πως τα δεδομένα με τα οποία τροφοδοτούνταν τα μοντέλα έπρεπε να διαθέτουν την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Έτσι, επιζητήθηκε η καταγραφή των τροχιών των οχημάτων να πραγματοποιείται με χρονικά πυκνά στίγματα GPS.

Με βάση τα παραπάνω, από τα τρία διαθέσιμα όργανα χρησιμοποιούνταν κυρίως το NEO-7P και το C94-M8P-3. Το όργανο EVK-6T-0 δε χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα, αλλά κρατήθηκε ως εφεδρικό. Πέραν των δοκιμαστικών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε μόνο μια φορά, αντί του NEO-7P, επειδή το τελευταίο δεν ήταν φορτισμένο. Όλες τις υπόλοιπες φορές, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το NEO-7P και το C94-M8P-3.

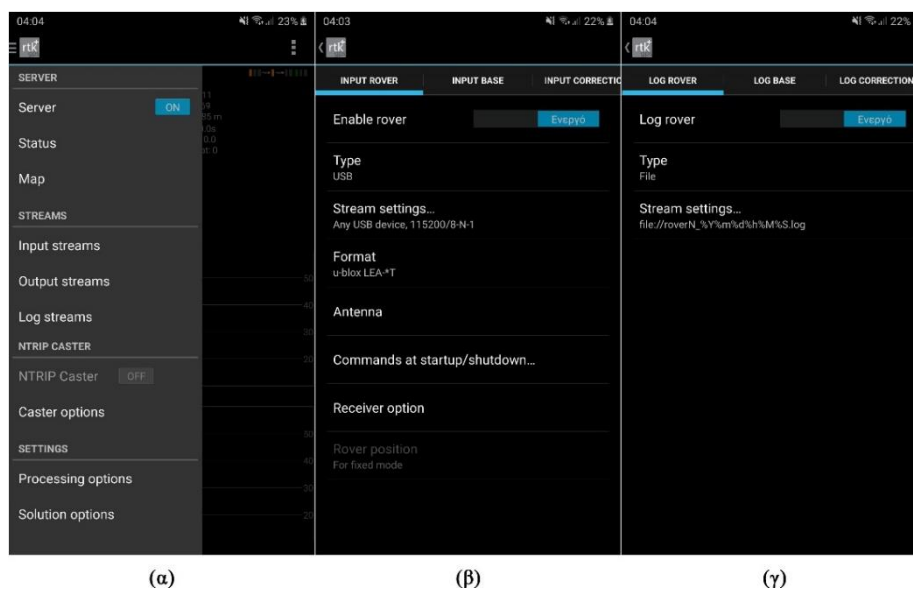
Για να λειτουργήσουν οι διατάξεις των u-blox απαιτούνταν κάθε φορά να συνδέονται με μια ηλεκτρονική συσκευή. Η συσκευή έπρεπε να έχει περιβάλλον εργασίας εφάμιλλο ενός υπολογιστή, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του u-blox, αλλά και επαρκή διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο, καθώς τα δεδομένα που λάμβανε ο δέκτης GNSS αποθηκεύονταν απευθείας σε αυτή. Οι διαθέσιμες επιλογές, συνεπώς, ήταν τρεις. Συγκεκριμένα, μπορούσε να χρησιμοποιηθεί laptop, tablet ή smartphone. Η συσκευή αυτή έπρεπε να βρίσκεται σε διαρκή και ανεμπόδιστη επικοινωνία με το αντίστοιχο όργανο u-blox, επομένως έπρεπε να βρίσκεται μέσα στο όχημα. Βέβαια, δεν υπήρχε κανένας περιορισμός ως προς πιθανή παράλληλη χρήση της εν λόγω συσκευής για άλλες εργασίες.

Ο χειρισμός των u-blox από τις εξωτερικές ηλεκτρονικές συσκευές γινόταν μέσω μιας κατάλληλης εφαρμογής. Οι κύριες επιλογές ήταν δύο, η εφαρμογή RTKGPS+ σε λειτουργικό σύστημα Android και η το πρόγραμμα RTKNAVI σε λειτουργικό σύστημα Windows. Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή RTKGPS+ και έτσι αποκλείστηκε έμμεσα το ενδεχόμενο να συνδεθούν τα u-blox απευθείας σε κάποιο laptop. Στην *Εικόνα 4.12* απεικονίζεται το κεντρικό περιβάλλον της εφαρμογής RTKGPS+, μια στιγμή που το αντίστοιχο u-blox ήταν ενεργοποιημένα και λάμβανε δεδομένα. Οι χρηματιστές στήλες αντιστοιχούν στον αριθμό των δορυφόρων από τους οποίους λαμβάνει κάθε στιγμή σήματα το u-blox. Η χρωματική κωδικοποίηση υποδηλώνει την ένταση του λαμβανόμενου δορυφορικού σήματος, με το πράσινο να αντιστοιχεί στην κατηγορία της μεγαλύτερης ισχύος. Με άλλα λόγια, το πράσινο θεωρούνταν το “τέλειο” και γενικά ίσχυε, πως με όσους περισσότερους “πράσινους” δορυφόρους βρίσκεται σε οπτική επαφή ένας δέκτης GPS, τόσο πιο ακριβής είναι ο εντοπισμός της θέσης του.



Εικόνα 4.12 Η αρχική σελίδα της εφαρμογής RTKGPS+ για Android.

Στην ακόλουθη Εικόνα 4.13 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των ρυθμίσεων, οι οποίες προσαρμόστηκαν στις ανάγκες του οδικού πειράματος. Πραγματοποιήθηκε εστιασμένα αλλαγή ορισμένων μόνο παραμέτρων και δεν πειράχτηκαν όλες.

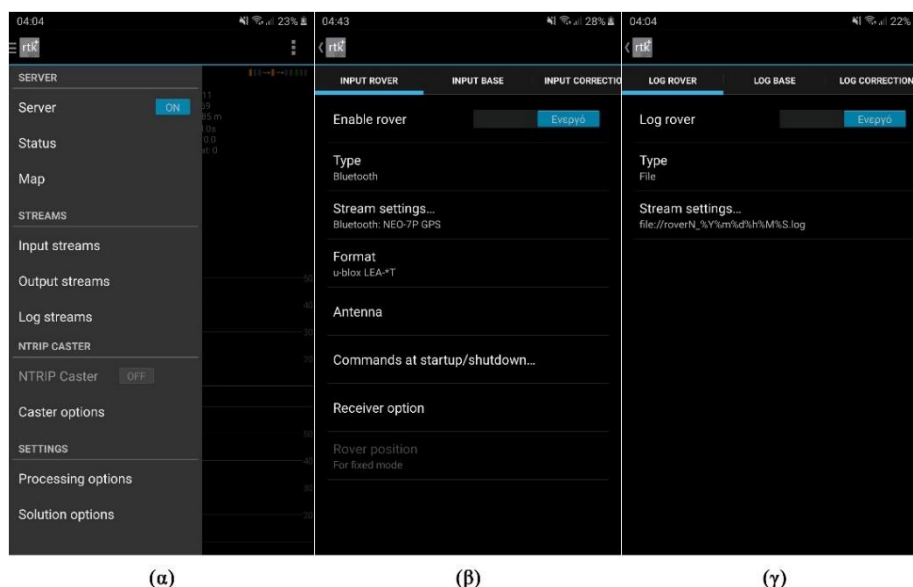


Εικόνα 4.13 Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν στην εφαρμογή RTKGPS+ για σύνδεση με USB.

Στις διάφορες ημέρες που διήρκησε το οδικό πείραμα, για τη σύνδεση με τα u-blox χρησιμοποιήθηκαν ένα tablet και δύο smartphone. Το ένα smartphone ήταν όλες τις φορές συνδεδεμένο με το όργανο C94-M8P-3 μέσω καλωδίου USB, ενώ το tablet ήταν συνδεδεμένο με το όργανο NEO-7P, ενίοτε πραγματοποιώντας σύζευξη μέσω Bluetooth και ενίοτε μέσω καλωδίου USB. Τη μοναδική φορά που χρησιμοποιήθηκε το όργανο EVK-6T-0, αντί του tablet συνδέθηκε με αυτό το u-blox ένα άλλο smartphone.



Οι μόνες διαφοροποιήσεις κατά τη χρήση του Bluetooth ήταν, πως η παράμετρος “Type” στην *Εικόνα 4.13(β)* άλλαξε σε “Bluetooth” και πως η παράμετρος “Stream settings...” επίσης στην *Εικόνα 4.13(β)* λάμβανε την τιμή “Bluetooth: NEO-7P GPS”, όπως φαίνεται στην ακόλουθη *Εικόνα 4.14(β)*. Για να λειτουργήσει η μεταφορά δεδομένων με Bluetooth έπρεπε το tablet και το u-blox να συζευχθούν. Επιπλέον, με την απουσία καλωδίων, πέρα από το ότι δεν υπήρχε ο κίνδυνος της ξαφνικής και μη επιθυμητής αποσύνδεσης κάποιου βύσματος, διευκολυνόταν και η μεταφορά του εξοπλισμού μεταξύ των οχημάτων.



*Εικόνα 4.14* Οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν στην εφαρμογή RTKGPS+ για σύνδεση με Bluetooth.

Η τοποθέτηση των οργάνων στα δύο οχήματα δεν πραγματοποιήθηκε τυχαία, αλλά με συγκεκριμένο τρόπο. Αρχικά σημειώνεται, πως οι δέκτες GNSS των u-blox στο κάτω μέρος τους διαθέτουν έναν ισχυρό μαγνήτη, ο οποίος καθιστά δυνατή την ασφαλή και σταθερή αγκίστρωσή τους πάνω σε οποιαδήποτε μεταλλική επιφάνεια. Για να υπάρχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή μεταξύ του δέκτη και των δορυφόρων GPS, οι πρώτοι τοποθετούνταν πάντα στην οροφή του εκάστοτε οχήματος. Εξαιτίας του μαγνήτη δεν υπήρχε κανένας απολύτως κίνδυνος να απαγκιστρωθούν ή ακόμα και να μετακινηθούν έστω και λίγο. Αυτό ίσχυε για όλες τις ταχύτητες κίνησης.

Παράλληλα, η εφαρμογή της μεθοδολογίας, που θα ακολουθούσε την εκτέλεση του πειράματος, απαιτούσε τη γνώση της ακριβούς θέσης του δέκτη GPS σε σχέση με τα πλαϊνά όρια της οροφής του εκάστοτε οχήματος. Η επιστημονικά ορθότερη μέθοδος θα ήταν να τοποθετηθεί ο δέκτης σε ένα αυθαίρετο βολικό σημείο και ύστερα να μετρηθεί με μετροταινία η ακριβής απόσταση από τις τέσσερις πλευρές. Τέτοια ακρίβεια, τελικά, κρίθηκε μη αναγκαία.

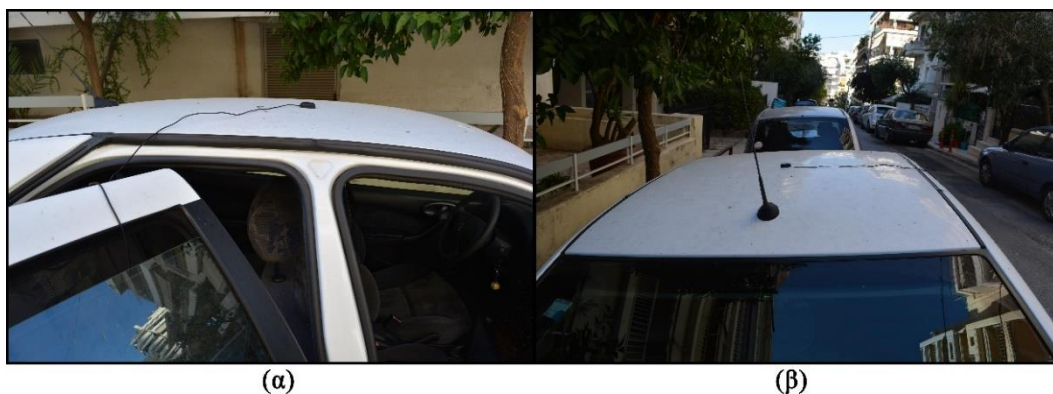
Αντίθετα, προτιμήθηκε να τοποθετείται ο δέκτης περίπου στο κεντροειδές της οροφής του εκάστοτε οχήματος. Φυσικά, το κεντροειδές δεν προσδιοριζόταν με μαθηματικό τρόπο. Ως προς τον εγκάρσιο άξονα του οχήματος, η τοποθέτηση γινόταν πάνω στη νοητή ευθεία που σχημάτιζε η εξοχή της κεραίας και το ανάγλυφο σήμα της μάρκας στο μπροστινό προφυλακτήρα. Έτσι, σε εκείνη τη διεύθυνση ο δέκτης δεν αναμενόταν να απέχει από το πραγματικό κεντροειδές περισσότερο από μερικά χιλιοστά. Ως προς

το διαμήκη άξονα του οχήματος, λόγω έλλειψης αληθινών βοηθητικών σημείων, αποφασίστηκε ο δέκτης να τοποθετείται ακριβώς στο ύψος που ο μεσαίος στύλος του πλαισίου του εκάστοτε αμαξώματος συναντά την οροφή. Το σημείο αυτό διαφέρει από όχημα σε όχημα και στη γενική περίπτωση δεν ταυτίζεται με το μέσον του συνολικού μήκους του οχήματος. Παρόλα αυτά, προτιμήθηκε για δύο λόγους. Πρώτον, παρότι η σχετική έρευνα που πραγματοποιήθηκε δεν απέδωσε καρπούς, υπήρχαν βάσιμες προσδοκίες, πως οι κατασκευάστριες εταιρείες θα είχαν εκδώσει τις λεπτομερείς αποστάσεις μεταξύ του σημείου εκείνου και των δύο προφυλακτήρων. Δεύτερον, με αυτή την επιλογή διατηρήθηκε η δυνατότητα να μετρηθούν μελλοντικά οι εν λόγω αποστάσεις με μετροταινία και έστω και με καθυστέρηση να μπορέσει να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση του δέκτη πάνω στην οροφή του οχήματος. Σε κάθε περίπτωση, στη διαμήκη διεύθυνση ο δέκτης δεν αναμενόταν να αποκλίνει από το πραγματικό κεντροειδές περισσότερο από 20cm. Το σφάλμα αυτό κρίθηκε αποδεκτό. Στην *Εικόνα 4.15* απεικονίζεται ένα όχημα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, με το δέκτη του u-blox τοποθετημένο στην οροφή του.



*Εικόνα 4.15* Τοποθέτηση του δέκτη GNSS στην οροφή των οχημάτων του πειράματος.

Στην *Εικόνα 4.16* απεικονίζεται το ακριβές σημείο τοποθέτησης του δέκτη u-blox πάνω στο όχημα στις δύο διευθύνσεις. Συγκεκριμένα, στην *Εικόνα 4.16(α)* φαίνεται η σχετική του θέση ως προς το μεσαίο στύλο του πλαισίου του αμαξώματος και στην *Εικόνα 4.16(β)* φαίνεται η σχετική του θέση ως προς τα πλαϊνά όρια του οχήματος.



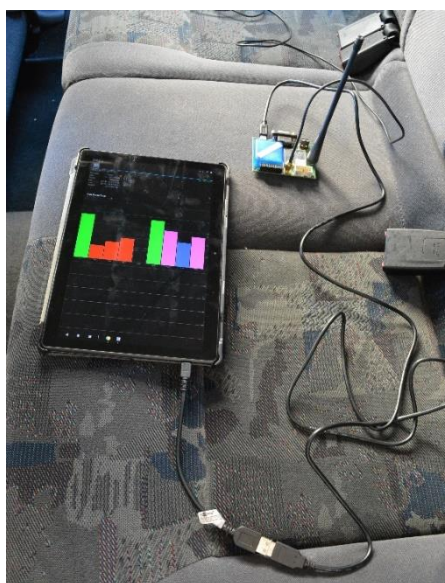
*Εικόνα 4.16* Προσδιορισμός του σημείου τοποθέτησης του δέκτη GNSS στη διαμήκη (αριστερά) και την εγκάρσια (δεξιά).

Το κυρίως σώμα των u-blox και οι συσκευές με τις οποίες αυτά ήταν συνδεδεμένα δεν ήταν εκτεθειμένα στο εξωτερικό περιβάλλον, αλλά είχαν εναποθέτονταν με ευλάβεια στο πίσω κάθισμα του εκάστοτε οχήματος. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο να μετακινούνται όσο το δυνατόν λιγότερο, καθώς υπήρχε πάντα ο κίνδυνος να μετακινηθεί κάποιιο από τα βύσματα και να διακοπεί η σύνδεση του u-blox με την ηλεκτρονική συσκευή. Σε περίπτωση που γινόταν κάτι τέτοιο, το πείραμα θα έπρεπε να διακοπεί προσωρινά και υπήρχε ο κίνδυνος να καταστραφεί το αρχείο με τις μέχρι τότε καταγραφές. Το καλώδιο του δέκτη GNSS περνούσε κάθε φορά μέσα από κάποιο ανοικτό παράθυρο για να φτάσει στα πίσω καθίσματα του οχήματος, όπου και συνδεόταν με το κυρίως σώμα του αντίστοιχου u-blox. Συνήθως, για αυτό το σκοπό αφηνόταν μερικά εκατοστά ανοικτό το πίσω δεξιά παράθυρο του εκάστοτε οχήματος. Στην *Εικόνα 4.17* φαίνονται τα πίσω καθίσματα ενός οχήματος κατά τη διάρκεια του πειράματος, με το κυρίως σώμα του u-blox να είναι συνδεδεμένο με το smartphone, το οποίο κατέγραφε τα δεδομένα.



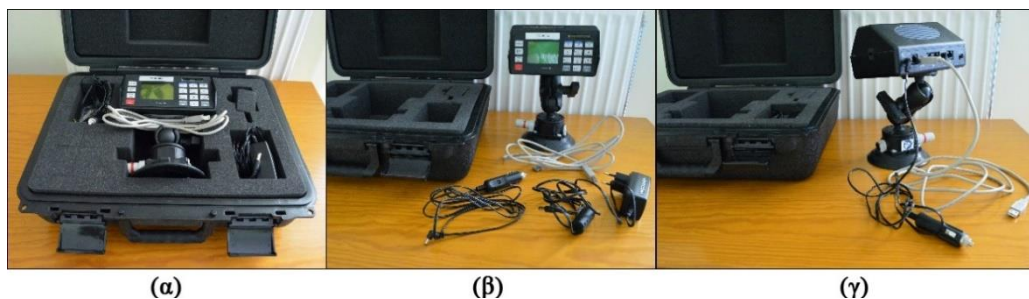
*Εικόνα 4.17* Εναπόθεση του smartphone και του u-blox στα πίσω καθίσματα του οχήματος του πειράματος.

Στην *Εικόνα 4.18* απεικονίζεται το ίδιο σκηνικό, με τη διαφορά πως αντί του smartphone χρησιμοποιούνταν το tablet.



*Εικόνα 4.18* Εναπόθεση του tablet και το u-blox στα πίσω καθίσματα του οχήματος του πειράματος.

Στο οδικό πείραμα, πέραν των u-blox χρησιμοποιήθηκε επιπρόσθετα ένα όργανο συλλογής δεδομένων τύπου Vericom VC4000RG. Αυτό τοποθετούνταν τυχαία σε ένα από τα δύο οχήματα που πραγματοποιούσαν ταυτόχρονα τις μετρήσεις. Ο ρόλος του ήταν κυρίως βοηθητικός, καθώς ύστερα από την κατάλληλη επεξεργασία αναμενόταν να μπορέσουν να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο τα δεδομένα της τροχιάς του οχήματος. Παράλληλα, χρησίμευε ως μέσο επαλήθευσης των αποτελεσμάτων που έδιναν τα u-blox. Επιπλέον, τα δεδομένα που συνέλεξε δυνητικά θα μπορούσαν να παίξουν καίριο ρόλο, μέσω της σύγκρισής τους με τα δεδομένα των u-blox και της αξιολόγησης της ακρίβειάς που αυτά προσφέρουν. Τέλος, εκπλήρωνε και το ρόλο του εφεδρικού οργάνου συλλογής δεδομένων, στην περίπτωση που κάτι πήγαινε στραβά με τα υπόλοιπα. Στην *Εικόνα 4.19(α)* απεικονίζεται το VC4000RG στη θήκη μεταφοράς, στην *Εικόνα 4.19(β)* είναι το ίδιο όργανο σε πλήρη ανάπτυξη και στην *Εικόνα 4.19(γ)* φαίνεται το όργανο με το καλώδιο τροφοδοσίας και το καλώδιο USB τοποθετημένα.



*Εικόνα 4.19 Η συσκευή Vericom VC4000RG.*

Το VC4000RG τοποθετούνταν στο εσωτερικό του ανεμοθώρακα του ενός εκ των δύο οχημάτων, με τη βοήθεια μιας βεντούζας. Με τη βοήθεια δύο μικρών ενσωματωμένων αλφαδιών οριζοντιωνόταν, ενώ ο άξονάς του ήταν γενικά επιθυμητό να ταυτίζεται με το διαμήκη άξονα του οχήματος. Ήταν πολύ σημαντικό να τοποθετηθεί σωστά, επειδή εκτός από GPS διαθέτει επιπρόσθετα επιταχυνσιόμετρα και γυροσκοπία στις τρεις διαστάσεις, καθώς και πυξίδα. Στην *Εικόνα 4.20* απεικονίζεται το VC4000RG τοποθετημένο στο εσωτερικό του ανεμοθώρακα ενός οχήματος.



*Εικόνα 4.20 Τοποθέτηση του VC4000RG στο εσωτερικό του ανεμοθώρακα.*

Εξαιτίας της μικρής διάρκειας ζωής της μπαταρίας του, το VC4000RG διατηρήθηκε συνδεδεμένο στην πρίζα του εκάστοτε οχήματος για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

Επιπλέον, η εσωτερική του μνήμη κρίθηκε ανεπαρκής για τον όγκο των αναμενόμενων καταγραφών. Έτσι, ήταν μόνιμα συνδεδεμένο μέσω καλωδίου USB με laptop, στο οποίο και αποθηκεύονταν σε πραγματικό χρόνο τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Μάλιστα, το πρόγραμμα “Profile 5” που είναι το λογισμικό ελέγχου του VC4000RG, προσφέρει τη δυνατότητα προβολής σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων που μετράει το όργανο. Αυτή η δυνατότητα βοηθάει πολύ το χρήστη στο να εποπτεύει τις εκάστοτε παραμέτρους ενδιαφέροντος. Στην *Εικόνα 4.21* φαίνεται το όργανο VC4000RG σε σύνδεση με laptop, το οποίο είναι τοποθετημένο στη θέση του συνοδηγού. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την εκτέλεση οδικών μετρήσεων από ένα μόνο άτομο, τον οδηγό του οχήματος.



*Εικόνα 4.21* Η διάταξη του VC4000RG και του laptop με το οποίο ήταν συνεχώς συνδεδεμένο

#### 4.1.3 Πρωτόκολλο διεξαγωγής οδικού πειράματος

Το οδικό πείραμα προσπεράσεων αποτέλεσε μια επιστημονική εφαρμογή συλλογής δεδομένων και ως τέτοια, έπρεπε να διέπεται από ένα αυστηρό πρωτόκολλο διεξαγωγής. Το πρωτόκολλο αυτό διαμορφώθηκε πάνω σε δύο κύριους άξονες. Πρώτον, στο να εξασφαλιστεί η αμεροληψία του στατιστικού δείγματος και δεύτερον, στο να ενορχηστρωθεί η όλη διαδικασία των μετρήσεων με τον πλέον αποδοτικό τρόπο.

Αρχικά, για την εκτέλεση του οδικού πειράματος χρησιμοποιήθηκαν εθελοντές οδηγοί. Κατά την επιλογή των ατόμων δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή, ώστε αυτά να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ηλικιών και επαγγελματικών ενδιαφερόντων. Δεν έγινε καμία διάκριση μεταξύ των δύο φύλλων. Ο κάθε εθελοντής οδηγός αντιστοιχήθηκε σε έναν μοναδικό αύξοντα αριθμό οδηγού (Driver α/α), ο οποίος χρησιμοποιούνταν αντί του ονόματος σε όλα τα φύλλα καταγραφής. Η αντιστοιχία των αριθμών αυτών με τα πραγματικά ονόματα κρατήθηκε μυστική. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίστηκε η ανωνυμία των συμμετεχόντων, καθώς ο μοναδικός αυτός αριθμός ήταν και το μόνο τεκμήριο που τους

συνέδεε με τις προσπεράσεις που εκτέλεσαν. Η ανωνυμία αυτή στόχευε και στο να κάνει τους οδηγούς να ξεπεράσουν το τυχόν άγχος τους, μήπως και καταγραφόταν κάπου κάποια “περίεργη” οδηγική τους συμπεριφορά.

Στη συνέχεια, από το σύνολο των εθελοντών οδηγών διαμορφώθηκαν τα ζεύγη των οδηγών, οι οποίοι θα πραγματοποιούσαν τις προσπεράσεις μεταξύ τους. Η ανάγκη για την ταυτόχρονη συμμετοχή κάθε φορά δύο οδηγών προέκυψε από το γεγονός ότι κάθε ελιγμός προσπέρασης προϋποθέτει γενικά δύο οχήματα, το όχημα που προσπερνάει ή “κυνηγό” (hunter) και το όχημα που προσπερνάται ή “δόλωμα” (bait). Δεν ήταν απαραίτητο ένας οδηγός να συμμετέχει σε ένα μόνο ζεύγος. Αντίθετα, έγιναν διάφοροι συνδυασμοί μεταξύ των οδηγών, αρκετοί από τους οποίους οδήγησαν με διάφορα ταιρία. Το κάθε ζεύγος οδηγών αντιστοιχήθηκε σε έναν μοναδικό αύξοντα αριθμό ζεύγους (Duo α/α), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την ονομασία της κάθε προσπέρασης. Επιπλέον, για το κάθε ζεύγος προγραμματίστηκε η ημέρα και η ώρα που θα πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των εθελοντών οδηγών και της ερευνητικής ομάδας εξίσου. Στην *Εικόνα 4.22* απεικονίζεται τμήμα από το φύλλο ορισμού των ζευγών και της ανάθεσης οδηγών σε αυτά, το οποίο λειτούργησε και γενικότερα ως συγκεντρωτικός πίνακας επισκόπησης των ημερομηνιών εκτέλεσης μετρήσεων. Στο ίδιο φύλλο διατηρούνταν και η αντιστοιχία των οδηγών με τους αύξοντες αριθμούς τους, ωστόσο τα ονόματα έχουν καλυφθεί για ευνόητους λόγους.

**Driver Duo α/α Assignment And Timeline Overview**

Duo α/α	Date	Planned ToA	Driver 1 α/α	Driver 2 α/α	Laps made	# of Overt.

**Driver α/α Assignment**

Driver Name	Driver α/α	Quest. & Tag
██████████	01	
██████████	02	
██████████	02	

*Εικόνα 4.22* Το φύλλο ορισμού των ζευγών των οδηγών και ανάθεσης των αυξόντων αριθμών στους συμμετέχοντες.

Η διαδικασία των μετρήσεων για το κάθε ζεύγος ξεκινούσε με την άφιξη των εθελοντών στο σημείο εκκίνησης του πειράματος. Εκεί, ο κάθε οδηγός λάμβανε ένα ερωτηματολόγιο και ένα μικρό δώρο, ως αναμνηστικό για τη συνεισφορά του στο επιστημονικό πείραμα. Προτιμήθηκε να οδηγεί ο κάθε εθελοντής στο δικό του όχημα, επειδή

έτσι θα ένιωθε πιο άνετα σε σχέση με το να χρησιμοποιούσε για πρώτη φορά κάποιο όχημα που θα ήταν αποκλειστικά του πειράματος. Ως εκ τούτου, τα όργανα συλλογής δεδομένων έπρεπε να μεταφέρονται από το ένα όχημα στο άλλο κάθε φορά που ένα ζεύγος οδηγών έφευγε και ερχόταν το επόμενο.

Όσο η ερευνητική ομάδα ασχολούνταν με την τοποθέτηση των οργάνων συλλογής δεδομένων στα δύο οχήματα, οι εθελοντές καλούνταν να συμπληρώσουν και να παραδώσουν το ερωτηματολόγιο. Η μορφή του ερωτηματολογίου απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.23*. Παρείχε στους ερευνητές πληροφορίες, μέσα από τις οποίες επιχειρούνταν να σκιαγραφηθεί το οδηγικό προφίλ του εκάστοτε εθελοντή, καθώς και πληροφορίες δημογραφικής φύσης, με τις οποίες θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα των προσπεράσεων και σε ενδεχόμενες συγκριτικές μελέτες μεταξύ των φύλλων ή των ηλικιών.

**ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ**

α/α-Οδηγού: .....  
 Ημερομηνία: .....  
 Κατοχή έξιπνου κινήου:

**A. Γενικά Στοιχεία Συμμετέχοντα:**

1. Ηλικία: ..... ετών  
 2. Φύλο:  Άντρας  Γυναίκα  
 3. Σας αρέσει η οδήγηση;  Ναι  Όχι

**B. Οδική Εμπειρία Συμμετέχοντα:**

1. Πόσα χρόνια έχετε το δίπλωμα οδήγησης; ..... Χρόνια  
 2. Πόσα χρόνια οδηγείτε; ..... Χρόνια  
 3. Πόσες ημέρες οδηγείτε την εβδομάδα σε αστικό περιβάλλον;  
 1  2  3  4  5  6  7  
 Λιγότερες ..... ημέρες κατά τη διάρκεια ενός έτους  
 4. Πόσα χιλιόμετρα διανύετε την εβδομάδα σε αστικό περιβάλλον;  
 <20  20-50  50-100  100-150  >150  
 5. Πόσες ημέρες οδηγείτε το μήνα σε υπεραστικό περιβάλλον;  
 1  2  3  4  5  6  7  
 Λιγότερες ..... ημέρες κατά τη διάρκεια ενός έτους  
 6. Πόσα χιλιόμετρα διανύετε το μήνα σε υπεραστικό περιβάλλον;  
 <20  20-50  50-100  100-150  >150

**Γ. Οδική Συμπεριφορά Συμμετέχοντα:**

1. Τηρείτε τα όρια ταχύτητας κατά την οδήγηση σε αστικό περιβάλλον;  
 καθόλου  λίγο  αρκετά  πολύ  πάρα πολύ  
 2. Τηρείτε τα όρια ταχύτητας κατά την οδήγηση σε υπεραστικό περιβάλλον;  
 καθόλου  λίγο  αρκετά  πολύ  πάρα πολύ  
 3. Θεωρείτε ότι γενικά τα όρια ταχύτητας σε υπεραστικό περιβάλλον είναι σωστά;  
 καθόλου  λίγο  αρκετά  πολύ  πάρα πολύ  
 4. Κατά τη διαδικασία προσπέρασης άλλου οχήματος σε υπεραστικό περιβάλλον οδού υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες υπερβαίνετε το όριο ταχύτητας;  
 καθόλου  λίγες  αρκετές  πολλές  πάρα πολλές

**Δ. Ιστορικό Οδικών Συμβάντων Συμμετέχοντα:**

1. Πόσες φορές έχετε λάβει πρόστιμο, για υπέρβαση των ορίων ταχύτητας;  
 0  1  2  3  >3  
 2. Σε πόσα ατυχήματα έχετε εμπλακεί ως οδηγός;  
 • Με υλικές ζημιές μόνο:  
 0  1  2  3  >3  
 • Με παθόντες:  
 0  1  2  3  >3

Εικόνα 4. 23 Το ερωτηματολόγιο που συμπλήρωναν οι εθελοντές οδηγοί.

Έπειτα, τα u-blox ενεργοποιούνται από τις αντίστοιχες ηλεκτρονικές συσκευές και ξεκινούσαν να λαμβάνουν σήματα GPS και να καταγράφουν τα δεδομένα. Από τη στιγμή που η καταγραφή με τα u-blox ενεργοποιούνταν έπρεπε να παρήλθουν δέκα λεπτά, προτού το σύστημα προσδιορισμού θέσης να μπορέσει να θεωρηθεί έτοιμο προς χρήση. Ο χρόνος αναμονής αυτός είχε να κάνει με την τεχνική RTK που θα εφαρμοζόταν αργότερα και συγκεκριμένα αφορούσε στην ανάγκη για σωστή επίλυση του προβλήματος ασάφειας φάσης.

Την ολιγόλεπτη αυτή αναμονή εκμεταλλευόταν η ερευνητική ομάδα για να εξηγήει στους οδηγούς τι έπρεπε να κάνουν. Γενικά, η παροχή πληροφοριών στους οδηγούς σχετικά με το πείραμα ήταν δίκικο μαχαίρι. Από τη μια πλευρά, όσα περισσότερα γνώριζαν οι οδηγοί σχετικά με το σκοπό και τα αναμενόμενα ευρήματα του πειράματος, καθώς και με το ποια οδηγική συμπεριφορά θεωρούνταν “ιδεατή”, τόσο πιο “καλές” θα ήταν οι προσπεράσεις που θα εκτελούσαν και θα έρχονταν να επιβεβαιώσουν τα ερευνητικά ερωτήματα. Όμως με αυτήν την πρακτική, τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν θα ήταν αμφιβόλου ποιότητας, αφού πιθανότατα δεν θα ήταν αμερόληπτα. Επίσης, θα καταστρατηγούνταν σε μεγάλο βαθμό η τυχαιότητα που θα εισήγαγε στα τελικά αποτελέσματα η εξατομικευμένη οδηγική συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά, αν στους εθελοντές παρέχονταν υπερβολικά λίγες πληροφορίες υπήρχε ο κίνδυνος να εκτελέσουν τις προσπεράσεις με τρόπο μη συμβατό με το σενάριο που εξεταζόταν στο συγκεκριμένο πείραμα. Ως συνέπεια αυτού, οι προσπεράσεις αυτές δεν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό αναζητήθηκε το σημείο συμβιβασμού και διαμορφώθηκαν με μεγάλη αυστηρότητα οι οδηγίες που θα δίνονταν κάθε φορά στους οδηγούς. Σημειώνεται, πως στη συντριπτική τους πλειοψηφία οι εθελοντές που συμμετείχαν στο πείραμα δεν ήταν εξοικειωμένοι με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η κρίσιμη οδηγία που δόθηκε είχε να κάνει με το σενάριο του πειράματος. Δεδομένου πως το αντικείμενο της έρευνας είχε να κάνει με την προσπέραση σε επαρχιακή οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας, οι οδηγοί έπρεπε να αγνοήσουν το ότι θα κινούνταν στην ασφάλεια του αυτοκινητόδρομου και να έχουν στο μυαλό τους, πως η μεσαία λωρίδα ουσιαστικά αντιπροσώπευε τη λωρίδα των αντίθετα κινούμενων οχημάτων. Συνεπώς, τους ζητήθηκε να μην παραμένουν πολλή ώρα στη μεσαία λωρίδα και να επανέρχονται στη δεξιά λωρίδα σαν να ανέμεναν, πως ανά πάσα στιγμή θα εμφανιζόταν κάποιο όχημα στην αντίθετη κατεύθυνση. Με άλλα λόγια, οι προσπεράσεις έπρεπε να πραγματοποιούνται γρήγορα, όχι όμως βιαστικά.

Επιπλέον, δόθηκε πολύ μεγάλη έμφαση στο ότι η ασφάλεια των συμμετεχόντων και των υπόλοιπων χρηστών της οδού αποτελούσε κάθε στιγμή τη σημαντικότερη προτεραιότητα. Ως εκ τούτου, οι οδηγοί παρακινήθηκαν να μην ξεκινήσουν κάποιον ελιγμό προσπέρασης αν για οποιοδήποτε λόγο δε νιώθουν σίγουροι και στην περίπτωση που προέκυπτε κάποια αμφιβολία κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής του, να μη διστάσουν να ματαιώσουν την ολοκλήρωσή του.

Τέλος, οι οδηγοί ενημερώθηκαν, πως θα προσομοιώνονταν δύο διακριτά σενάρια προσπέρασης. Και στα δύο σενάρια το όχημα που προσπερνούνταν έπρεπε να κινείται με σταθερή ταχύτητα, ενώ εξετάστηκαν αποκλειστικά επιταχυνόμενες προσπεράσεις. Στις προσπεράσεις αυτές, το πίσω όχημα κινούνταν με την ίδια ταχύτητα με το μπροστινό



και επαρκώς κοντά σε αυτό. Ύστερα, ξεκινώντας τον ελιγμό, το πίσω όχημα επιτάχυνε ελεύθερα, έως ότου έπιανε ταχύτητα που ήταν κατά 20km/h μεγαλύτερη από την ταχύτητα του μπροστινού οχήματος. Στη συνέχεια και έως ότου ολοκλήρωνε τον ελιγμό, το πίσω όχημα έπρεπε να διατηρήσει σταθερή την ταχύτητά του. Στο πρώτο σενάριο που προσομοιώθηκε, το όχημα που προσπερνούνταν έπρεπε να κινείται με 70km/h, ενώ στο δεύτερο σενάριο έπρεπε να κινείται με 90km/h. Συνεπάγωγα, οι μέγιστες ταχύτητες κίνησης του οχήματος που προσπερνούσε περιοριζόνταν σε 90km/h και 110km/h αντίστοιχα. Στους οδηγούς τονίστηκε ιδιαίτερα, πως η ακριβής τήρηση αυτών των ταχυτήτων δεν ήταν αυτοσκοπός, αλλά πως μια ακρίβεια  $\pm 5\text{km/h}$  ήταν ικανοποιητική. Αυτή η υποχώρηση έγινε, επειδή υπήρχαν φόβοι πως οι οδηγοί από υπερβάλλοντα ζήλο θα επικεντρώνονταν μόνο στο να τηρήσουν πιστά τις επιθυμητές ταχύτητες. Έτσι, ενδεχομένως θα τους δημιουργούνταν άγχος κατά την οδήγηση, ίσως εστίαζαν το βλέμμα τους στο ταχύμετρο, με αποτέλεσμα να πολλαπλασιαζόταν ο κίνδυνος ατυχήματος λόγω απόσπασης της προσοχής από το δρόμο και γενικά μάλλον θα αλλοιωνόταν η αυθόρμητη οδηγική συμπεριφορά, η οποία αποτελούσε και τον ακρογωνιαίο λίθο του οδικού πειράματος.

Ύστερα και από αυτή τη σύσκεψη μεταξύ της ερευνητικής ομάδας και των οδηγών ξεκινούσε η οδήγηση. Τουλάχιστον ένα άτομο από την ερευνητική ομάδα, ο συντονιστής, ήταν συνέχεια μέσα στα οχήματα μαζί με τους οδηγούς. Αν τα άτομα ήταν δύο, τότε μοιράζονταν στα δύο οχήματα, ειδάλως ο ένας διάλεγε τυχαία σε ποιο όχημα θα εισερχόταν. Τα μέλη της ερευνητικής ομάδας κάθονταν πάντα στη θέση του συνοδηγού και ο συντονιστής συμπλήρωνε το ειδικό πρωτόκολλο καταγραφής F.R.O.U.D.E.. Το πρωτόκολλο αυτό αναπτύχθηκε για τις ανάγκες του πειράματος, περιείχε πληροφορίες που καταγράφονταν επιτόπου στο πείραμα και σε πραγματικό χρόνο και βοήθησε σε πολύ μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Συγκεκριμένα, για την κάθε προσπέραση καταγραφόταν ο αύξοντας αριθμός του οδηγού που την πραγματοποιούσε (στήλη "Hunter"), ο α/α του οδηγού που προσπερνούνταν (στήλη "Bait"), ο χρόνος εκτέλεσης του ελιγμού με ακρίβεια λεπτού (στήλη "Time"), καθώς και σε ποια ζώνη προσπέρασης έγινε (στήλη "Zon"). Στην *Εικόνα 4.24* απεικονίζεται το πρωτόκολλο F.R.O.U.D.E., στο οποίο κάθε γραμμή αφορούσε και σε μια προσπέραση. Στο πάνω μέρος του εισάγονταν κάποια μεταδεδομένα που παρείχαν επιπλέον πληροφορίες για το εκάστοτε ζεύγος οδηγών. Στο κάτω μέρος του υπήρχαν γενικές οδηγίες για τη συμπλήρωση των διαφόρων στηλών. Γενικά, συμπληρωνόταν ένα πρωτόκολλο F.R.O.U.D.E. για κάθε ζεύγος οδηγών που συμμετείχαν στο πείραμα.

### F.R.O.U.D.E. (Field Rating Of Unbiased Driving Experiment)

#### Driver Duo Metadata

Date		Rover 1 Brand	
A.S.Time		Rover 1 Model/Year	
Duo a/a		Rover 2 Brand	
Weather		Rover 2 Model/Year	
R. 1 Instr.		R. 2 Instr.	

#### Co-driver Overtaking Data Recording Protocol

Overtaking ID	Hunter	Bait	Time	Start UTC	Finish UTC	Zon	Com

#### Instructions

Date	dd-mm-yy	Rover 1 Brand	e.g. Citroen
Actual Start Time	hh:mm (UTC=Greece Time - 3)	Rover 1 Model/Year	e.g. Xsara/2001
Duo a/a	αξόντας αριθμός ζευγαριού	Rover 2 Brand	e.g. Citroen
Weather	Mild Rain / Strong Rain / Sun...	Rover 2 Model/Year	e.g. Xsara/2001
R. 1 Instr.	GPS Instrument in Rover 1	R. 2 Instr.	GPS Instr. in R. 2

<b>Overtaking ID</b>	mmdd.Duo a/a.7 for 70km/h or 9.Overtaking a/a referring to specific Duo
<b>Hunter</b>	driver ID of the driver that makes the overtaking
<b>Bait</b>	driver ID of the driver that is being passed
<b>Time</b>	hh:mm (Field log of the overtaking execution time)
<b>Start UTC</b>	hh:mm:ss (UTC - 2 sec at the beginning of the overtaking)
<b>Finish UTC</b>	hh:mm:ss (UTC + 2 sec at the completion of the overtaking)
<b>Zon=Zone</b>	1, 2 or 3, depending the zone that the overtaking takes place
<b>Com=Comment</b>	1 - when bait the rover speed was not constant 2 - when hunter the posted speed limit was breached 3 - when hunter the overtaking was flying and not accelerative 4 - aborted or overtaking with prolonged hesitation onto the lane line 5 - bad test subject behavior and/or not cooperation to the instructions 6 - part of or the whole overtaking done under a bridge or on a road curve

Εικόνα 4.24 Το πρωτόκολλο καταγραφής F.R.O.U.D.E. που συμπληρωνόταν κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος.

Για όλη τη διάρκεια της οδήγησης υπήρχε επικοινωνία μεταξύ των δύο οχημάτων. Η επικοινωνία αυτή πραγματοποιούνταν τηλεφωνικά, με τα δύο κινητά να είναι σε ανοικτή ακρόαση. Με αυτόν τον τρόπο, τα μέλη της ερευνητικής ομάδας ήταν σε θέση να συμβουλεύουν, να κατατοπίζουν και να βοηθούν τους εθελοντές οδηγούς σε πραγματικό χρόνο, ανταποκρινόμενοι ταχύτατα στις καταστάσεις που εγείρονταν. Παράλληλα, με τη χρήση της ανοικτής ακρόασης δεν υπονομευόταν στο ελάχιστο η οδική ασφάλεια ακόμα και να στο ένα όχημα επέβαινε μόνο ο εθελοντής οδηγός του. Η εμπειρία έδειξε, πως παρόλες τις συσκέψεις στο σημείο εκκίνησης και τις επεξηγήσεις που δίνονταν από πριν στους οδηγούς, ήταν η χρήση της ενδοεπικοινωνίας που ουσιαστικά εξασφάλισε ότι η οδηγική συμπεριφορά ήταν η αναμενόμενη. Επιπρόσθετα, χάριν στην επικοινωνία μεταξύ της ομάδας κατά την οδήγηση, επιτεύχθηκε πολύ μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της όλης διαδικασίας, κάτι που μεταφράστηκε σε λιγότερους πραγματοποιημένους γύρους της διαδρομής ανά οδηγό. Συμπερασματικά, η ύπαρξη της ενδοεπικοινωνίας στα δύο οχήματα εξασφάλισε την επιτυχία του οδικού πειράματος.

Η τυπική διαδικασία που εφαρμόστηκε κατά την οδήγηση στη διαδρομή του πειράματος ήταν η ακόλουθη. Αρχικά, τα δύο οχήματα εισέρχονταν στον αυτοκινητόδρομο και επιτάχυναν μέχρι να πιάσουν την κατώτατη επιτρεπόμενη ταχύτητα του σεναρίου που προσομοιώνονταν. Οι οδηγοί φρόντιζαν να παραμένουν σε “απόσταση βολής” ο ένας από τον άλλο, να είναι δηλαδή όσο κοντά έπρεπε, για να μπορεί να πραγματοποιηθεί ελιγμός προσπέρασης. Ο συντονιστής της ερευνητικής ομάδας ενημέρωνε περίπου δέκα δευτερόλεπτα πριν την άφιξη στην εκάστοτε ζώνη προσπέρασης, ώστε οι οδηγοί να προετοιμαστούν. Ύστερα, είχε το νου του να δει πότε το όχημα που βρισκόταν πίσω θα εισερχόταν στη ζώνη προσπέρασης και άφηνε νοητά να περάσουν τέσσερα δευτερόλεπτα. Με αυτόν τον τρόπο προλάβαινε να αποκατασταθεί η ποιότητα του σήματος GPS, η οποία πιθανότατα θα είχε υποβαθμιστεί από την επίδραση των εμποδίων που οριοθετούσαν την αρχή της κάθε φάσης (άνω διαβάσεις, ταμπέλες). Έπειτα, ο συντονιστής ειδοποιούσε τους οδηγούς λέγοντας, πως όποτε ήταν έτοιμοι θα μπορούσαν να ξεκινήσουν την προσπέραση.

Σε όλη τη διάρκεια του ελιγμού της προσπέρασης, τα μέλη της ερευνητικής ομάδας επέβλεπαν τις ταχύτητες κίνησης των οχημάτων, ώστε αν υπήρχε μεγάλη απόκλιση από τις επιθυμητές τιμές να σημειωνόταν στο πρωτόκολλο F.R.O.U.D.E (στήλη “Com”). Με την ολοκλήρωση του ελιγμού και την πλήρη ευθυγράμμιση του οχήματος που προσπερνούσε με τη λωρίδα κυκλοφορίας, ο οδηγός επιβράδυνε απότομα μέχρι να πιάσει την κατώτατη επιτρεπόμενη ταχύτητα του σεναρίου. Την ίδια στιγμή, ο οδηγός του πίσω (πλέον) οχήματος έβρισκε την ευκαιρία και πλησίαζε με τη σειρά του σε απόσταση βολής, ώστε να είναι σε θέση να προσπεράσει με την πρώτη ευκαιρία που θα παρουσιαζόταν. Όταν το μπροστά όχημα έπιανε την κατώτατη επιτρεπόμενη ταχύτητα ενημέρωνε την ομάδα πως ήταν έτοιμος και η διαδικασία ξεκινούσε από την αρχή, αλλά με αντίστροφους ρόλους αυτή τη φορά.

Η παραπάνω διαδικασία της συνεχούς εναλλαγής των ρόλων εξασφάλιζε, πως σε κάθε γύρο θα πραγματοποιούνταν κάθε φορά ο μέγιστος δυνατός αριθμός προσπεράσεων. Έτσι, ο εκάστοτε εθελοντής οδηγός πραγματοποιούσε μια προσπέραση για κάθε δύο επιτυχημένες προσπεράσεις που πραγματοποιούνταν από το ζεύγος. Εξαιτίας αυτού, οι οδηγοί έβρισκαν την ευκαιρία και ηρεμούσαν για μερικά δευτερόλεπτα στο χρονικό διάστημα που προσπερνούσαν και προετοιμάζονταν για την επόμενη προσπέραση που θα πραγματοποιούσαν. Αυτό ήταν πολύ σημαντικό να γίνεται, καθώς η πραγματοποίηση πολλών διαδοχικών προσπεράσεων σε μικρό χρονικό διάστημα ήταν ψυχοφθόρα διαδικασία. Απαιτούσε δε απόλυτη συγκέντρωση τόσο για να μην προκληθεί κάποιο ατύχημα όσο και για να τηρηθούν οι περιορισμοί του ίδιου του πειράματος.

Η διαδικασία αυτή συνεχιζόταν μέχρι να εξαντληθεί το μήκος της διαθέσιμης ζώνης προσπέρασης. Όταν ο συντονιστής έβλεπε πως η επόμενη προσπέραση δεν θα προλάβαινε να ολοκληρωθεί, ενημέρωνε τους οδηγούς για να μην την πραγματοποιήσουν μάταια. Όταν τα οχήματα διέρχονταν από το σημείο πέρατος της ζώνης προσπέρασης, ο συντονιστής ανακοίνωνε πως δεν θα πραγματοποιούνταν άλλες προσπεράσεις μέχρι την επόμενη ζώνη. Στα τμήματα της διαδρομής που βρισκότουσαν ανάμεσα στις ζώνες προσπέρασης οι οδηγοί κινούνταν με την κατώτατη επιτρεπόμενη ταχύτητα του εκάστοτε σεναρίου και σε σχετικά κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Έτσι, ήταν έτοιμοι να εκτελέσουν ελιγμό προσπέρασης με το που εισέρχονταν στην επόμενη ζώνη προσπέρασης.

Φτάνοντας στο μετωπικό σταθμό διοδίων, οι οδηγοί χρησιμοποιούσαν μια από τις λωρίδες που προορίζονται για πληρωμή με ηλεκτρονικό πομποδέκτη. Στη συνέχεια και αμέσως με το που εξέρχονταν από το σταθμό διοδίων, οι οδηγοί πραγματοποιούσαν στάθμευση στη Λωρίδα Έκτακτης Ανάγκης για οκτώ λεπτά. Αυτό ήταν επιβεβλημένο για να είναι σίγουρο, πως θα μπορούσε να επιλυθεί το πρόβλημα των ασαφειών φάσης στη μετέπειτα εφαρμογή της τεχνικής RTK. Κατόπιν, συνεχιζόταν η οδήγηση εκ νέου και η διαδικασία των προσπεράσεων ξεκινούσε από την αρχή για το υπόλοιπο της διαδρομής.

Οι οδηγοί εξέρχονταν από τον Αυτοκινητόδρομο 6 στο ΣΕΑ Μεσογείων και πραγματοποιούσαν αναστροφή, έτοιμοι για τον επόμενο γύρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το κάθε ζεύγος οδηγών εκτελούσε τουλάχιστον δύο γύρους, έναν για το κάθε σενάριο. Έτσι, στον πρώτο γύρο το εύρος των επιτρεπτών ταχυτήτων ήταν 70-90km/h και στο δεύτερο 90-110km/h.

Όταν ολοκληρώνόταν και ο τελευταίος τους γύρος, οι οδηγοί επέστρεφαν στο σημείο εκκίνησης και στάθμευαν τα οχήματά τους. Έπειτα, έπρεπε να παρέλθουν δέκα λεπτά προτού απενεργοποιηθούν τα όργανα συλλογής δεδομένων. Αυτή η απαίτηση είχε επίσης να κάνει με την επιτυχημένη επίλυση του προβλήματος των ασαφειών φάσης κατά τη μετέπειτα εφαρμογή της τεχνικής RTK. Στη συνέχεια, τα όργανα μπορούσαν να απενεργοποιηθούν και να αφαιρεθούν από τα οχήματα. Τέλος, για λόγους ασφαλείας και αναγνωρίζοντας την καίρια σημασία της ύπαρξης αντιγράφων ασφαλείας, η ερευνητική ομάδα φρόντιζε να αντιγράψει αμέσως τα δύο αρχεία με τις καταγραφές, από το smartphone και το tablet στο laptop. Έτσι, υπήρχε εξασφάλιση από κάποια ανεπιθύμητη απώλεια δεδομένων.

Οι οδηγοί, έχοντας ολοκληρώσει με επιτυχία τις υποχρεώσεις τους, αποδεσμεύονταν. Πλέον, η ερευνητική ομάδα έστρεψε την προσοχή της στο επόμενο ζεύγος οδηγών και η διαδικασία επαναλαμβάνόταν από την αρχή.

#### 4.1.4 Εκτέλεση του οδικού πειράματος

Το οδικό πείραμα δεν πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου σε μια ημέρα, αλλά αντίθετα επιμερίστηκε σε έξι ημερομηνίες. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 31 Μαΐου, 14 Ιουνίου, 15 Ιουνίου, 16 Ιουνίου, 21 Ιουνίου και 23 Ιουνίου 2021. Η ώρα εκτέλεσης του πειράματος αποτέλεσε προϊόν προβληματισμού. Εν τέλει, αποφασίστηκε οι μετρήσεις να πραγματοποιηθούν όσο πιο αργά το βράδυ ήταν δυνατόν και ως εκ τούτου η ώρα εκκίνησης για την κάθε ημέρα ορίστηκε στις 22.00. Η ώρα λήξης του πειράματος ήταν συνάρτηση του αριθμού των γύρων που εκτελούνταν κάθε φορά. Η πιο ακραία ώρα λήξης που παρατηρήθηκε ήταν στις 02.30. Παρόλα αυτά, μια ενδεικτική διάρκεια ήταν περίπου δύομισι ώρες για τις περισσότερες ημέρες μετρήσεων.

Ο λόγος που το πείραμα προτιμήθηκε γίνει τη νύχτα και όχι κατά τη διάρκεια της ημέρας είχε να κάνει με τους κυκλοφοριακούς φόρτους. Το οδικό τμήμα του Αυτοκινητόδρομου 6 στο οποίο πραγματοποιήθηκε το οδικό πείραμα αποτελεί τη μοναδική οδική σύνδεση της μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας με το Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών.

Ως εκ τούτου αποτελεί ένα εξαιρετικά πολυσύχναστο οδικό τμήμα στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Για να μπορούσαν, όμως, να εκτελούνται διαδοχικοί ελιγμοί προσπέρασης, η μεσαία λωρίδα θα έπρεπε να παραμένει άδεια για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα. Ύστερα από τη διενέργηση δοκιμαστικών επισκέψεων και μετρήσεων στο συγκεκριμένο κομμάτι, παρατηρήθηκε πως κατά τις πρώτες νυχτερινές ώρες οι συνθήκες ήταν ιδανικές για την εκτέλεση του πειράματος. Μάλιστα, όσο κυλούσε η ώρα προς την ώρα λήξης τόσο μειώνονταν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και το πείραμα γινόταν με μεγαλύτερη άνεση.

Ο χρόνος που απαιτούνταν για την ολοκλήρωση ενός γύρου της διαδρομής δεν ήταν σταθερός και δε θα είχε νόημα να υπολογιστεί με ακρίβεια. Εντούτοις, ως ενδεικτικές τιμές για τα δύο σενάρια μπορούν να θεωρηθούν τα 18min (σενάριο με ταχύτητες 90-110km/h) και τα 22min (σενάριο με ταχύτητες 70-90km/h).

Συνολικά, στο πείραμα συμμετείχαν 15 εθελοντές οδηγοί, εκ των οποίων οι 9 ήταν άνδρες και οι 6 γυναίκες. Όσον αφορά στην ηλικία, στον ακόλουθο Πίνακα 4.2 φαίνονται τα πλήρη στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος των εθελοντών οδηγών.

**Πίνακας 4.2** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος των εθελοντών οδηγών ως προς την ηλικία τους.

Μέση Τιμή (έτη)	29.2
Διάμεσος (έτη)	25
Τυπική Απόκλιση (έτη)	11.8
Ελάχιστη Τιμή (έτη)	21
Μέγιστη Τιμή (έτη)	58

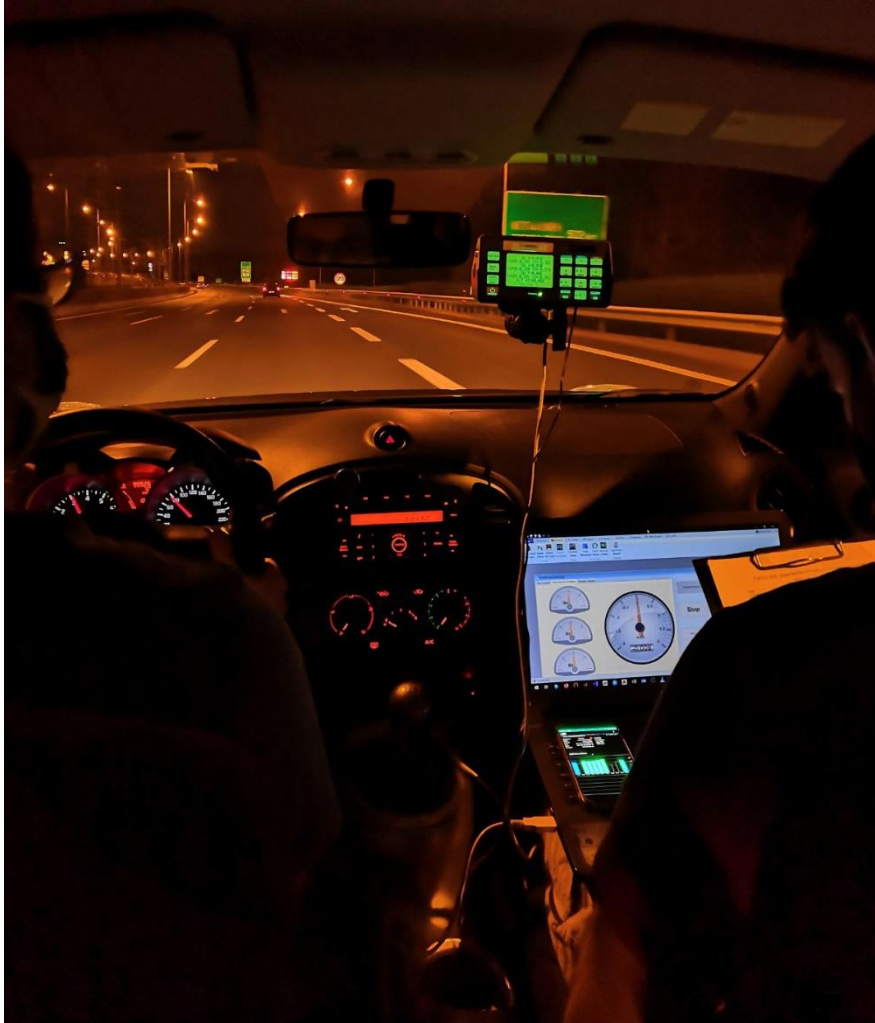
Αντίστοιχα, στον Πίνακα 4.3 φαίνονται τα πλήρη στατιστικά χαρακτηριστικά του ίδιου δείγματος, αναφορικά με τα πραγματικά χρόνια οδηγικής εμπειρίας τη στιγμή της εκτέλεσης του πειράματος. Αυτό το νούμερο δεν πρέπει να συγχέεται με τα πλασματικά χρόνια οδηγικής εμπειρίας, τα οποία ξεκινάνε να ισχύουν από τη στιγμή που εκδίδεται το δίπλωμα οδήγησης κάποιου.

**Πίνακας 4.3** Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος των εθελοντών οδηγών ως προς τα πραγματικά χρόνια οδηγικής εμπειρίας.

Μέση Τιμή (έτη)	10.0
Διάμεσος (έτη)	5
Τυπική Απόκλιση (έτη)	11.0
Ελάχιστη Τιμή (έτη)	2
Μέγιστη Τιμή (έτη)	42

Στην Εικόνα 4.25 απεικονίζεται το εσωτερικό του ενός οχήματος τη στιγμή που διεξαγόταν το πείραμα. Στο εσωτερικό του ανεμοθώρακα, με την πράσινη φωσφορίζουσα οθόνη, διακρίνεται το Vericom VC4000RG, μαζί με το καλώδιο τροφοδοσίας (μαύρο λεπτό) και το καλώδιο σύνδεσης USB (γκρι παχύ). Στη θέση του συνοδηγού καθόταν ένα μέλος της ερευνητικής ομάδας, ο οποίος εκτελούσε παράλληλα έξι εργασίες, αν και όχι όλες ταυτόχρονα. Πρώτον, χειριζόταν το laptop, το οποίο συνδεόταν με το VC4000RG μέσω του καλωδίου USB. Δεύτερον, χειριζόταν το smartphone και επόπτευε τις συνδέσεις με τους δορυφόρους GPS. Το smartphone φαίνεται στερεωμένο πάνω στο πληκτρολόγιο του laptop, με την εφαρμογή RTKGPS+ ανοικτή. Τρίτον, κατέγραφε με στυλό τις απαραίτητες πληροφορίες στο πρωτόκολλο F.R.O.U.D.E., το οποίο στηριζόταν σε μια πινακίδα γραφής A4 και διακρίνεται εν μέρει στα δεξιά της εν λόγω εικόνας. Τέταρτον, επόπτευε από τα παράθυρα και το δεξιό καθρέπτη για να δει

πότε το πίσω όχημα θα εισερχόταν στην εκάστοτε ζώνη προσπέρασης. Πέμπτον, παρατηρούσε την οδηγική συμπεριφορά των δύο οδηγών (ταχύτητα κίνησης, αποστάσεις μεταξύ τους και στιγμή έναρξης επιβράδυνσης του μπροστινού οχήματος ύστερα από την ολοκλήρωση του ελιγμού) και έκανε σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις παρεμβάσεις. Έκτον, ήταν σε διαρκή προφορική επικοινωνία με τους δύο οδηγούς και όποιο άλλο μέλος της ερευνητικής ομάδας, μέσω τηλεφωνικής κλήσης από το smartphone που πραγματοποιούνταν σε ανοικτή ακρόαση.



*Εικόνα 4.25* Άποψη της διάταξης των οργάνων στο εσωτερικό ενός οχήματος του πειράματος κατά τη διάρκεια μιας καταγραφής.

Στην *Εικόνα 4.26* απεικονίζεται το οπτικό πεδίο από τη θέση του συνοδηγού, κατά τη διάρκεια ενός σύντομου διαλείμματος. Στην εν λόγω εικόνα διακρίνονται καθαρά το πρωτόκολλο F.R.O.U.D.E., το Vericom VC4000RG και το smartphone με την εφαρμογή RTKGPS+ σε λειτουργία να λαμβάνει δεδομένα.



*Εικόνα 4.26 Το οπτικό πεδίο του μέλους της ερευνητικής ομάδας που καθόταν στη θέση του συνοδηγού και ο εξοπλισμός που έπρεπε να διαχειρίζεται.*

#### 4.1.5 Προκύπτων δείγμα προσπεράσεων

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν συνολικά 26 γύροι της διαδρομής του πειράματος. Σε αυτούς τους γύρους εκτελέστηκαν και καταγράφηκαν συνολικά 250 πλήρεις ελιγμοί προσπέρασης μεταξύ των εκάστοτε δύο οχημάτων του πειράματος.

Όλες οι προσπεράσεις αυτές ήταν επιταχυνόμενες και μονές, δηλαδή προσπερνούσαν μόνο ένα όχημα κάθε φορά και μόνο το όχημα του πειράματος. Περιπτώσεις κατά τις οποίες χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί προσπέραση αργά κινούμενων οχημάτων (π.χ. λεωφορεία) δε λήφθηκαν καθόλου υπόψη. Επιπλέον, περιπτώσεις κατά τις οποίες ακριβώς μπροστά από το όχημα που προσπερνούταν υπήρχε άλλο όχημα και επομένως η προσπέραση θεωρήθηκε διπλή, επίσης αγνοήθηκαν εντελώς. Τέλος, προσπεράσεις που ξεκίνησαν αλλά στην πορεία ματαιώθηκαν για τον οποιοδήποτε λόγο (aborted) δε συμπεριλήφθηκαν στο παραπάνω νούμερο.

Από τις 250 συνολικές προσπεράσεις, οι 129 (51.6%) πραγματοποιήθηκαν στο πρώτο σενάριο, δηλαδή επιταχύνοντας από τα 70km/h έως και τα 90km/h. Οι υπόλοιπες 121

προσπεράσεις (48.4%) πραγματοποιήθηκαν στο δεύτερο σενάριο, δηλαδή επιταχύνοντας από τα 90km/h έως και τα 110km/h.

## 4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το κάθε πακέτο δεδομένων που συλλέχθηκε στο οδικό πείραμα αποτελείται από μια ακολουθία σημείων, τα οποία δεν είναι άλλο από τα στίγματα του GPS που καταγράφονται την κάθε χρονική στιγμή και για το κάθε όχημα. Αν τα σημεία αυτά απεικονιστούν σειριακά σε ένα κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων, αναπαριστούν την τροχιά που ακολούθησε το εκάστοτε όχημα. Το πακέτο αυτό των δεδομένων έχει τη μορφή ενός αρχείου καταγραφής (.log) και δημιουργούνται σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της καταγραφής. Το εκάστοτε αρχείο καταγραφής είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τη λειτουργία του δέκτη GNSS από τον οποίο λαμβάνει δεδομένα. Επομένως, κάθε φορά που ένας δέκτης μεταφερόταν από το ένα όχημα στο άλλο και επανεκκινούνταν, δημιουργούνταν και ένα νέο αρχείο καταγραφής. Συνολικά, για κάθε ζεύγος οδηγών που εκτελούσαν ταυτόχρονα το πείραμα δημιουργούνταν και δύο αρχεία καταγραφής.

Με τη σειρά του, το κάθε αρχείο καταγραφής περιλαμβάνει τις συντεταγμένες από τη συνολική κίνηση που πραγματοποιούσε με το όχημα ο εκάστοτε οδηγός. Άρα λοιπόν, αν η τροχιά που προκύπτει από το εκάστοτε .log file αποτυπωθεί γραφικά, η εικόνα αντιστοιχεί σε τόσους πλήρεις γύρους της διαδρομής του πειράματος, όσους εκτέλεσε κάθε φορά ο εκάστοτε οδηγός. Μάλιστα, επειδή η διαδρομή είναι για κάθε γύρο η ίδια, οι τροχιές των διαφόρων γύρων επικαλύπτονται μερικώς ή ολικώς μεταξύ τους.

Είναι προφανές, πως προτού μπορέσει να πραγματοποιηθεί η ανάλυση των τροχιών, τα δεδομένα από τις καταγραφές πρέπει πρώτα να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία. Η επεξεργασία αυτή διακρίνεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες. Με την ολοκλήρωση της κάθε κατηγορίας η διαδικασία εστιάζει σε όλο και μικρότερο υποσύνολο των δεδομένων που έχουν καταγραφεί, πραγματοποιείται δηλαδή μείωση δεδομένων (data reduction). Συγκεκριμένα, από το επίπεδο της συνολικής οδήγησης ενός οδηγού γίνεται μετάβαση στο επίπεδο της κάθε μιας προσπέρασης και τελικά στο επίπεδο της κάθε επιμέρους φάσης της προσπέρασης.

Αρχικά, εφαρμόζεται η τεχνική RTK, ώστε να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η θέση των οχημάτων και γίνεται μετασχηματισμός του συστήματος αναφοράς των συντεταγμένων των τροχιών. Έπειτα, με μια πρωτογενή μείωση δεδομένων δημιουργείται η βάση δεδομένων των προσπεράσεων και μορφώνονται τα σχετικά διαγράμματα αζιμούθιων για την κάθε μια από αυτές. Τέλος, με μια δευτερογενή μείωση δεδομένων απομονώνονται οι επιμέρους φάσεις της κάθε προσπέρασης και εξάγονται οι ζητούμενες γεωμετρικές και κινηματικές παράμετροι.

Η παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας αναφέρεται και πραγματοποιείται στο κάθε αρχείο καταγραφής ξεχωριστά. Φυσικά, πρέπει να εκτελεστεί επαναληπτικά για όλα τα αρχεία καταγραφής που δημιουργήθηκαν στο οδικό πείραμα. Ωστόσο, επειδή η διαδι-



κασία είναι αλγοριθμική και πανομοιότυπη για όλα τα αρχεία καταγραφής, παρουσιάζεται ως παράδειγμα η εφαρμογή της σε ένα μόνο από αυτά. Όλα τα βήματα αναλύονται με λεπτομέρεια στις ακόλουθες ενότητες.

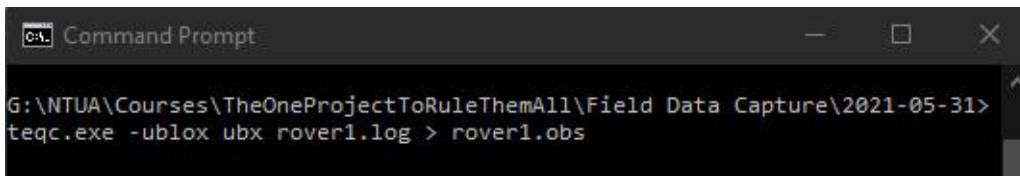
#### 4.2.1 Εφαρμογή της τεχνικής RTK

Το πρώτο βήμα είναι να προσδιοριστούν οι τροχιές των οχημάτων με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται, αν οι καταγραφές θέσης που έδωσαν οι δέκτες GPS διορθωθούν, με βάση τις αντίστοιχες καταγραφές που πραγματοποίησε ο σταθμός αναφοράς στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για τη διόρθωση αυτή, εν γένει, χρησιμοποιείται κάποιο κατάλληλο λογισμικό που δύναται να εφαρμόσει την τεχνική Real Time Kinematics.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το RTKLIB, ένα πακέτο προγραμμάτων ανοικτού κώδικα για τον προσδιορισμό θέσης με GNSS. Το συγκεκριμένο επιλέχθηκε κυρίως επειδή προσφέρει μεγάλη δυνατότητα παραμετροποίησης και μεγάλη ελευθερία ως προς την τεχνική που εφαρμόζεται. Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα είναι, πως αποτελεί ελεύθερο λογισμικό. Η έκδοση που αποκτήθηκε είναι η έκδοση 2.4.2 p11 και από όλα τα προγράμματα που περιλαμβάνονται στο πακέτο χρησιμοποιήθηκε το RTKPOST και το RTKPLOT. Το πρώτο πραγματοποιεί την επεξεργασία σε μη πραγματικό χρόνο, δηλαδή αφού έχει ολοκληρωθεί η συλλογή στοιχείων και το δεύτερο χρησιμεύει στην απεικόνιση των διορθωμένων τροχιών και την εποπτεία ορισμένων δεικτών ποιότητας της επεξεργασίας.

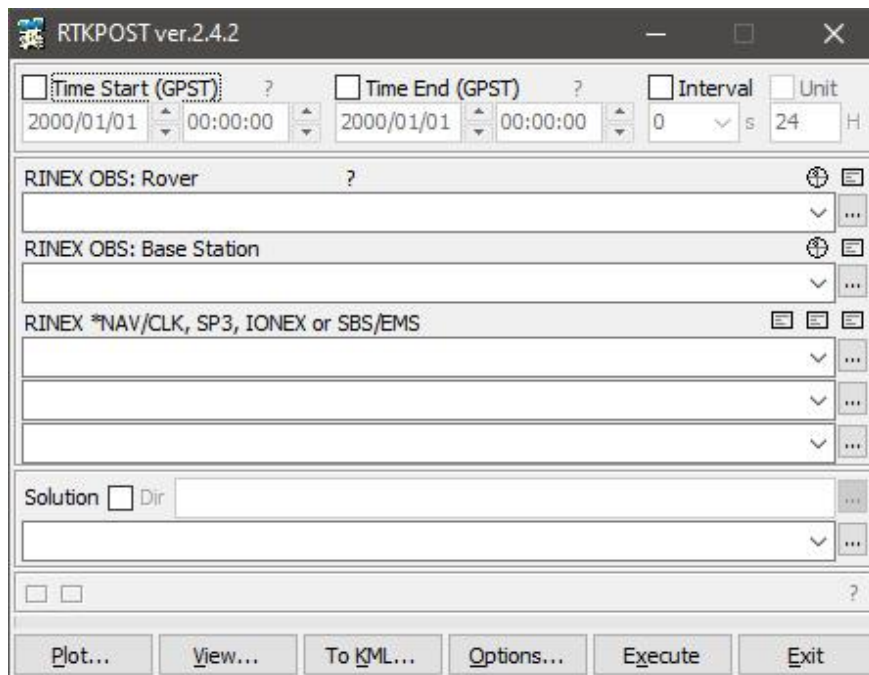
Το RTKPOST δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις καταγραφές θέσης που συλλέχθηκαν από τους δέκτες GNSS κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος, οι οποίες πρέπει να βρίσκονται σε ένα αρχείο με πρότυπο RINEX (observation file, \*.obs). Το πρότυπο RINEX (Receiver INdependent EXchange) είναι ένα πρότυπο ανταλλαγής πηγαίων δεδομένων δορυφορικής πλοήγησης. Δυστυχώς, όμως, τα αρχεία που δημιουργούνται από τους δέκτες GNSS έχουν προτυποποιηθεί διαφορετικό, αφού πρόκειται για απλά αρχεία καταγραφής (log file, \*.log). Επομένως, πριν την εκτέλεση του rtkpost.exe απαιτείται η μετατροπή του αρχείου με τις καταγραφές θέσης.

Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιήθηκε το εκτελέσιμο αρχείο TEQC (Translation, Editing and Quality Check), το οποίο εκτελείται από τη γραμμή εντολών των Windows (Command Prompt, CMD). Έστω ότι το αρχείο καταγραφής ονομάζεται "rover1.log" και το αρχείο που δημιουργείται "rover1.obs". Η εκτέλεση του εκτελέσιμου αρχείου TEQC πραγματοποιήθηκε με την εντολή που φαίνεται στην *Εικόνα 4.27*, αφού πρώτα δόθηκε στη γραμμή εντολών πρόσβαση στο φάκελο εκείνο του δίσκου, στον οποίο βρισκόταν το εκτελέσιμο αρχείο. Σημειώνεται, πως το τελευταίο πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο φάκελο που βρίσκονται και τα αρχεία δεδομένων.



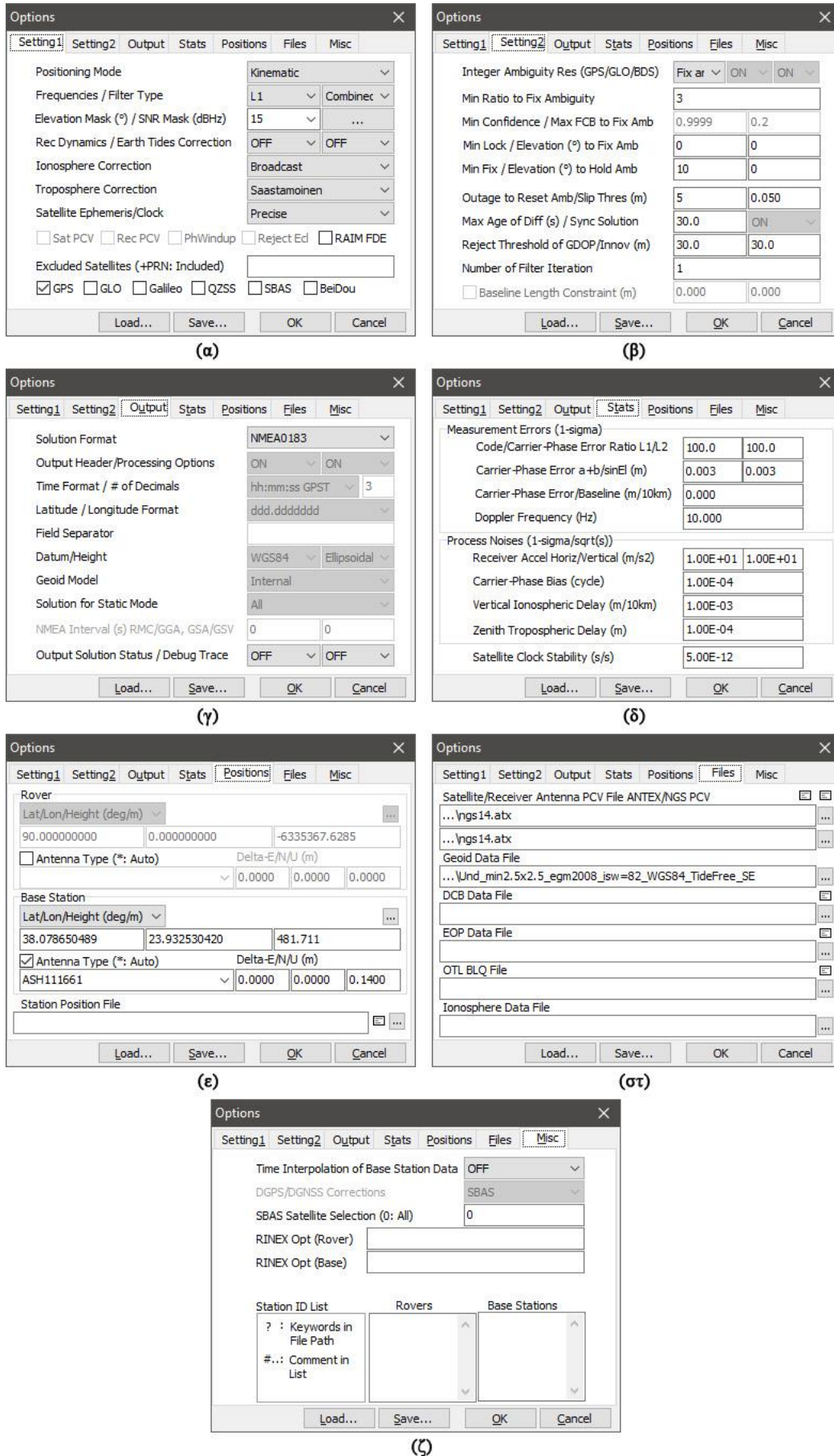
Εικόνα 4.27 Η εντολή εκτέλεσης του εκτελέσιμου αρχείου TEQC στη γραμμή εντολών των Windows.

Με την ολοκλήρωση της μετατροπής του αρχείου στο πρότυπο RINEX, ενεργοποιήθηκε το πρόγραμμα RTKPOST. Το γραφικό περιβάλλον χρήστη απεικονίζεται στην Εικόνα 4.28.



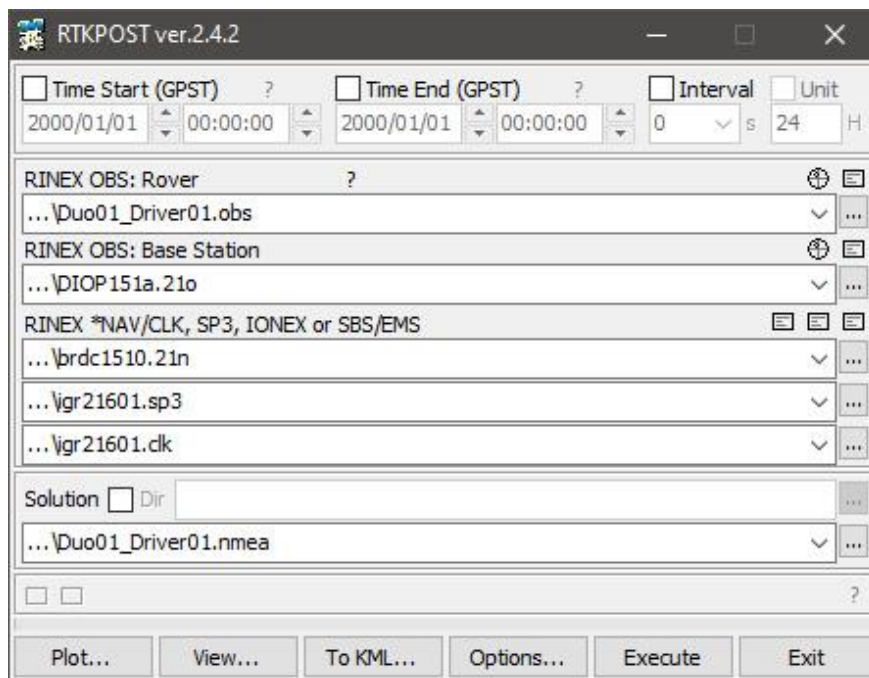
Εικόνα 4.28 Το γραφικό περιβάλλον χρήστη του προγράμματος RTKPOST.

Πρώτα από όλα έπρεπε να καθοριστούν οι παράμετροι της διόρθωσης από τις ρυθμίσεις (“Options”). Το πρόγραμμα, εν γένει, προσφέρει πολλές κατηγορίες παραμέτρων που μπορούν να μεταβληθούν και μπορεί να ανταποκριθεί σε πληθώρα προβλημάτων και απαιτήσεων. Πολλές παράμετροι δε χρειάστηκε να διαφοροποιηθούν για τις ανάγκες της παρούσας επεξεργασίας, επομένως σε εκείνες τις περιπτώσεις οι προεπιλεγμένες τιμές παρέμειναν ως είχαν. Στην Εικόνα 4.29 παρουσιάζονται όλες οι επιμέρους κατηγορίες στην καρτέλα των ρυθμίσεων, μαζί με τις τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωση των καταγραφών. Στην Εικόνα 4.29(ε) διακρίνονται τα στοιχεία της κεραίας στο σταθμό αναφοράς, και συγκεκριμένα ο τύπος και οι ακριβείς συντεταγμένες. Ως σταθμός αναφοράς προτιμήθηκε ο δέκτης στο Κέντρο Δορυφόρων Διόνυσου έναντι αυτού στο Λαμπαδάριο κτίριο, επειδή προσέφερε τη δυνατότητα χειρισμού εξ αποστάσεως.



Εικόνα 4.29 Οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους του RTKPOST για την παρούσα επεξεργασία.

Επιστρέφοντας στην αρχική σελίδα του προγράμματος, συμπληρώθηκαν στα σχετικά πεδία οι ονομασίες των ζητούμενων αρχείων. Αυτές απεικονίζονται στην *Εικόνα 4.30*, όπου στη θέση των αποσιωπητικών (“...”) τοποθετούνταν η διαδρομή του εκάστοτε αρχείου στο δίσκο του υπολογιστή. Στο πεδίο “Rover” αντιστοιχίστηκε το αρχείο με τις μετρήσεις που κατέγραψε ο δέκτης GPS του οχήματος, αφού είχε πρώτα μετατραπεί στο πρότυπο RINEX. Στο πεδίο “Base Station” αντιστοιχίστηκε το αρχείο με τις μετρήσεις που κατέγραψε ο δέκτης GPS του σταθμού αναφοράς, κατά το ίδιο χρονικό διάστημα με τις καταγραφές του οχήματος.



*Εικόνα 4.30* Τα αρχεία εισόδου και το αρχείο εξόδου στο πρόγραμμα RTKPOST.

Ακολουθως, στα τρία επόμενα πεδία αντιστοιχίστηκαν τα αρχεία που περιέχουν διορθώσεις σχετικά με τις τροχιές (ephemerides) των δορυφόρων και τα χρονόμετρα (clocks) των δορυφόρων και των σταθμών του σχηματισμού του GPS. Με τις διορθώσεις αυτές τείνουν να εξαλειφθούν οι συνιστώσες του σφάλματος που σχετίζονται με τις αβεβαιότητες στην ακριβή τοποθεσία των δορυφόρων και με την απόκλιση που αναπτύσσουν τα εσωτερικά τους ρολόγια. Τα αρχεία αυτά αποκτήθηκαν από τη Διεθνή Υπηρεσία GNSS (International GNSS Service, IGS), όπου και δημοσιεύονται προς ελεύθερη διάθεση (International GNSS Service).

Ειδικότερα, το αρχείο με επέκταση “.21n” περιέχει δεδομένα τροχιάς χαμηλής ακρίβειας, τα οποία σύμφωνα με την IGS έχουν ορθότητα (accuracy) περίπου 100cm στις τροχιές και 5ns (μέσο τετραγωνικό σφάλμα, RMS) στα χρονόμετρα (IGS Product Specifications). Η ονομασία του αρχείου (“brdc1510.21n”) υποδηλώνει, πως πρόκειται για δεδομένα τύπου “Broadcast”, τα οποία αφορούν στην 151<sup>η</sup> ημέρα του 21<sup>ου</sup> έτους της παρούσας χιλιετίας. Το εν λόγω δημοσιεύεται σε πραγματικό χρόνο.

Αντίστοιχα, το αρχείο με επέκταση “.sp3” περιέχει δεδομένα τροχιάς υψηλής ακρίβειας και πρόκειται για δεδομένα τύπου “Precise”. Διατίθενται τρεις κατηγορίες επιλύσεων, οι οποίες ταξινομημένες σε αύξουσα ακρίβεια είναι οι “Ultra Rapid”, οι “Rapid” και οι “Final”. Βέβαια, όσο καλύτερη ακρίβεια έχει η επίλυση, τόσο περισσότερος χρόνος

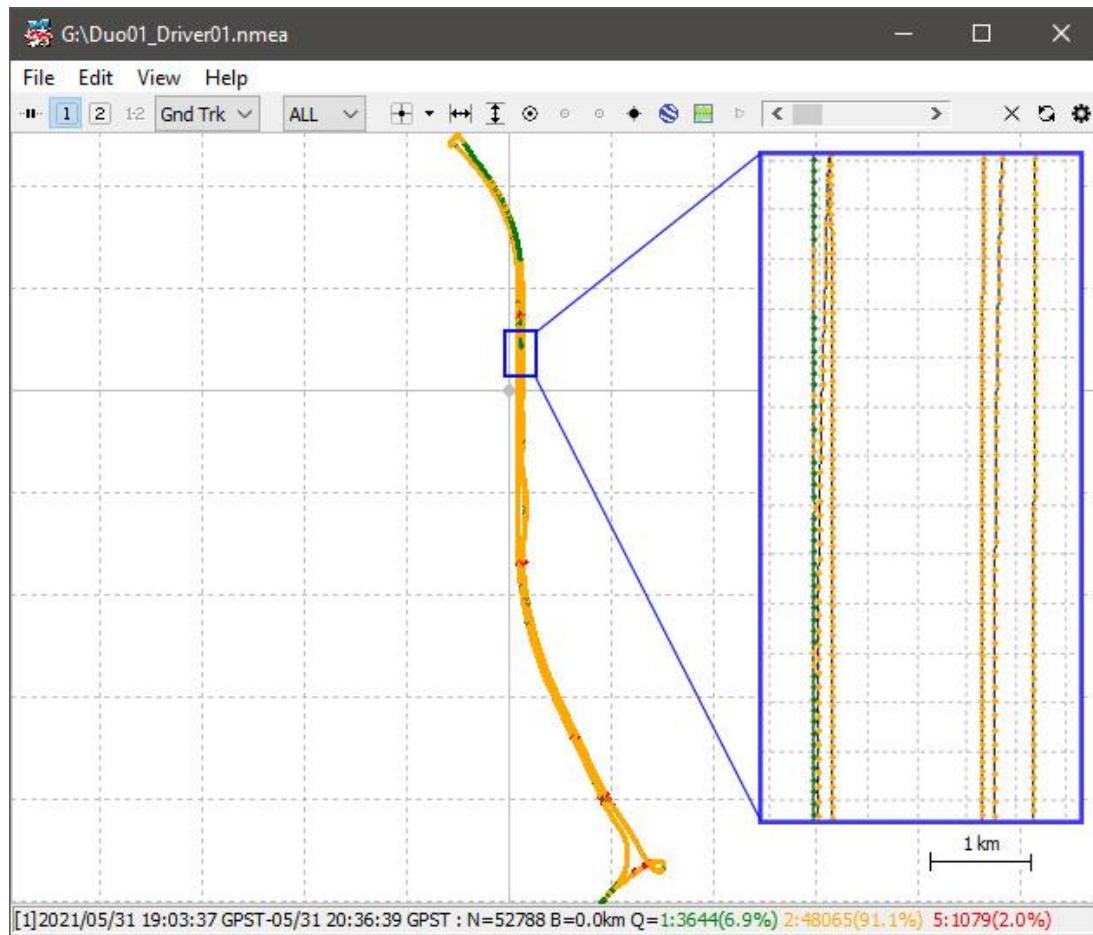
απαιτείται να παρέλθει προτού αυτή δημοσιευτεί. Σύμφωνα με την IGS, οι επιλύσεις “Rapid” δημοσιεύονται 17-41 ώρες μετά από την ημερομηνία διεξαγωγής των μετρήσεων, ενώ τα αρχεία “Final” ύστερα από 12-18 ημέρες. Για την εφαρμογή της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν οι επιλύσεις “Rapid”, καθώς η περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας που προσφέρουν οι επιλύσεις “Final” κρίθηκε αμελητέα για να δικαιολογείται η επιπλέον αναμονή. Τα δεδομένα της “Rapid” επίλυσης έχουν ορθότητα (accuracy) περίπου 2.5cm στις τροχιές και 75ps (μέσο τετραγωνικό σφάλμα, RMS) στα χρονόμετρα (IGS Product Specifications). Η ονομασία του αρχείου (“igr21601.sp3”) υποδηλώνει, πως πρόκειται για τις “Rapid” (“r”) τροχιές των δορυφόρων, οι οποίες αφορούν στην 1<sup>η</sup> ημέρα της 2160<sup>ης</sup> εβδομάδας λειτουργίας του συστήματος GPS. Η αντιστοίχιση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ημερολογίου GPS (NGS GPS Calendar), όπου ως ημέρα “0” ορίζεται η Κυριακή, ως ημέρα “1” η Δευτέρα, ... και ως ημέρα “6” το Σάββατο.

Παράλληλα με τις “Rapid” επιλύσεις δημοσιεύεται και ένα αρχείο με διορθώσεις χρονομέτρων (επέκταση “.clk”), το οποίο περιέχει διορθώσεις ανά 5min. Η ονομασία του αρχείου (“igr21601.clk”) είναι όμοια με αυτή του αρχείου με τις τροχιές υψηλής ακρίβειας (“\*.sp3”). Σημειώνεται, πως και τα τρία παραπάνω αρχεία περιέχουν δεδομένα για 24 ώρες, με ώρα εκκίνησης καταγραφής τις 00:00 UTC.

Τέλος, στο τελευταίο πεδίο προσδιορίστηκε η ονομασία του αρχείου εξόδου, το οποίο δημιουργείται αυτόματα από το RTKPOST με το πέρας της επεξεργασίας. Για λόγους διευκόλυνσης διατηρήθηκε η ίδια ονομασία με το αρχείο εισόδου που αναφέρεται στο συγκεκριμένο όχημα, με μόνη διαφοροποίηση την επέκταση του αρχείου (“.nmea” αντί για “.obs”).

Το πρόγραμμα εκτελέστηκε με το κουμπί “Execute”. Στο αρχείο εξόδου που δημιουργείται περιλαμβάνονται οι διορθωμένες θέσεις του οχήματος του πειράματος για κάθε χρονική στιγμή, οι οποίες και διαθέτουν τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Το RTKPOST δίνει τη δυνατότητα να οπτικοποιηθεί το αρχείο εξόδου σε ένα δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. Αφού έχει ολοκληρωθεί η επεξεργασία, επιλέγεται το κουμπί “Plot” και ενεργοποιείται το πρόγραμμα RTKPLOT. Στην *Εικόνα 4.31* φαίνεται η απεικόνιση του αρχείου εξόδου στο πρόγραμμα RTKPLOT. Ουσιαστικά, διακρίνεται η συνολική τροχιά που διέγραψε το συγκεκριμένο όχημα κατά τη διάρκεια που κινούνταν, η οποία από ψηλά ταυτίζεται με τη διαδρομή του πειράματος. Μάλιστα, στη μεγέθυνση που συνοδεύει την εικόνα διακρίνονται καθαρά τα επιμέρους στίγματα που κατέγραφε ο δέκτης GPS του οχήματος, τα οποία ενώνονται από το λογισμικό με μαύρη γραμμή και μορφώνουν την τροχιά. Γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως το εν λόγω όχημα πραγματοποίησε τρεις γύρους κατά τη συγκεκριμένη καταγραφή (η αριστερή τριάδα τροχιών αντιστοιχεί στην κατεύθυνση προς Κορωπί, ενώ η δεξιά τριάδα στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα).



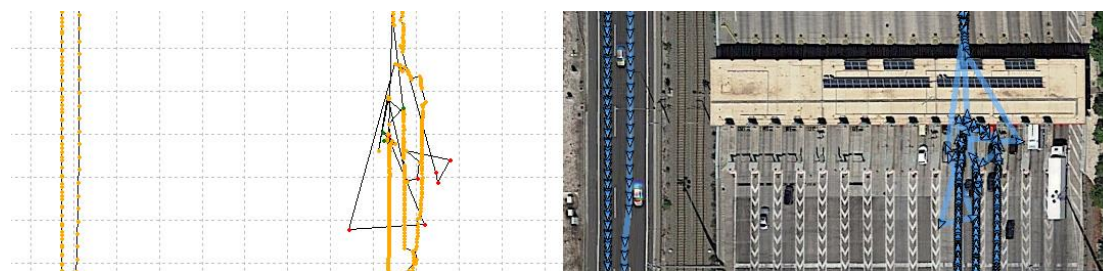
*Εικόνα 4.31 Η απεικόνιση της τροχιάς ενός οχήματος στο RTKPlot μετά από τη διόρθωσή της με την τεχνική RTK.*

Επιπρόσθετα, το RTKPlot παρέχει ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή της τεχνικής RTK στο αρχείο δεδομένων, που μόλις έλαβε χώρα. Για παράδειγμα, η απεικόνιση ενσωματώνει ένα χρωματικό κώδικα, ο οποίος αντιστοιχεί κάθε στίγμα σε έναν αριθμό, που έχει να κάνει με την ποιότητα της κινηματικής επίλυσης που πραγματοποιήσε το RTKPOST. Συγκεκριμένα, το πράσινο χρώμα έχει τον κωδικό “1” και αντιστοιχεί σε επίλυση “fixed”, που σημαίνει, πως το πρόβλημα της ασάφειας φάσης έχει επιλυθεί σωστά. Το κίτρινο χρώμα έχει τον κωδικό “2” και αντιστοιχεί σε επίλυση “float”, που σημαίνει, πως το πρόβλημα της ασάφειας φάσης δεν έχει επιλυθεί, αλλά παράλα αυτά για την εύρεση της απόστασης από το δορυφόρο έχει χρησιμοποιηθεί η φάση του φέροντος κύματος. Τέλος, το κόκκινο χρώμα έχει τον κωδικό “5” και αντιστοιχεί σε επίλυση “single”, που σημαίνει, πως για τον προσδιορισμό της θέσης έχει χρησιμοποιηθεί μόνο το περιεχόμενο του μηνύματος του φέροντος κύματος. Οι κωδικοί “3”, “4” και “6” δεν εμφανίζονται, καθώς δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία RTK. Στην *Εικόνα 4.31*, στο κάτω μέρος, διακρίνεται ο αριθμός των σημείων που ανήκουν στην κάθε κατηγορία, αλλά και τα αντίστοιχα ποσοστά επί του συνόλου. Προφανώς, είναι επιθυμητό να υπάρχουν πολλά πράσινα σημεία, λιγότερα κίτρινα και αν είναι δυνατόν καθόλου κόκκινα.

Η ποιότητα της επίλυσης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα σήματος (κατά τη διέλευση κάτω από γέφυρες ή ταμπέλες διαταράσσεται η λήψη) και η επικοινωνία κάθε στιγμή με περισσότερους από τέσσερις δορυφόρους (όσο περισσό-

τεροι τόσο το καλύτερο). Κυρίως, όμως, είναι σημαντικό να παρέρχεται ένα μικρό χρονικό διάστημα κάθε φορά που διακόπτεται η επικοινωνία ανάμεσα στο δέκτη και τους δορυφόρους για περισσότερο από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου. Αυτό συμβαίνει, επειδή σε μια τέτοια περίπτωση θα έπρεπε η επίλυση του προβλήματος της ασάφειας φάσης να διακοπεί και να ξεκινήσει εκ νέου με την αποκατάσταση της επικοινωνίας. Είναι γνωστό, όμως, πως η τεχνική RTK έχει ορισμένες ιδιαιτερότητες κατά την εκκίνηση της επίλυσης του προβλήματος της ασάφειας φάσης και απαιτούνται περίπου 5min για να θεωρηθεί ότι το σύστημα λειτουργεί και πάλι σωστά.

Η ύπαρξη άνω διαβάσεων αναμενόταν να μην αποτελεί πρόβλημα σε αυτόν τον τομέα, καθώς το όχημα θα βρισκόταν στο ίχνος της για περίπου 0.5s και λιγότερο. Ο χρόνος αυτός κρίθηκε ότι δεν επαρκεί για να διακοπεί η κινηματική επίλυση. Εντούτοις, δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο και για το μετωπικό σταθμό διοδίων που βρίσκεται στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα. Αφενός μεν διαθέτει στέγαστρο σημαντικά μεγάλου πλάτους, της τάξης των 20m, αφετέρου δε το όχημα κινούνταν με συγκριτικά πολύ χαμηλότερες ταχύτητες καθώς διερχόταν από τα ταμεία, ενώ ορισμένες φορές υπήρχαν και μικρές ουρές αναμονής. Η επίδραση του σταθμού διοδίων στο σήμα του GPS και κατ' επέκταση στην απεικόνιση της τροχιάς του οχήματος αποκρυσταλλώνεται στην *Εικόνα 4.32*, όπου η υποβάθμιση της ποιότητας είναι κάτι παραπάνω από φανερό. Για σύγκριση, περιλαμβάνεται επίσης ένα μέρος των τροχιών στο ρεύμα προς Κορωπί.



*Εικόνα 4.32 Η ποιότητα του σήματος GPS υποβαθμίζεται σημαντικά στο σταθμό διοδίων.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καταδεικνύεται η ανάγκη για μια ολιγόλεπτη στάθμευση αμέσως μετά το σταθμό διοδίων, σε απόσταση που το στέγαστρο να μην παρεμβάλλεται στην επικοινωνία του δέκτη του οχήματος με τους δορυφόρους του GPS. Ενώ θεωρητικά 5min επαρκούν για να αποκατασταθεί η επίλυση του προβλήματος της ασάφειας φάσης, για να καλυφθεί η τυχούσα δυσμενής περίπτωση και εισάγοντας έναν άτυπο συντελεστή ασφαλείας κρίθηκε σκόπιμο η εν λόγω στάθμευση να διαρκεί 7-8min. Αυτό έπρεπε να τηρηθεί σε κάθε γύρο.

Μια ακόμη επιλογή για οπτικοποίηση της τροχιάς του οχήματος προσφέρει το πρόγραμμα Google Earth Pro, στο οποίο μπορεί να εισαχθεί απευθείας (με τη μέθοδο “drag and drop”) το αρχείο εξόδου του RTKPOST, στο πρότυπο NMEA. Οι τροχιές σχεδιάζονται αυτόματα από το λογισμικό, ενώ η κατεύθυνση του διαμήκους άξονα του οχήματος αποτυπώνεται ως ένα βέλος, για κάθε χρονική στιγμή που υπάρχει διαθέσιμο στίγμα από το GPS. Στην *Εικόνα 4.33* φαίνεται η συνολική τροχιά που διέγραψε το συγκεκριμένο όχημα κατά τη διάρκεια που κινούνταν, η οποία από ψηλά ταυτίζεται με τη διαδρομή του πειράματος. Μάλιστα, στη μεγέθυνση που συνοδεύει την εικόνα διακρίνονται καθαρά τα επιμέρους στίγματα που κατέγραφε ο δέκτης GPS του οχήματος, τα οποία ενώνονται από το λογισμικό με γαλάζια αχνή γραμμή και μορφώνουν την

τροχιά. Γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως το εν λόγω όχημα πραγματοποίησε τρεις γύρους κατά τη συγκεκριμένη καταγραφή (η αριστερή τριάδα τροχιών αντιστοιχεί στην κατεύθυνση προς Κορωπί, ενώ η δεξιά τριάδα στην κατεύθυνση προς Ελευσίνα). Στο Google Earth Pro εμφανίζεται επιπρόσθετα ένα στοιχείο επικοινωνίας με το χρήστη, με το οποίο μπορεί να απομονωθεί ένα μέρος από ολόκληρη την τροχιά του οχήματος, επιλέγοντας το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος.



*Εικόνα 4.33 Η απεικόνιση της τροχιάς ενός οχήματος στο Google Earth Pro μετά την εφαρμογή της τεχνικής RTK.*

Και οι δύο τρόποι απεικόνισης του παραγόμενου αποτελέσματος προσφέρουν στο χρήστη μια πολύ καλή εποπτεία της τροχιάς του οχήματος. Παράλληλα, ενδείκνυνται για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς την ποιότητα του δορυφορικού προσδιορισμού θέσης στις διάφορες χιλιομετρικές θέσεις της διαδρομής του πειράματος. Μάλιστα, σε συνδυασμό με τη διεξαγωγή δοκιμαστικών μετρήσεων, οι απεικονίσεις αυτές



βοήθησαν στην τελική επιλογή της εν λόγω διαδρομής, καθώς και στον καθορισμό των επιμέρους ζωνών προσπέρασης.

Επιστρέφοντας στο αρχείο εξόδου που παράχθηκε με το πρόγραμμα RTKPOST, αυτό είχε καθοριστεί να είναι στο πρότυπο NMEA0183 (National Marine Electronics Association), όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.29(γ)*. Το πρότυπο αυτό δίνει αρκετές επιπρόσθετες πληροφορίες, πέρα από τις χωρικές συντεταγμένες του οχήματος και μπορεί να αναγνωστεί από το λογισμικό υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel. Το αρχείο εξόδου, όπως μορφώθηκε από το πρόγραμμα RTKPOST απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.34*, όπου κάθε δεύτερη (μη κενή) γραμμή αναφέρεται και σε διαφορετική χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, οι γραμμές 1 και 3 στην εν λόγω εικόνα αφορούν στη θέση που βρισκόταν ο δέκτης GPS τη χρονική στιγμή 19:03:18.800 (UTC), οι γραμμές 5 και 7 αφορούν στη χρονική στιγμή 19:03:18.900 (UTC), κλπ.

	A	B	C
1	\$GPRMC,190318.80,A,3758.2434491,N,02352.7166498,E,0.06,0.00,310521,0.0,E,A*3C		
2			
3	\$GPGGGA,190318.80,3758.2434491,N,02352.7166498,E,1,08,1.0,185.410,M,38.630,M,-146.9,*60		
4			
5	\$GPRMC,190318.90,A,3758.2434358,N,02352.7166741,E,0.05,0.00,310521,0.0,E,A*3B		
6			
7	\$GPGGGA,190318.90,3758.2434358,N,02352.7166741,E,1,08,1.0,185.378,M,38.630,M,-146.8,*6C		
8			
9	\$GPRMC,190319.00,A,3758.2434464,N,02352.7166580,E,0.10,0.00,310521,0.0,E,A*30		
10			
11	\$GPGGGA,190319.00,3758.2434464,N,02352.7166580,E,1,08,1.0,185.338,M,38.630,M,-146.7,*68		
12			
13	\$GPRMC,190319.10,A,3758.2434531,N,02352.7166718,E,0.13,0.00,310521,0.0,E,A*30		

*Εικόνα 4.34* Το αρχείο εξόδου που προκύπτει από την επεξεργασία με το πρόγραμμα RTKPOST.

Καθώς το οδικό πείραμα διήρκησε αρκετές ώρες, συλλέχθηκε συνολικά πολύ μεγάλος όγκος συντεταγμένων. Επομένως, η αυτοματοποίηση της διαδικασίας της επεξεργασίας αποτέλεσε πρωταρχικό μέλημα στην παρούσα εργασία. Εξάλλου, με αυτόν τον τρόπο εξαλείφονται και πολλά λάθη που βασίζονται στον ανθρώπινο παράγοντα. Η μορφή, όμως, που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4.34* δεν ενδείκνυται για τη γρήγορη εξαγωγή των χρήσιμων πληροφοριών. Το αρχείο είναι πιο βολικό και ευανάγνωστο, όταν κάθε γραμμή αφορά και σε μια χρονική στιγμή, χωρίς να μεσολαμβάνουν κενές γραμμές.

Για το λόγο αυτό, γράφτηκε script στη γλώσσα προγραμματισμού Python, το οποίο διαβάζει το εν λόγω αρχείο NMEA, αναδιατάσσει τις σειρές του και δημιουργεί ένα νέο αρχείο εξόδου (“\*.out”). Το script αυτό, που ονομάστηκε “topo2civil.py”, πρέπει κάθε φορά να βρίσκεται στον ίδιο φάκελο που βρίσκεται και το αρχείο που τροποποιείται. Εκτελείται δε, απευθείας από το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development and Learning Environment, IDLE) της Python. Στην *Εικόνα 4.35* απεικονίζεται το αρχείο εξόδου, όπως μορφώθηκε από το script.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	\$GPRMC,190318.80,A,	\$GPGGA,190318.80,3758.2434491,N,	02352.7166498,E,	1,08,1.0,185.410,M,	38.630,M,-146.9,*60						
2	\$GPRMC,190318.90,A,	\$GPGGA,190318.90,3758.2434358,N,	02352.7166741,E,	1,08,1.0,185.378,M,	38.630,M,-146.8,*6C						
3	\$GPRMC,190319.00,A,	\$GPGGA,190319.00,3758.2434464,N,	02352.7166580,E,	1,08,1.0,185.338,M,	38.630,M,-146.7,*68						
4	\$GPRMC,190319.10,A,	\$GPGGA,190319.10,3758.2434531,N,	02352.7166718,E,	1,08,1.0,185.150,M,	38.630,M,-146.6,*66						
5	\$GPRMC,190319.20,A,	\$GPGGA,190319.20,3758.2434319,N,	02352.7167210,E,	1,08,1.0,184.948,M,	38.630,M,-146.5,*66						
6	\$GPRMC,190319.30,A,	\$GPGGA,190319.30,3758.2434157,N,	02352.7167663,E,	1,08,1.0,185.022,M,	38.630,M,-146.4,*6A						
7	\$GPRMC,190319.40,A,	\$GPGGA,190319.40,3758.2433961,N,	02352.7167798,E,	1,08,1.0,185.088,M,	38.630,M,-146.3,*65						
8	\$GPRMC,190319.50,A,	\$GPGGA,190319.50,3758.2434153,N,	02352.7167740,E,	1,08,1.0,185.064,M,	38.630,M,-146.2,*6C						
9	\$GPRMC,190319.60,A,	\$GPGGA,190319.60,3758.2433585,N,	02352.7167883,E,	1,08,1.0,185.049,M,	38.630,M,-146.1,*6B						

Εικόνα 4.35 Το αρχείο εξόδου σε μια πιο ενανάνγνωστη μορφή.

Δεδομένου πως οι επιμέρους πληροφορίες που δίνει το πρότυπο NMEA διαχωρίζονται μεταξύ τους με κόμμα, πραγματοποιήθηκε εύκολα η μετατροπή του κειμένου σε στήλες (στο Excel: καρτέλα “Δεδομένα”→”Κείμενο σε στήλες”). Με αυτόν τον τρόπο, το αρχείο εξόδου με τις πληροφορίες για την τροχιά του οχήματος πήρε την τελική του μορφή, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.36. Πλέον, σε κάθε στήλη υπάρχει μόνο μια κατηγορία πληροφοριών, για όλες τις χρονικές στιγμές.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	
1	\$GPRMC	190318.8	A	3758.243449	N	2352.71665	E	0.06	0	310521	0	E	A*3C	\$GPGGA	190318.8	3758.243449	N	2352.71665	E	1	8	1	185.41	M	38.63	M	-146.9	*60		
2	\$GPRMC	190318.9	A	3758.243436	N	2352.716674	E	0.05	0	310521	0	E	A*3B	\$GPGGA	190318.9	3758.243436	N	2352.716674	E	1	8	1	185.378	M	38.63	M	-146.8	*6C		
3	\$GPRMC	190319	A	3758.243446	N	2352.716658	E	0.11	0	310521	0	E	A*30	\$GPGGA	190319	3758.243446	N	2352.716658	E	1	8	1	185.338	M	38.63	M	-146.7	*68		
4	\$GPRMC	190319.1	A	3758.243453	N	2352.716672	E	0.13	0	310521	0	E	A*30	\$GPGGA	190319.1	3758.243453	N	2352.716672	E	1	8	1	185.15	M	38.63	M	-146.6	*66		
5	\$GPRMC	190319.2	A	3758.243432	N	2352.716721	E	0.06	0	310521	0	E	A*37	\$GPGGA	190319.2	3758.243432	N	2352.716721	E	1	8	1	184.948	M	38.63	M	-146.5	*66		
6	\$GPRMC	190319.3	A	3758.243416	N	2352.716766	E	0.09	0	310521	0	E	A*31	\$GPGGA	190319.3	3758.243416	N	2352.716766	E	1	8	1	185.022	M	38.63	M	-146.4	*6A		
7	\$GPRMC	190319.4	A	3758.243396	N	2352.71678	E	0.04	0	310521	0	E	A*34	\$GPGGA	190319.4	3758.243396	N	2352.71678	E	1	8	1	185.088	M	38.63	M	-146.3	*65		
8	\$GPRMC	190319.5	A	3758.243415	N	2352.716774	E	0.02	0	310521	0	E	A*38	\$GPGGA	190319.5	3758.243415	N	2352.716774	E	1	8	1	185.064	M	38.63	M	-146.2	*6C		
9	\$GPRMC	190319.6	A	3758.243359	N	2352.716788	E	0.16	0	310521	0	E	A*36	\$GPGGA	190319.6	3758.243359	N	2352.716788	E	1	8	1	185.049	M	38.63	M	-146.1	*6B		

Εικόνα 4.36 Το τελικό αρχείο εξόδου με τις πληροφορίες χωρισμένες σε στήλες.

Ταυτόχρονα, αναζητήθηκε και το τι εκφράζουν οι πληροφορίες που περιέχονται στις διάφορες στήλες. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του RTKPOST, το αρχείο εξόδου στο πρότυπο NMEA περιέχει για κάθε χρονική στιγμή δύο μηνύματα. Το ένα μήνυμα είναι τύπου “GPRMC” και το άλλο τύπου “GPGGA”. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου NMEA 0183, αυτά τα μηνύματα περιέχουν τις εξής πληροφορίες:

- RMC, “Position, Velocity and Time” (ειδικά όταν γίνεται χρήση GPS, όπως στην προκειμένη περίπτωση, το μήνυμα αυτό ονομάζεται GPRMC):
  0. Message ID,
  1. UTC of position fix (hhmmss.ss, h=hours, m=minutes, s=seconds),
  2. Status (A=Active or V=Void),
  3. Latitude (ddmm.mmmm, d=degrees, m=minutes),
  4. Longitude (dddmm.mmmm, d=degrees, m=minutes),
  5. Speed over the ground (knots),
  6. Track angle (deg),
  7. Date (ddmmyy, d=day, m=month, y=year),
  8. Magnetic variation (deg),

9. The checksum data (always begins with “\*”).
- GGA, “Time, Position and fix related data” (ειδικά όταν γίνεται χρήση GPS, όπως στην προκειμένη περίπτωση, το μήνυμα αυτό ονομάζεται GPGGA):
  0. Message ID,
  1. UTC of position fix (hhmmss.ss, h=hours, m=minutes, s=seconds),
  2. Latitude (ddmm.mmmm, d=degrees, m=minutes),
  3. Direction of latitude (N=North),
  4. Longitude (dddmm.mmmm, d=degrees, m=minutes),
  5. Direction of longitude (W=West),
  6. GPS Quality indicator:
    - 0: fix not valid,
    - 1: GPS fix,
    - 2: Differential GPS fix, Omnistar VBS,
    - 4: Real Time Kinematic, fixed integers,
    - 5: Real Time Kinematic, float integers, Omnistar XP/HP or Location RTK,
  7. Number of SVs in use,
  8. HDOP,
  9. Orthometric height,
  10. M: unit is meters,
  11. Geoid Separation,
  12. M: unit is meters,
  13. Age of differential GPS data record,
  14. Reference Station ID,
  15. The checksum data (always begins with “\*”).

Επομένως, σε κάθε μια από τις στήλες που απεικονίζονται στην *Εικόνα 4.36* αντιστοιχήθηκε και μια από τις παραμέτρους που απαριθμούνται παραπάνω. Το φύλλο εργασίας, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.36*, διέθετε 28 στήλες. Εντούτοις, οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στα μηνύματα GPRMC και GPGGA φαίνεται να είναι μόνο 26. Η διαφορά αυτή οφείλεται, στο ότι κατά τη μετατροπή του κειμένου σε στήλες, το Excel διαχώρισε την 9<sup>η</sup> παράμετρο του RMC και τη 15<sup>η</sup> παράμετρο του GGA σε δύο στήλες την κάθε μια. Αυτό δεν επηρέασε πουθενά την όλη διαδικασία και έτσι απλώς αγνοήθηκε.

Από όλες τις παραμέτρους που απαριθμούνται παραπάνω, δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες στην παρούσα εργασία. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής απαιτήθηκε η γνώση μόνο των παραμέτρων 1 (UTC του στίγματος), 3 (γεωγραφικό πλάτος), 4 (γεωγραφικό μήκος) και 5 (ταχύτητα του οχήματος σε σχέση με το έδαφος) του μηνύματος RMC.

Χάρην απλοποίησης του προβλήματος, η γεωμετρική ανάλυση των τροχιών πραγματοποιήθηκε σε δύο διαστάσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Επομένως, τα υψόμετρα που έδινε κάθε φορά το GPS δεν λήφθηκαν καθόλου υπόψη. Η παραδοχή αυτή είναι φυσικά λανθασμένη, καθώς ένα όχημα κινείται πάντα στις τρεις διαστάσεις. Παρόλα αυτά, γνωρίζοντας πως το οδικό τμήμα στις ζώνες προσπέρασης του πειράματος διαθέτει πολύ μικρές κατά μήκος κλίσεις, το σφάλμα που υπεισέρχεται στη μεθοδολογία είναι ελάχιστο και αμελητέο.

## 4.2.2 Μετασχηματισμός και μετατροπή συντεταγμένων

Οι συντεταγμένες της τροχιάς του οχήματος, όπως εξάγονται από το πρόγραμμα RTKPOST, αναφέρονται στο παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα (World Geodetic System 1984, WGS 84) και είναι εκφρασμένες στη μορφή Μοίρες Δεκαδικά Λεπτά (Degrees Decimal Minutes, DDM). Για να μπορέσουν να ενταχθούν σε μαθηματικούς τύπους, ώστε να χρησιμοποιηθούν σε πράξεις, πρέπει πρώτα να μετατραπούν στην Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (Universal Transverse Mercator, UTM), δηλαδή να εκφραστούν σε μέτρα. Επειδή το οδικό πείραμα διεξήχθη στην Ελλάδα, αποφασίστηκε οι συντεταγμένες επιπρόσθετα να μετασχηματιστούν στο αντίστοιχο Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987, ΕΓΣΑ 87). Επομένως, το δεύτερο βήμα της επεξεργασίας αφορά στη μετατροπή και το μετασχηματισμό των συντεταγμένων.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα COORD\_GR 1.6. Στην *Εικόνα 4.37* απεικονίζεται το γραφικό περιβάλλον χρήστη στην αρχική σελίδα του προγράμματος. Οι συντεταγμένες εισάγονται από το χρήστη στο κάτω αριστερά τμήμα, εκφρασμένες στο σύστημα αναφοράς προέλευσης και ακολούθως εμφανίζονται στο κάτω μεσαίο τμήμα, μετασχηματισμένες στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Σημειώνεται, πως το πρόγραμμα δέχεται ως είσοδο μόνο συντεταγμένες που αντιστοιχούν στην Ελληνικό χώρο. Επιπλέον, προσφέρεται η δυνατότητα για επιλογή από διάφορα συστήματα αναφοράς, μεταξύ των οποίων γεωδαιτικά συστήματα και μερκατορικές προβολές.

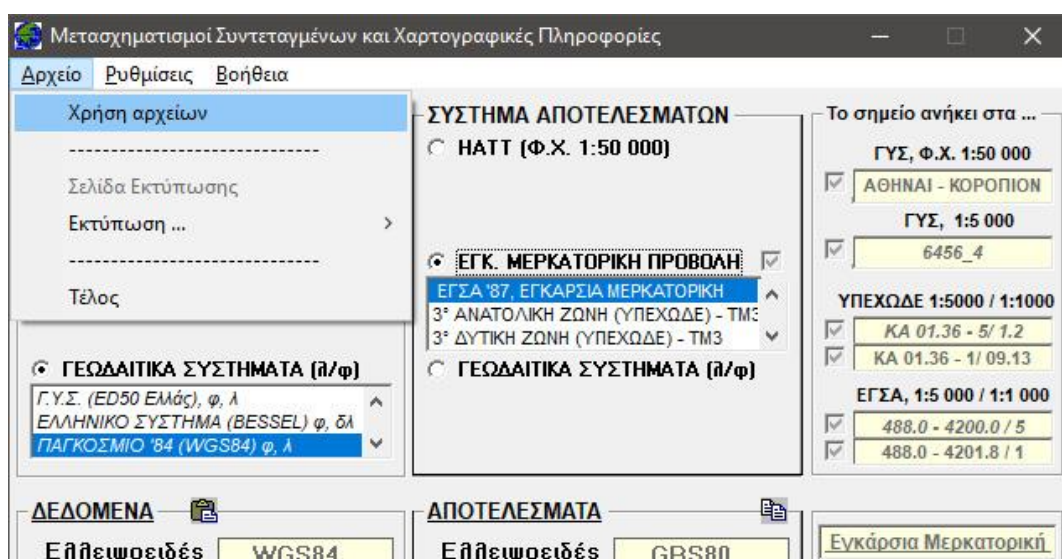
The screenshot shows the 'Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων και Χαρτογραφικές Πληροφορίες' (Coordinate Transformations and Cartographic Information) window. It is divided into several sections:

- ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ (Source System):** Includes options for HATT (Φ.Χ. 1:50 000), ΕΓΚ. ΜΕΡΚΑΤΟΡΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ, and ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (α/φ). The selected system is 'ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ '84 (WGS84) φ, λ'.
- ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (Destination System):** Includes options for HATT (Φ.Χ. 1:50 000), ΕΓΚ. ΜΕΡΚΑΤΟΡΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ, and ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (α/φ). The selected system is 'ΕΓΣΑ '87, ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΜΕΡΚΑΤΟΡΙΚΗ' with '3° ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΖΩΝΗ (ΥΠΕΧΩΔΕ) - ΤΜ3'.
- Το σημείο ανήκει στα ... (Point belongs to ...):** Lists various coordinate systems and zones, including 'ΑΘΗΝΑΙ - ΚΟΡΟΠΙΟΝ' and 'ΥΠΕΧΩΔΕ 1:5000 / 1:1000'.
- ΔΕΔΟΜΕΝΑ (Inputs):** Shows the source system as WGS84 and the input coordinates as 0° 00' 00" N and 23° 52' 00" 000000 E, 37° 58' 00" 000000 W.
- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (Outputs):** Shows the destination system as GRS80 and the output coordinates as 24° 00' 00" N, 488 139.527 E (± 1.20 m), 488 139.513 E' (± 3.0 m), and 4 201 837.448 N, 4 201 837.912 N'.
- Εγκάρσια Μερκατορική (UTM):** Shows the UTM zone as 'ΕΓΣΑ '87, ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΜΕΡΚΑΤΟΡΙΚΗ' and the delta (ΔΑ) as -0° 04' 59" 02339.
- TELOS (End):** A button to finish the process.

Εικόνα 4.37 Η κεντρική σελίδα του προγράμματος COORD\_GR.

Ένα τυπικό αρχείο εξόδου από το RTKPOST αποτελούνταν, ενδεικτικά, από περίπου 55,000 γραμμές. Αυτό σημαίνει, πως η τροχιά του εξεταζόμενου κάθε φορά οχήματος αποτελούνταν από 55,000 σημεία. Επομένως, είναι προφανές, πως ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων δεν θα είχε νόημα να γίνει χειροκίνητα για το κάθε σημείο. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα του λογισμικού για μετατροπή συντεταγμένων απευθείας από αρχείο.

Η δυνατότητα αυτή είναι διαθέσιμη από την επιλογή “Αρχείο”→”Χρήση αρχείων”, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.38*. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όμως, πρέπει πρώτα να εισαχθεί ένα έγκυρο ζεύγος γεωγραφικού μήκους (λ) και πλάτους (φ) στα αντίστοιχα πεδία εισόδου δεδομένων, τα οποία φαίνονται στο κάτω αριστερά μέρος στην *Εικόνα 4.37*. Αν τα πεδία αυτά παραμείνουν κενά, η δυνατότητα για εισαγωγή δεδομένων από αρχείο δεν είναι διαθέσιμη.



*Εικόνα 4.38* Για τον απευθείας μετασχηματισμό πολλών συντεταγμένων επιλέγεται η δυνατότητα χρήσης αρχείων.

Το αρχείο συντεταγμένων που εισάγεται στο COORD\_GR είναι αρχείο κειμένου (επέκταση “.txt”) και διαθέτει πολύ συγκεκριμένη δομή. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα μόνο στίγμα GPS και πρέπει να περιλαμβάνει, με τη σειρά, έναν αύξοντα αριθμό ως μετρητή και στη συνέχεια το γεωγραφικό μήκος (λ) και το γεωγραφικό πλάτος (φ) του στίγματος αυτού. Οι τρεις αυτοί αριθμοί πρέπει να είναι διαχωρισμένοι με κόμμα, ενώ ως υποδιαστολή για τα δεκαδικά ψηφία λογίζεται η τελεία.

Ένα πολύ σημαντικό σημείο είναι, πως οι συντεταγμένες στο αρχείο εισόδου πρέπει να είναι εκφρασμένες στη μορφή Μοίρες Λεπτά Δευτερόλεπτα (Degrees Minutes Seconds, DMS). Η μορφή αυτή είναι ουσιαστικά ένας αριθμός, ο οποίος γράφεται DD°.MM’SS”ssss, όπου DD° είναι οι μοίρες, MM’ τα λεπτά, SS” το ακέραιο μέρος των δευτερολέπτων και ssss το δεκαδικό μέρος των δευτερολέπτων. Μεταξύ των μοιρών και των λεπτών υπάρχει υποδιαστολή, ενώ η υποδιαστολή που κανονικά θα υπήρχε ανάμεσα στο ακέραιο και το δεκαδικό μέρος των δευτερολέπτων, αμελείται.

Υπενθυμίζεται, πως το αρχείο εξόδου του RTKPOST δομήθηκε στη βάση του προτύπου NMEA 0183, δηλαδή με τις συντεταγμένες εκφρασμένες στη μορφή DDM. Η

μορφή αυτή είναι ουσιαστικά ένας αριθμός, ο οποίος γράφεται ddmm.mmmm, όπου dd είναι οι μοίρες και mm.mmmm τα λεπτά.

Επομένως, πριν την εισαγωγή τους στο COORD\_GR, οι συντεταγμένες έπρεπε να γραφούν από τη μορφή DDM, στη μορφή DMS. Απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη μετατροπή, καθώς οι δύο αυτές μορφές εμπεριέχουν ταυτόχρονα το δεκαδικό και το εξηνταδικό σύστημα αρίθμησης.

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή είναι η εξής:

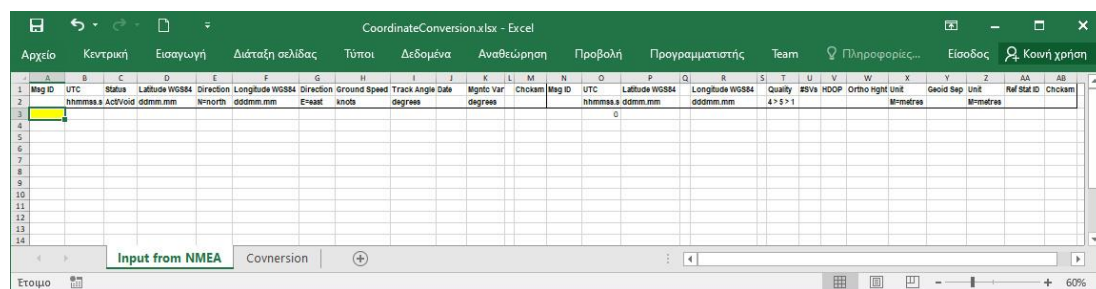
$$DD^{\circ}.MM'SS''ssss = \frac{[ddmm.mmmm] \cdot 100 + (ddmm.mmmm - [ddmm.mmmm]) \cdot 60}{10,000} \quad (4.1)$$

, όπου: [z] το ακέραιο μέρος ενός αριθμού z,

DD°.MM'SS''ssss μια συντεταγμένη σε μορφή DMS,

ddmm.mmmm μια συντεταγμένη σε μορφή DDM.

Η εφαρμογή της 4.1 πραγματοποιήθηκε σε ένα νέο αρχείο Excel, το οποίο μορφώθηκε αποκλειστικά για την ταχεία μετατροπή των συντεταγμένων από τη μορφή DDM στη μορφή DMS. Το αρχείο αυτό, με ονομασία "CoordinateConversion.xlsx", δομήθηκε με σκοπό να επιταχυνθεί η διαδικασία όσο το δυνατόν περισσότερο. Ως εκ τούτου, μορφώθηκε με δύο φύλλα εργασίας. Στο πρώτο φύλλο εργασίας έγινε εισαγωγή με επικόλληση ολόκληρου του περιεχομένου του αρχείου εξόδου του προτύπου NMEA ("Duo01\_Driver01.out"), αφότου οι τιμές του είχαν αντιγραφεί μαζικά (Ctrl+A) από το σχετικό αρχείο. Μάλιστα, για να διασφαλιστεί η δυνατότητα εποπτείας από το χρήστη, στις δύο πρώτες γραμμές του φύλλου εργασίας τοποθετήθηκαν οι επεξηγήσεις των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στα μηνύματα NMEA, καθώς και οι αντίστοιχες μονάδες μέτρησης. Τα δεδομένα, συνεπώς, επικολλώνται με άνω αριστερά ακραίο κελί το κελί A3, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 4.39*. Από όλα αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται μόνο οι στήλες B, D, F και H, οι οποίες αφορούν αντίστοιχα στο χρόνο UTC του κάθε στίγματος, το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος του, καθώς και στην ταχύτητα κίνησης του οχήματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



*Εικόνα 4.39* Το φύλλο εισαγωγής των παραμέτρων NMEA στο αρχείο μετατροπής των συντεταγμένων.

Στο δεύτερο φύλλο εργασίας πραγματοποιούνται οι μετατροπές των συντεταγμένων, αυτόματα για όλες τις σειρές, αφού στα αντίστοιχα κελιά προϋπάρχουν οι σχετικές συναρτήσεις. Επιπλέον, περιλαμβάνεται και μια στήλη που λειτουργεί ως μετρητής, ώστε με μια απλή και ταχύτατη αντιγραφή, να μπορούν να εξαχθούν όλες οι πληροφορίες που χρειάζονται για τη δημιουργία του αρχείου κειμένου. Στην *Εικόνα 4.40* απεικονίζονται οι στήλες με τα δεδομένα που προορίζονται για εξαγωγή. Οι υπόλοιπες στήλες

που δεν φαίνονται είναι βοηθητικές και συνεισφέρουν στους μαθηματικούς υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, στις στήλες H και I εμφανίζονται οι συντεταγμένες στη μορφή DMS, ενώ η στήλη G περιέχει το μετρητή. Στο φύλλο εργασίας εμφανίζονται τόσες μη μηδενικές σειρές, όσες είναι και οι χρονικές στιγμές, για τις οποίες το GPS κατέγραψε τη θέση του οχήματος.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	counter	Longitude WGS84 DD° MM'SS\"/>							
2									
3	1		0	0 00:00.000				00:00.000	0
4	2		0	0 00:00.000				00:00.000	0
5	3		0	0 00:00.000				00:00.000	0
6	4		0	0 00:00.000				00:00.000	0
7	5		0	0 00:00.000				00:00.000	0
8	6		0	0 00:00.000				00:00.000	0
9	7		0	0 00:00.000				00:00.000	0
10	8		0	0 00:00.000				00:00.000	0
11	9		0	0 00:00.000				00:00.000	0
12	10		0	0 00:00.000				00:00.000	0
13	11		0	0 00:00.000				00:00.000	0
14	12		0	0 00:00.000				00:00.000	0
15	13		0	0 00:00.000				00:00.000	0
16	14		0	0 00:00.000				00:00.000	0
17	15		0	0 00:00.000				00:00.000	0

Εικόνα 4.40 Το φύλλο που εμφανίζονται οι συντεταγμένες στην επιθυμητή για τη μετατροπή τους μορφή.

Στη συνέχεια, τα νούμερα στις στήλες G, H και I μεταφέρθηκαν με αντιγραφή και επικόλληση σε ένα κενό αρχείο κειμένου (επέκταση “.txt”). Το αρχείο αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 4.41.

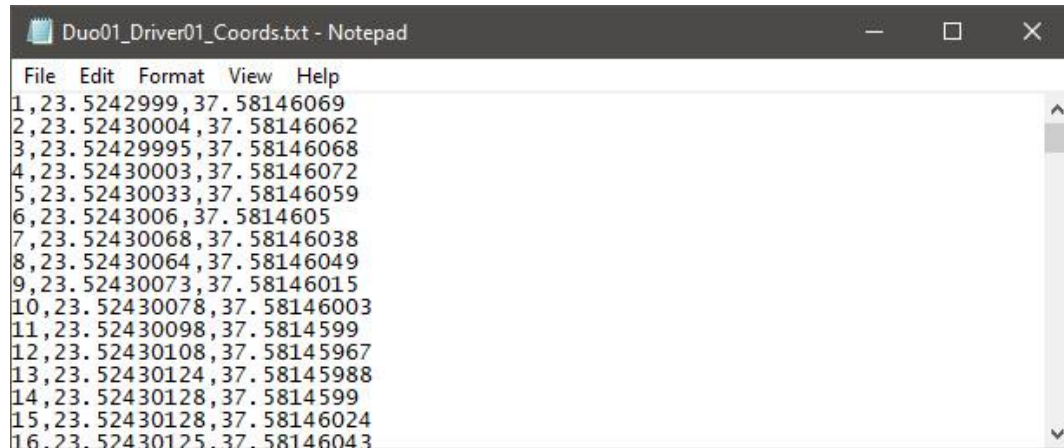
Line	Longitude (DMS)	Latitude (DMS)
1	23.5242999	37.58146069
2	23.52430004	37.58146062
3	23.52429995	37.58146068
4	23.52430003	37.58146072
5	23.52430033	37.58146059
6	23.5243006	37.5814605
7	23.52430068	37.58146038
8	23.52430064	37.58146049
9	23.52430073	37.58146015
10	23.52430078	37.58146003
11	23.52430098	37.5814599
12	23.52430108	37.58145967
13	23.52430124	37.58145988
14	23.52430128	37.5814599
15	23.52430128	37.58146024
16	23.52430125	37.58146043

Εικόνα 4.41 Το αρχείο κειμένου με τις συντεταγμένες της τροχιάς στο σύστημα WGS84 και σε μορφή DMS.

Γενικά, ο υπολογιστής αναγνωρίζει δύο κύριους τρόπους, με τους οποίους μια αλληλουχία αριθμών διαχωρίζεται σε ανεξάρτητα επιμέρους νούμερα. Ο ένας τρόπος είναι να διαχωρίζονται με το χαρακτήρα “Tab” ( ) και ο άλλος με το χαρακτήρα “κόμμα” (.). Όταν τα δεδομένα στο Excel είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές στήλες, συνήθως υπονοείται πως διαχωρίζονται με Tab. Συνεπώς, με το που έγινε η επικόλληση στο αρχείο κειμένου, οι αριθμοί σε κάθε ίδια γραμμή στοιχίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να απέχουν σταθερά μεταξύ τους απόσταση ίση με ένα Tab.

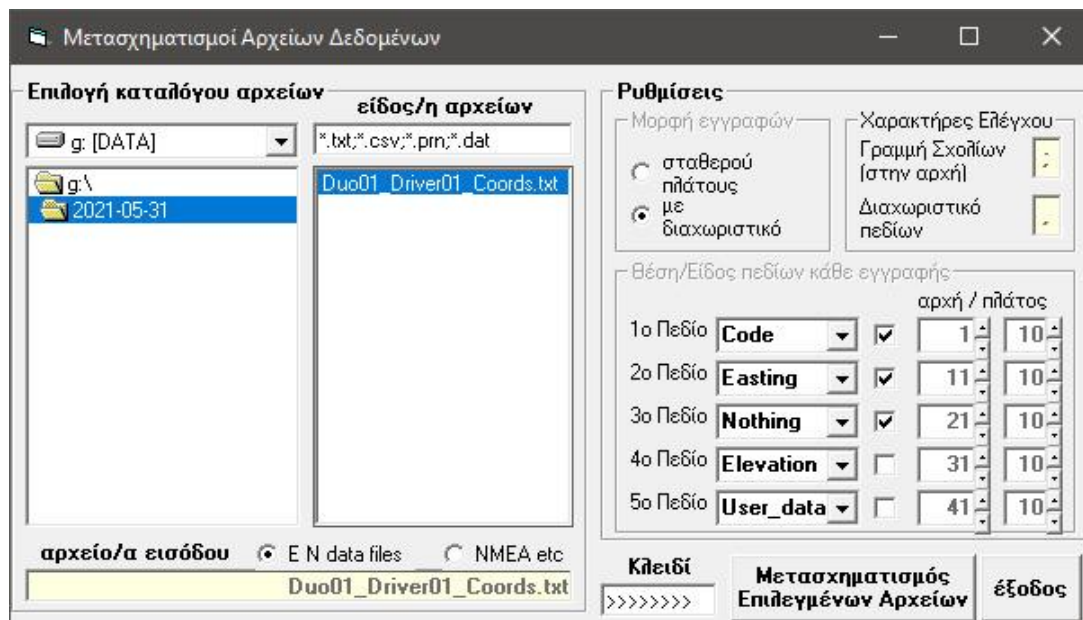
Το πρόγραμμα COORD\_GR, όμως, απαιτεί οι αριθμοί στο αρχείο εισόδου να διαχωρίζονται μεταξύ τους με κόμμα και όχι με κενά. Επομένως, χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μια ακόμη αλλαγή στο αρχείο κειμένου.

Επιλέγοντας “Edit”→”Replace” στο σημειωματάριο, δόθηκε η εντολή όλοι οι χαρακτήρες Tab που βρέθηκαν, να αντικατασταθούν με χαρακτήρες κόμμα. Πλέον, το αρχείο κειμένου ήταν έτοιμο για να τροφοδοτηθεί στο COORD\_GR. Η τελική αυτή μορφή απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.42*.



*Εικόνα 4.42* Το αρχείο εισόδου στο πρόγραμμα COORD\_GR.

Επιστρέφοντας στο πρόγραμμα COORD\_GR, επιλέχθηκε η “Χρήση αρχείων”. Το γραφικό περιβάλλον χρήστη απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.43*. Επιλέχθηκε το ζητούμενο αρχείο εισόδου από τη λίστα στα αριστερά και συμπληρώθηκε το κλειδί στο σχετικό πεδίο. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις παρέμειναν ως είχαν. Κατόπιν, επιλέχθηκε το κουμπί “Μετασχηματισμός Επιλεγμένων Αρχείων”.



*Εικόνα 4.43* Η σελίδα μετασχηματισμού συντεταγμένων από αρχείο στο πρόγραμμα COORD\_GR.

Το αρχείο εξόδου δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό και έχει την ίδια ονομασία με το αρχείο εισόδου, με τη μόνη διαφορά ότι προστίθεται κάθε φορά το πρόθεμα



“GR87.”. Απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.44* και πέρα από τα τελικά νούμερα περιλαμβάνει και μια επεξηγηματική κεφαλίδα, με πληροφορίες για το μετασχηματισμό που μόλις έλαβε χώρα. Όσον αφορά στους αριθμούς, η διάταξη είναι η ίδια με αυτή του αρχείου εισόδου. Δηλαδή, κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα στίγμα GPS και περιλαμβάνει με τη σειρά ένα μετρητή, τη συντεταγμένη X (m) και τη συντεταγμένη Y (m). Οι τρεις αυτοί αριθμοί διαχωρίζονται με κόμμα και οι συντεταγμένες είναι πλέον στο ΕΓΣΑ 87.

```

GR87.Duo01_Driver01_Coords.txt - Notepad
File Edit Format View Help
: Αρχή_κεφαλίδας
: Πρόγραμμα Μετασχηματισμού: COORD_GR Version 1.6.0
: Χρόνος Μετασχηματισμού: 27-Jun-21 23:24:53
: Η χρήση των δεδομένων και του προγράμματος γίνεται με δική σας ευθύνη -
: δεν έχει γίνει πλήρης έλεγχος
: Προέλευση δεδομένων - από Γ.Σ.Α.: ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ '84 (WGS84) φ, λ Προβολή:
: Γεωδαιτικές Συν/νες
: Προορισμός δεδομένων - σε Γ.Σ.Α.: ΕΓΣΑ '87, ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΜΕΡΚΑΤΟΡΙΚΗ
: Προβολή: Εγκάρσια Μερκατορική
: Εκτιμώμενη ακτίνα κύκλου σφάλματος (= ~3X RMS_ERROR): 1.20 m
: Αυτή η ακτίνα κύκλου σφάλματος ισχύει μόνο μέσα στα όρια του Γ.Σ.Α. -
: εδώ δεν έγινε τέτοιος έλεγχος
: Συντεταγμένες σε μέτρα
: Τέλος_κεφαλίδας
:
1,489189.260,4202286.199
2,489189.285,4202286.177
3,489189.272,4202286.196
4,489189.285,4202286.208
5,489189.365,4202286.168
6,489189.431,4202286.140
7,489189.450,4202286.103
8,489189.441,4202286.137
9,489189.463,4202286.032
10,489189.475,4202286.099
    
```

*Εικόνα 4.44* Τα περιεχόμενα του αρχείου εξόδου του προγράμματος COORD\_GR.

### 4.2.3 Βάση δεδομένων τροχιών

Οι συντεταγμένες που μετασχηματίζονται κάθε φορά απεικονίζουν την τροχιά που ακολούθησε ένα όχημα σε όλη τη διάρκεια που αυτό κινούνταν στη διαδρομή του πειράματος. Τα χρονικά διαστήματα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, από όλη αυτήν την κίνηση, είναι αυτά που το όχημα προσπερνούσε ή προσπερνούσαν και άρα οι τροχιές ενδιαφέροντος αποτελούν ένα μικρό υποσύνολο των συνολικών τροχιών. Κρίθηκε, επομένως, αναγκαίο να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων, όπου οι συντεταγμένες που αποτελούν την τροχιά ενός οχήματος αποθηκεύονται, μαζί με ορισμένες ακόμα πληροφορίες που χρησιμεύουν στη μετέπειτα ανάλυση.

Για το λόγο αυτό, οι συντεταγμένες που προέκυψαν από το COORD\_GR μεταφέρθηκαν πίσω στο αρχείο Excel “Coordinate Conversion.xlsx”, με αντιγραφή από το σημειωματάριο και τελικά επικόλληση στις στήλες K, L και M, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.40*. Στη στήλη N συμπληρώνεται αυτόματα η ώρα (UTC) που αντιστοιχεί στο κάθε στίγμα, στη μορφή hh:mm:ss.sss, όπου hh η ώρα σε μορφή 24ώρου, mm το λεπτό της ώρας και ss το δευτερόλεπτο και .sss το κλάσμα του δευτερολέπτου, στρογγυλοποιημένο στο πρώτο δεκαδικό (ένας αριθμός και δύο μηδενικά να τον ακολουθούν). Στη στήλη O συμπληρώνεται αυτόματα η ταχύτητα του οχήματος κάθε χρονική στιγμή,

εκφρασμένη σε m/s. Μάλιστα, επειδή η ταχύτητα στο πρότυπο NMEA δίνεται σε κόμβους (kn), χρησιμοποιείται για τη μετατροπή η σχέση  $1\text{kn}=0.51444\text{m/s}$ . Και οι δύο στήλες αυτές δέχονται δεδομένα από το πρώτο φύλλο εργασίας του αρχείου, δηλαδή από τα δεδομένα NMEA του οχήματος.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα των στηλών L, M, N και O αντιγράφηκαν και μεταφέρθηκαν σε ένα εκ των προτέρων ειδικά διαμορφωμένο αρχείο Excel, το οποίο αποτελεί μέρος της βάσης δεδομένων. Το αρχείο αυτό, με ονομασία “DriverDuoOverview.xlsx” απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.45*. Τα δεδομένα επικολλήθηκαν στις στήλες A, B, C και D αντίστοιχα, ξεκινώντας από τη γραμμή 13.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date	31-05-21	Driver Duo ID	01	Driver in Rover 1	01	Driver in Rover 2	02
2								
3	Start UTC	Finish UTC			Start UTC	Finish UTC		
4	hh:mm:ss.sss	hh:mm:ss.sss			hh:mm:ss.sss	hh:mm:ss.sss		
5	12	12			12	12		
6	Other Rover UTC				Other Rover UTC			
7	hh:mm:ss.sss				hh:mm:ss.sss			
8	12	Rover 1 - Copy			12	Rover 2 - Copy		
9								
10								
11	Rover 1				Rover 2			
12	Longitude GGRS87	Latitude GGRS87	UTC	V <sub>NMEA</sub>	Longitude GGRS87	Latitude GGRS87	UTC	V <sub>NMEA</sub>
13	X (m)	Y (m)	hh:mm:ss.sss	m/s	X (m)	Y (m)	hh:mm:ss.sss	m/s
14								
15								
16								
17								
18								

*Εικόνα 4.45* Το ειδικά διαμορφωμένο αρχείο που λειτουργεί ως βάση δεδομένων για τις τροχιές.

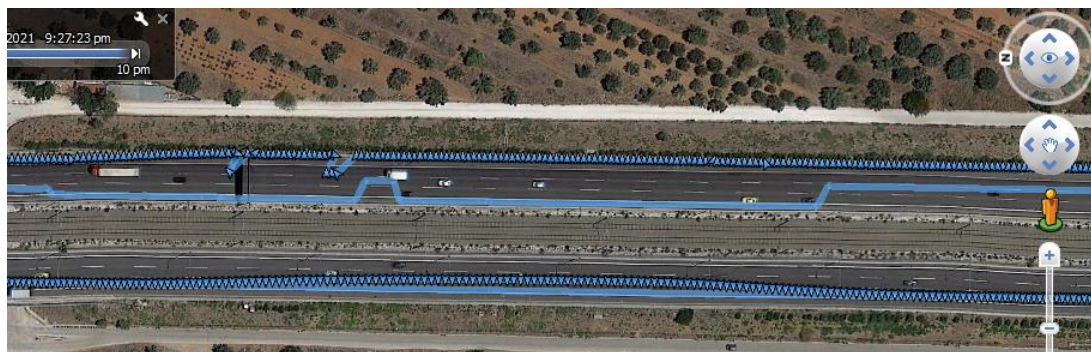
Με αυτό το βήμα ολοκληρώθηκε το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας της τροχιάς, δηλαδή η επεξεργασία στο επίπεδο της συνολικής οδήγησης του ενός οδηγού. Πλέον, τα δεδομένα που αφορούν στο συγκεκριμένο οδηγό είναι εξασφαλισμένα. Επιστρέφοντας στο αρχείο “CoordinateConversion.xlsx”, τα δεδομένα εισόδου που σχετίζονται με τον εν λόγω οδηγό διαγράφονται και έτσι το αρχείο είναι έτοιμο να υποδεχτεί το πακέτο δεδομένων για τον επόμενο οδηγό. Ειδικότερα, στο πρώτο φύλλο διαγράφηκαν όλα τα δεδομένα NMEA που είχαν επικολληθεί δεξιά και κάτω από το κελί A3, ενώ στο δεύτερο φύλλο εργασίας διαγράφηκαν τα περιεχόμενα των στηλών K, L και M από τη γραμμή 3 και κάτω. Με τον τρόπο αυτό, το αρχείο μετατροπής συντεταγμένων είναι μοναδικό και εξοικονομήθηκε μεγάλη ποσότητα χρόνου και χώρου, σε σχέση με το να δημιουργούνταν ένα αρχείο για τον κάθε οδηγό. Η διαδικασία που αναλύεται παραπάνω επαναλήφθηκε για όλους τους οδηγούς, έως ότου αποθηκεύτηκαν στα αντίστοιχα αρχεία οι μετασχηματισμένες συντεταγμένες για όλες τις τροχιές.

Το φύλλο αποθήκευσης των τροχιών, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.45* αποτελείται διάφορα μέρη. Στο πάνω μέρος συμπληρώνονται (κίτρινα πεδία) η ημερομηνία που καταγράφηκαν οι εν λόγω τροχιές, ο αύξοντας αριθμός του ζεύγους οδηγών (κελί D1) και ο αύξοντας αριθμός του κάθε ενός από τους δύο οδηγούς που αποτελούσαν το ζεύγος

(κελιά F1 και H1). Επειδή σε μια προσπέραση συμμετέχουν δύο οχήματα, αποφασίστηκε ότι είναι βολικότερο οι δύο τροχιές να αποθηκεύονται στο ίδιο φύλλο. Τα δύο οχήματα ονομάστηκαν αυθαίρετα ως “Rover 1” και “Rover 2”.

Κάθε βάση δεδομένων πρέπει να διαθέτει τη δική της ενσωματωμένη μηχανή αναζήτησης και φυσικά η παρούσα δεν θα μπορούσε να αποτελεί εξαίρεση. Η περιοχή A3:B5 λειτουργεί ως μηχανή αναζήτησης για την τροχιά του Rover 1. Συγκεκριμένα, για να αναζητηθούν οι συντεταγμένες για μια χρονική στιγμή τοποθετείται στο κελί A4 (ή στο κελί B4) η ακριβής ώρα (UTC, hh:mm:ss.sss) και εμφανίζεται στο κελί A5 (ή στο κελί B5 αντίστοιχα) ο αριθμός της γραμμής που περιέχει τα ζητούμενα δεδομένα. Μάλιστα, εκτός από τα δεδομένα για μια μόνο χρονική στιγμή μπορούν να εξαχθούν ταχύτητα και τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε ένα χρονικό διάστημα. Στο κελί A4 τοποθετείται η ακριβής ώρα έναρξης και στο κελί B4 η ακριβής ώρα λήξης. Έπειτα, πατώντας το κουμπί “Rover 1 – Copy” αντιγράφονται τα δεδομένα που βρίσκονται στις στήλες A, B, C και D και που οριοθετούνται από τις δύο δοθείσες χρονικές στιγμές. Με εντελώς όμοιο τρόπο λειτουργεί και η μηχανή αναζήτησης για την τροχιά του Rover 2, η οποία βρίσκεται στην περιοχή E3:F5.

Αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή της βάσης δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μια πρωτογενής μείωση δεδομένων (primary data reduction) και από ολόκληρη την τροχιά του κάθε οχήματος προσδιορίστηκαν τα τμήματα εκείνα που αντιπροσωπεύουν προσπεράσεις. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της απεικόνισης στο Google Earth Pro, εισάγοντας κάθε φορά το αρχείο τύπου NMEA του εκάστοτε οχήματος και αναζητώντας οπτικά μοτίβα που να προσομοιάζουν στο συγκεκριμένο ελιγμό. Μια τυπική προσπέραση είναι αρκετά ευδιάκριτη με αυτή τη μέθοδο απεικόνισης. Για παράδειγμα, στην *Εικόνα 4.46* εντοπίζεται μια προσπέραση στην κατεύθυνση που βρίσκεται στο κάτω μέρος της εικόνας, δηλαδή στο ρεύμα που κινείται προς το Νότο.



*Εικόνα 4.46* Οπτικός εντοπισμός μιας προσπεράσης στο Google Earth Pro.

Στον εντοπισμό των προσπεράσεων βοήθησαν και τα πρωτόκολλα καταγραφής που συμπληρώνονταν σε πραγματικό χρόνο στο πείραμα, στα οποία σημειωνόταν η αδρή ώρα πραγματοποίησης της κάθε προσπεράσης, καθώς και η ζώνη προσπεράσης στην οποία λάμβανε χώρα. Ένα μέρος τέτοιου συμπληρωμένου πρωτοκόλλου απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.47*, όπου για παράδειγμα στις 22:39, ο οδηγός που έχει αύξοντα αριθμό 15 προσπέρασε τον οδηγό που έχει αύξοντα αριθμό 16, στη ζώνη προσπεράσης 1.

Co-driver Overtaking Data Recording Protocol

Overtaking ID	Hunter	Bait	Start UTC	Finish UTC	Zone	Comments
Ldp 01	16	15	22:38		1	
	15	16	22:39		1	
70 km/h	16	15	22:40		1	
	15	16	22:40		1	
	16	15	22:42		2	
	15	16	22:42		2	
	16	15	22:45		3	

Εικόνα 4.47 Μέρος από πρωτόκολλο καταγραφής προσπεράσεων που συμπληρώθηκε επιτόπου στο πείραμα.

Αφού εντοπίστηκε μια προσπέραση στο Google Earth Pro, αναζητήθηκε το σημείο αρχής και πέρατος και φυσικά οι χρονικές στιγμές στις οποίες αυτά αντιστοιχούν. Σε αυτό βοήθησε πολύ η δυνατότητα να εμφανίζονται πληροφορίες για το κάθε στίγμα GPS, όταν επιλέγεται κάποιο από τα μικρά βέλη που αποτελούν την τροχιά του οχήματος. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.48.



Εικόνα 4.48 Τα βέλη που αποτελούν την τροχιά στο Google Earth Pro εμπεριέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το στίγμα GPS.

Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκαν αδρά τα σημεία αρχής και πέρατος όλων των προσπεράσεων. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί, πως αυτή η μέθοδος εμπεριέχει αβεβαιότητες και υπάρχει η πιθανότητα να μη ληφθεί υπόψη κάποιο τμήμα της προσπεράσης, το οποίο θα έπρεπε να συμπεριληφθεί. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο κίνδυνος λήφθηκαν δύο μέτρα αντιμετώπισης. Πρώτον, κάθε φορά που προσδιοριζόταν οπτικά το σημείο εκκίνησης (αντίστοιχα πέρατος) μιας προσπεράσης, λαμβανόταν υπόψη ένας αυθαίρετος συντελεστής ασφαλείας και το εκάστοτε σημείο τελικά προσδιοριζόταν “λίγο πιο ανάντη” (αντίστοιχα “λίγο πιο κατάντη”). Έτσι, “σίγουρα” το σημείο αρχής (αντίστοιχα τέλους) θα βρισκόταν μέσα στο τελικό χρονικό διάστημα. Το μέγεθος του συντελεστή ασφαλείας αυτού αποτέλεσε προϊόν της “κρίσης του μηχανικού”. Δεύτερον, ακολουθήθηκε μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμής-απόρριψης (trial and error), κατά την οποία η κάθε φορά θεωρούμενη προσπέραση απεικονιζόταν στο διάγραμμα αξιμύθιων. Αν το αποτέλεσμα ήταν το προσδοκώμενο, τα συνοριακά σημεία οριστικοποιούνταν, ειδάλλως επιλέγονταν διαφορετικά. Αυτός ήταν και ένας τρόπος επαλήθευσης. Σε κάθε περίπτωση, όμως, θεωρούνταν επιπλέον ένα μικρό διάστημα πριν (και μετά) από την πραγματική αρχή (και το πέρας) των προσπεράσεων, ώστε να υπάρχει μια εποπτεία για την οδηγική συμπεριφορά εκατέρωθεν της προσπεράσης, αλλά και να

υπάρχει η δυνατότητα αναπροσαρμογής των συννοριακών σημείων από κάποιον άλλο ερευνητή. Μια ενδεικτική τιμή αυτού του (χρονικού) διαστήματος είναι τα 2s.

Αφού προσδιορίστηκαν τα σημεία αρχής και πέρατος των προσπεράσεων, πραγματοποιήθηκε ένα ακόμη βήμα, το τελευταίο για να ολοκληρωθεί η βάση δεδομένων των προσπεράσεων. Κάθε μια προσπέραση ορίστηκε με σαφήνεια ως μια αλληλουχία στιγμάτων GPS μεταξύ των δύο συννοριακών χρονικών στιγμών (αρχή και πέρας) και έλαβε μια μοναδική ονομασία, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί αμφιμονοσήμαντα από κάθε ενδιαφερόμενο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε πάνω στα ίδια πρωτόκολλα καταγραφής που ήταν ήδη μερικώς συμπληρωμένα από το πείραμα. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην *Εικόνα 4.49*. Στη στήλη “Start UTC” τοποθετήθηκε η χρονική στιγμή αρχής και στη στήλη “Finish UTC” τοποθετήθηκε η χρονική στιγμή πέρατος της κάθε προσπεράσης. Στη στήλη “Overtaking ID” τοποθετήθηκε η μοναδική ονομασία της κάθε προσπεράσης, όπου τα τέσσερα πρώτα ψηφία αναφέρονται στο μήνα και την ημέρα, τα δύο επόμενα στον αύξοντα αριθμό του ζεύγους οδηγών, το επόμενο ψηφίο στην αρχική ταχύτητα της προσπεράσης (7 για 70km/h, 9 για 90km/h) και τα τελευταία δύο ψηφία είναι ο αύξοντας αριθμός της προσπεράσης για το συγκεκριμένο ζεύγος οδηγών. Στη στήλη “Com” υπάρχουν ορισμένα σχόλια για την ποιότητα της προσπεράσης ή για την ποιότητα της επεξεργασίας και είναι βοηθητικά. Τέλος, οι προσπεράσεις που έχουν σημειωθεί με ένα βέλος στα αριστερά της στήλης “Overtaking ID” είναι αυτές που τελικά αξιοποιήθηκαν μερικώς ή ολικώς κατά τη μετέπειτα στατιστική ανάλυση. Σημειώνεται, πως ορισμένες προσπεράσεις που δεν έχουν οριστεί με χρόνο εκκίνησης και πέρατος, όπως η προσπέραση “0615.06.7.09”, δεν ήταν αναγνωρίσιμες στο Google Earth Pro ή στο διάγραμμα αζιμούθιων.

**Co-driver Overtaking Data Recording Protocol**

Overtaking ID	Hunter	Bait	Time	Start UTC	Finish UTC	Zon	Com
<i>Lap 01 - 70 km/h</i>							
→ 0615.06.7.01	16	15	22:38	19:39:00.000	19:39:21.000	1	
→ 0615.06.7.02	15	16	22:39	19:39:31.000	19:39:52.500	1	
→ 0615.06.7.03	16	15	22:40	19:39:54.000	19:40:21.000	1	4, x φάσεις 4&5 καλές.
→ 0615.06.7.04	15	16	22:40	19:40:24.000	19:40:54.200	1	maybe. φ4 & φ5 μόνο.
0615.06.7.05	16	15	22:42	19:42:00	19:42:13	2	κακό GPS
0615.06.7.06	15	16	22:42	19:42:21	19:42:34	2	6, x
0615.06.7.07	16	15	22:46	19:47:01.800	19:47:21.000	3	
0615.06.7.08	15	16	22:55	19:55:27.100	19:55:47.200	4	κακό GPS
0615.06.7.09	16	15	22:55				πολύ κακό GPS
→ 0615.06.7.10	15	16	22:56	19:56:14	19:56:32	4	τακτικά, φάση φ1 μόνο
<i>Lap 09 - 90 km/h</i>							
→ 0615.06.9.11	16	15	23:06	20:06:26.900	20:06:50.000	1	
→ 0615.06.9.12	15	16	23:07	20:07:11.100	20:07:32.500	1	7 L

*Εικόνα 4.49* Μέρος από πρωτόκολλο καταγραφής προσπεράσεων που συμπληρώθηκε πλήρως κατά την επεξεργασία.

Πλέον οι προσπεράσεις που συλλέχθηκαν με το οδικό πείραμα είναι έτοιμες να χρησιμοποιηθούν στο κυρίως μέρος της επεξεργασίας, που αποτελεί και τη ραχοκοκαλιά της παρούσας εργασίας.

#### 4.2.4 Διάγραμμα αζιμούθιων

Για κάθε προσπέραση που υπάρχει στη βάση δεδομένων μορφώθηκε το διάγραμμα αζιμούθιων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι 3.86-3.88, 3.92-3.95 και 3.98-3.101, αφού η τροχιά ενός οχήματος αποτελεί ουσιαστικά μια αλληλουχία σημείων στο

επίπεδο. Μία διαφοροποίηση σε σχέση με τη θεωρία είναι, πως στη συγκεκριμένη εφαρμογή η διεύθυνση κίνησης του οχήματος ήταν πολύ συχνά στην περιοχή των  $0^\circ$  (ή των  $180^\circ$ ) σε σχέση με το Βορρά και τύχαινε οι τετμημένες δύο διαδοχικών στιγμάτων GPS να έχουν ακριβώς την ίδια τιμή. Αυτό συνέβαινε, επειδή η διαδρομή του πειράματος διαθέτει μια μεγάλη ευθεία που είναι προσανατολισμένη στον άξονα Βορρά-Νότου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, επειδή το ημίτονο ισούται με μηδέν, οι 3.93α και 3.94α εμφάνιζαν σφάλμα, καθώς ο παρονομαστής (και ο αριθμητής, βέβαια) γινόταν ίσος με μηδέν. Κατά συνέπεια και η 3.95 εμφάνιζε σφάλμα και η ακτίνα δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί.

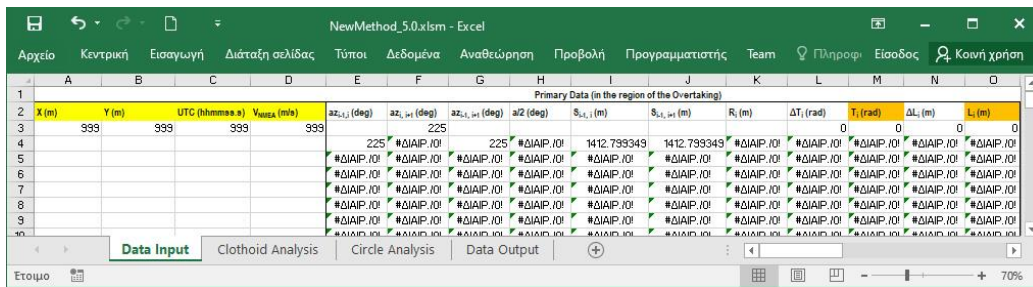
Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε, χρησιμοποιώντας τις 3.93β και 3.94β αντί των 3.93α και 3.94α αντίστοιχα, κάθε φορά που το αζιμούθιο που εισαγόταν στην αντίστοιχη σχέση γινόταν ίσο με  $0^\circ$  (ή  $180^\circ$ ). Οι δύο μέθοδοι είναι μαθηματικώς ισοδύναμες και έτσι δεν επηρεάστηκε το τελικό αποτέλεσμα καθόλου.

Μία ακόμη διαφοροποίηση είναι, πως τύχαινε κάποιες φορές δύο διαδοχικές γωνίες διεύθυνσης του οχήματος να είναι ίσες μεταξύ τους. Αυτό συνέβαινε συνήθως στην αρχή ή το τέλος του ελιγμού, όπου το όχημα ευθυγραμμιζόταν με τη διεύθυνση της οδού ή κατά τη φάση που διερχόταν δίπλα από το προπορευόμενο όχημα, όπου επίσης κινούνταν ευθύγραμμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η 3.92 προέκυπτε ίση με μηδέν και κατά συνέπεια η ακτίνα  $R_i$  δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί με την 3.95, καθώς στην τελευταία προέκυπτε σφάλμα (μηδέν στον παρονομαστή).

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε, κάνοντας τη θεώρηση ότι σε αυτά τα σημεία η παρεμβολή είναι γραμμική και όχι με κυκλικά τόξα, ώστε να μην προκύπτουν σφάλματα με τα μαθηματικά. Ουσιαστικά, ο έλεγχος που γινόταν είναι κατά πόσο μηδένιζε η τιμή που δίνει η 3.92. Αν αυτό ήταν αληθές, τότε το  $\Delta T_i$  δεν υπολογιζόταν από την 3.98, αλλά θεωρούνταν κατευθείαν ίσο με μηδέν. Παράλληλα, το  $\Delta L_i$  δεν υπολογιζόταν από την 3.99, αλλά από την 3.84. Το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται πως δεν επηρεάστηκε, αφού τα σημεία στα οποία παρατηρήθηκε το παραπάνω φαινόμενο ήταν πολύ λίγα συγκριτικά με το σύνολο των στιγμάτων GPS μιας προσπέρασης. Επιπλέον, το όποιο σφάλμα είναι πρακτικά μη μετρήσιμο στις εφαρμογές της οδοποιίας. Εξάλλου, αυτή η παραδοχή λειτουργεί ούτως ή άλλως εξαιρετικά καλά σε τμήματα της τροχιάς τα οποία είναι ευθύγραμμα.

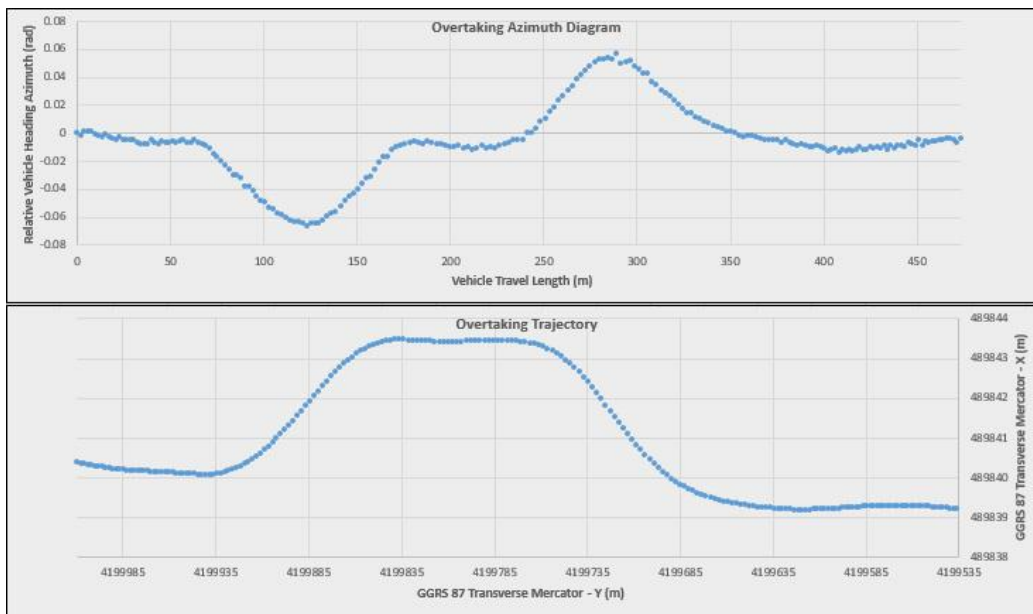
Οι μαθηματικοί υπολογισμοί και η μόρφωση των διαγραμμάτων αζιμούθιων πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός αρχείου Excel. Το αρχείο αυτό αποτέλεσε το βασικό πρωτόκολλο επεξεργασίας της παρούσας εργασίας, καθώς σε αυτό συντελέστηκε το σύνολο της επεξεργασίας που αφορούσε στο δεύτερο και το τρίτο στάδιο ή αλλιώς της επεξεργασίας στο επίπεδο της κάθε μιας προσπέρασης και στο επίπεδο της κάθε επιμέρους φάσης. Αναπτύχθηκε δε, έτσι ώστε να δέχεται ως είσοδο τα πρωτογενή δεδομένα της κάθε προσπέρασης (X, Y, Time UTC και NMEA Ground Speed για κάθε χρονική στιγμή) απευθείας από τη βάση δεδομένων των τροχιών, να πραγματοποιεί την πλήρη ανάλυση και να αποθηκεύει τα αποτελέσματα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο φύλλο καταγραφής. Με το που ολοκληρωνόταν η επεξεργασία της προσπέρασης, το αρχείο αυτό φρόντιζε να διαγράψει όλα τα δεδομένα εισόδου και τα προσωρινά δεδομένα που παράχτηκαν κατά την ανάλυση, επαναφέροντας ταυτόχρονα τα αυτοματοποιημένα γραφήματα σε μια κατάσταση αναμονής. Με αυτόν τον τρόπο, ήταν έτοιμο πλέον να δεχτεί

τα δεδομένα εισόδου της επόμενης προσπέρασης και να ξεκινήσει η διαδικασία εκ νέου. Με την ονομασία “NewMethod\_5.0.xlsm”, το ειδικό αυτό αρχείο επεξεργασίας δομήθηκε να κάνει εκτενή χρήση της γλώσσας προγραμματισμού VBA (Visual Basic for Applications) και είναι βελτιστοποιημένο ως προς το συνολικό χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία μιας προσπέρασης. Στην ακόλουθη *Εικόνα 4.50* απεικονίζεται η περιοχή που γινόταν η επικόλληση των δεδομένων εισόδου (κίτρινα κελιά), καθώς και οι τύποι στα βοηθητικά κελιά που πραγματοποιούσαν τους μαθηματικούς υπολογισμούς για την εύρεση της χιλιομετρικής θέσης και του αζιμούθιου. Σημειώνεται, πως οι τιμές “999” ήταν προσωρινές, έως ότου εισάγονταν οι πραγματικές τιμές εισόδου και χρησιμοποιούνταν ως τιμές αναμονής για να μην προκύπτουν σφάλματα στους τύπους.



*Εικόνα 4.50* Ο υπολογισμός του διαγράμματος αζιμούθιων στο αυτοματοποιημένο Excel της επεξεργασίας.

Στο *Σχήμα 4.1* απεικονίζεται (πάνω) το διάγραμμα αζιμούθιων ενός οχήματος που εκτελεί ελιγμό προσπέρασης και (κάτω) η τροχιά που διαγράφει στην οριζοντιογραφία κατά το ίδιο ακριβώς χρονικό διάστημα. Η φορά της κίνησης στην οριζοντιογραφία είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά, ενώ στο διάγραμμα αζιμούθιων είναι εξ ορισμού από τα αριστερά προς τα δεξιά, αφού ακολουθείται η αύξουσα χιλιομέτρηση. Παρόλο που στο εν λόγω σχήμα δεν υφίσταται κάποια μαθηματική αντιστοίχιση μεταξύ των τετμημένων των δύο γραφημάτων, χάριν εποπτείας και με μικρή απόκλιση μπορεί να γίνει η παραδοχή, πως τα σημεία των δύο καμπυλών που ανήκουν στην ίδια κατακόρυφη ευθεία, αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή.



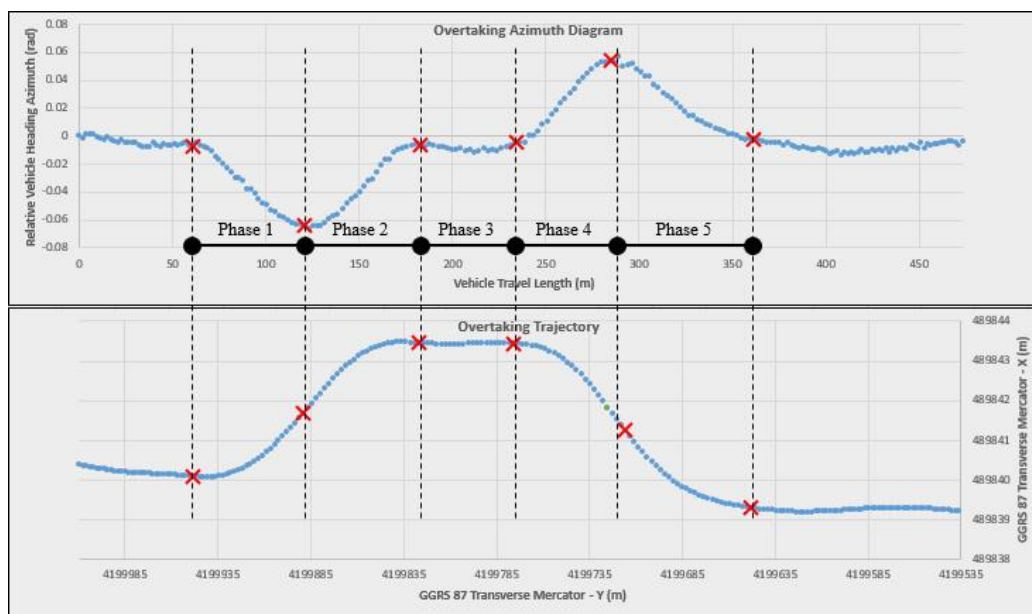
*Σχήμα 4.1* Το διάγραμμα αζιμούθιων (πάνω) και η αντίστοιχη οριζοντιογραφία (κάτω) μιας τυπικής προσπέρασης.

Για το σχήμα αυτό επιλέχθηκε εσκεμμένα μια από τις προσπεράσεις που πραγματοποιήθηκαν στη μεγάλη ευθεία της διαδρομής του πειράματος (ζώνη προσπέρασης 1), ώστε στο γράφημα της τροχιάς να είναι προσανατολισμένη στην κατακόρυφη διεύθυνση. Έπειτα, στον οριζόντιο άξονα του γραφήματος αυτού τοποθετήθηκαν οι συντεταγμένες  $Y$  της Μερκατορικής Προβολής και στον κατακόρυφο άξονα οι συντεταγμένες  $X$ , κάτι που δε συμβαδίζει με την τυπική διάταξη των αξόνων στο ΕΓΣΑ 87. Αυτό έγινε μεμονωμένα για την παρούσα απεικόνιση και αποκλειστικά για να έρθει το γράφημα της οριζοντιογραφίας της προσπέρασης σε οριζόντια μορφή, χωρίς τη χρήση κάποιου μετασχηματισμού στροφής. Έτσι, γίνεται αμέσως εμφανής η αντιστοιχία μεταξύ των σημείων των δύο γραφημάτων.

Επιπλέον, στο ίδιο σχήμα, στο γράφημα της τροχιάς του οχήματος το σύστημα αξόνων είναι μη ορθοκανονικό. Συγκεκριμένα, ο κατακόρυφος άξονας είναι βαθμονομημένος σε μεγαλύτερη κλίμακα από τον οριζόντιο, κατά μια όχι προεπιλεγμένη τιμή. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται άμεσα αντιληπτά τα σημεία εκκίνησης και πέρατος της προσπέρασης και να είναι ευδιάκριτο το ίχνος του ελιγμού στο εν λόγω γράφημα. Δεδομένου πως η χιλιομετρική διαφορά μεταξύ των δύο συνοριακών σημείων μιας προσπέρασης είναι της τάξης των 300m και η μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση του οχήματος περίπου 3.5m, στην περίπτωση που η κλίμακα των δύο αξόνων ήταν ίδια, η προσπέραση πιθανότατα θα διακρινόταν πολύ δύσκολα.

Παρατηρώντας το *Σχήμα 4.1* εξάγονται ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, όσον αφορά στην οριζοντιογραφία φαίνεται αμέσως, πως μια προσπέραση αποτελείται από δύο αλλαγές λωρίδας, μεταξύ των οποίων μεσολαβεί μια ευθυγραμμία. Όσον αφορά στο διάγραμμα αζιμούθιων, όμως, η απεικόνιση είναι ελαφρώς διαφορετική. Συγκεκριμένα, αναγνωρίζονται διαδοχικά ένας κλάδος που κατέρχεται, ένας κλάδος που ανέρχεται, μια οριζόντια ευθεία, ένας κλάδος που ανέρχεται και τέλος ένας κλάδος που κατέρχεται. Επομένως έγινε η θεώρηση, πως μια προσπέραση αποτελείται από πέντε διακριτές φάσεις (phases), οι οποίες φαίνονται στο ακόλουθο *Σχήμα 4.2*, του οποίου το υπόβαθρο προέρχεται από το *Σχήμα 4.1*. Ενώ τα σημεία αρχής και τέλους της κάθε φάσης προσδιορίστηκαν αποκλειστικά από το διάγραμμα αζιμούθιων, στο *Σχήμα 4.2* απεικονίζεται και η αδρή αντιστοιχία των σημείων αυτών με το διάγραμμα της οριζοντιογραφίας. Αυτό βοηθάει στη γρήγορη κατανόηση και τη διασύνδεση των φάσεων με το φυσικό ανάλογο, που δεν είναι άλλο από την ίδια την τροχιά του οχήματος. Συνεπώς, η “Φάση 1” ξεκινάει, όταν ο οδηγός στρίβει προς τα αριστερά το τιμόνι του οχήματος για να εξέλθει από τη λωρίδα του και ολοκληρώνεται, όταν το τιμόνι επανέρχεται στην ουδέτερη θέση, στιγμιαία προτού ο οδηγός ξεκινήσει να το στρίβει προς τα δεξιά. Αυτή η τελευταία ενέργεια σηματοδοτεί την έναρξη της “Φάσης 2”, κατά την οποία το όχημα ευθυγραμμίζεται με το διαμήκη άξονα της αριστερής λωρίδας. Κατά τη “Φάση 3” το όχημα κινείται αποκλειστικά ευθύγραμμα, παράλληλα με το όχημα που προσπερνάται, έως ότου ο οδηγός κρίνει, πως είναι ασφαλές να επιστρέψει στην αρχική λωρίδα κυκλοφορίας. Κατόπιν, πραγματοποιούνται η “Φάση 4” και η “Φάση 5” της προσπέρασης, οι οποίες είναι όμοιες και συμμετρικές με τη “Φάση 1” και τη “Φάση 2”, με τη μόνη διαφορά πως κατά τη “Φάση 4” το όχημα στρίβει δεξιόστροφα και κατά τη “Φάση 5” στρίβει αριστερόστροφα.



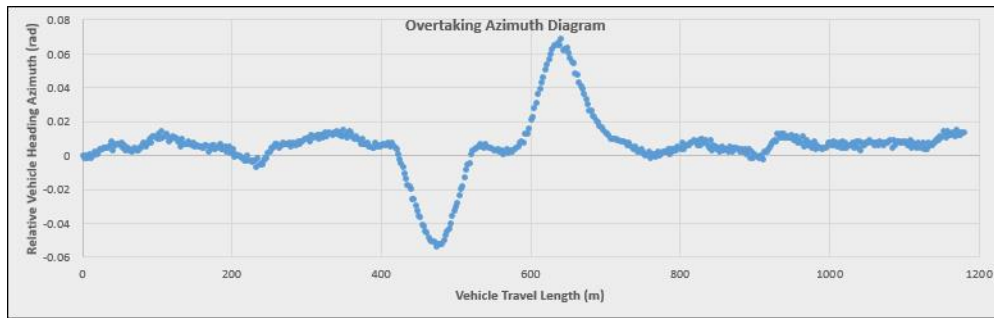


Σχήμα 4.2 Διακριτοποίηση της προσπέρασης σε επιμέρους φάσεις με βάση το διάγραμμα αζιμούθιων.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να τονιστεί, πως η αντιστοιχία που φαίνεται στο Σχήμα 4.2, μεταξύ του διαγράμματος αζιμούθιων και της οριζοντιογραφίας δεν είναι ακριβής. Αντίθετα, αποτελεί απλώς μια αδρή εκτίμηση για τον τρόπο με τον οποίο διαχωρίζονται οι φάσεις στο γράφημα της τροχιάς του οχήματος, ώστε να καταστεί σαφές ποιο τμήμα του ελιγμού περιλαμβάνεται στην κάθε μια από αυτές. Πράγματι, αν η παραπάνω οριζοντιογραφία μελετηθεί ενδελεχώς, διαπιστώνεται, πως τα σημεία τομής με τις διακεκομμένες γραμμές δεν ταυτίζονται πάντα με το σημείο που αναμενόταν να βρίσκεται το σύνορο της εκάστοτε φάσης. Αυτή η απόκλιση υφίσταται, επειδή το διάγραμμα αζιμούθιων έχει ως ανεξάρτητη μεταβλητή (τετμημένη) τη χιλιομετρική θέση του οχήματος, ενώ η οριζοντιογραφία αποτελεί σύνθετη απεικόνιση δύο μεταβλητών που εξαρτώνται από το χρόνο. Επομένως, στον οριζόντιο άξονα της οριζοντιογραφίας δεν απεικονίζεται το διανυόμενο μήκος, αλλά η προβολή αυτού. Σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα αναμένεται να έχει μηδενική τιμή στην αρχή της προσπέρασης και να αυξάνεται, καθώς αποπερατώνεται ο ελιγμός. Η μέγιστη τιμή του δε, αναμένεται να είναι μόλις μερικά μέτρα. Χάρην απλοποίησης και για να είναι δυνατή η οπτική αντιστοιχία μεταξύ των δύο γραφημάτων, η απόκλιση αυτή αγνοείται στο συγκεκριμένο σχήμα.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από το Σχήμα 4.1 είναι, πως η απόκλιση του προσανατολισμού ενός οχήματος από τον προσανατολισμό της οδού, κατά τη διάρκεια μιας προσπέρασης, είναι άνω και κάτω φραγμένη. Μια ενδεικτική απόλυτη τιμή του φράγματος αυτού είναι τα 0.06rad, τιμή που είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη μέση απόκλιση στην οποία ασυναίσθητα υποπέφτει ένας οδηγός, καθώς οδηγεί σε ευθυγραμμία. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, αλλά και τη μονοτονία των διαδοχικών κλάδων του διαγράμματος αζιμούθιων, καθορίστηκε το πρότυπο που πρέπει να αναγνωριστεί στο τελευταίο, ώστε μια ακολουθία σημείων να θεωρηθεί προσπέραση. Σαν αποτέλεσμα, μια προσπέραση ξεχωρίζει χωρίς αμφιβολία μέσα σε ένα τμήμα του διαγράμματος αζιμούθιων. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται το διάγραμμα αζιμούθιων για την κίνηση ενός οχήματος σε ένα ευθύγραμμο τμήμα μιας οδού. Παρόλο που θα περίμενε κανείς να υπάρχουν μεγάλα τμήματα του γραφήματος που να είναι οριζόντια, παντού εμφανίζεται έστω και μια μικρή ταλάντωση του αζιμούθιου,

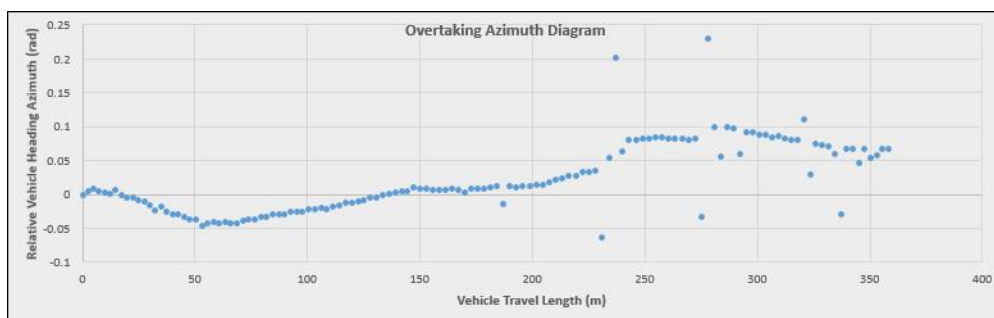
ενδεικτικού εύρους  $0.01\text{rad} < 0.06\text{rad}$ . Ωστόσο, πολύ γρήγορα εντοπίζεται η προσπέραση, η οποία εκτείνεται από τη Χ.Θ.  $L \approx 400\text{m}$  έως και τη Χ.Θ.  $L \approx 700\text{m}$ .



Σχήμα 4.3 Εντοπισμός προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων.

Το Σχήμα 4.1 αποτελείται από καταγραφές που συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση του οδικού πειράματος, απεικονίζει δηλαδή μια πραγματική προσπέραση. Η διαδοχή των σημείων πραγματοποιείται εξαιρετικά ομαλά στο διάγραμμα αζιμούθιων και επιπρόσθετα οι φάσεις 1, 2, 4 και 5 είναι καλά διαχωρισμένες μεταξύ τους. Εντούτοις, μπορεί να θεωρηθεί ως μια τέλεια εκδοχή προσπέρασης και αναμένεται να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα στη μετέπειτα επεξεργασία που θα υποστεί. Σε αντιδιαστολή, παρατηρήθηκαν ορισμένες προσπεράσεις, οι οποίες παρουσίασαν υποδεέστερης ποιότητας απεικονίσεις στο διάγραμμα αζιμούθιων.

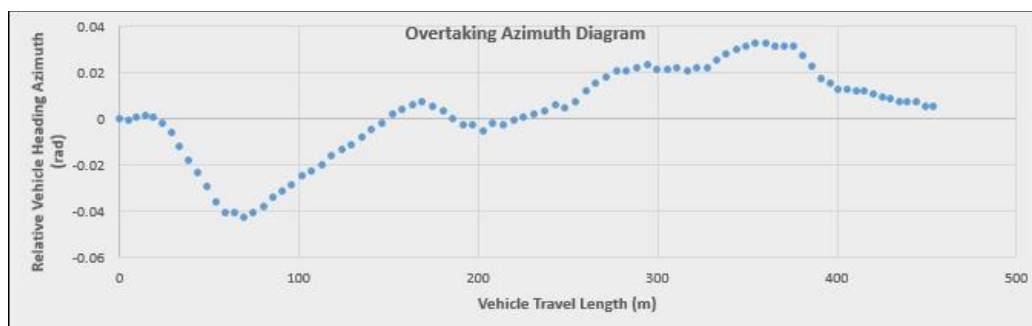
Γενικά αυτού του είδους οι προσπεράσεις εντάχθηκαν σε δυο κατηγορίες, με κριτήριο την αιτία που προκάλεσε την υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Από τη μια μεριά, ο βασικός περιοριστικός παράγοντας κατά την εκτέλεση του οδικού πειράματος ήταν ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης των οχημάτων. Αρκετές φορές, εξαιτίας κάποιου υπερυψωμένου εμποδίου στην περιοχή του πειράματος ή της κακής επίλυσης με την τεχνική RTK, τα στίγματα GPS εμπεριείχαν μεγάλη απόκλιση από την πραγματική θέση του οχήματος. Ως συνέπεια, η επίλυση των εξισώσεων οδηγούσε σε διάγραμμα αζιμούθιων που απέκλινε από την αναμενόμενη μορφή που δείχτηκε στο Σχήμα 4.1. Σε αυτήν την κατηγορία η κακή ποιότητα οφείλεται στα όργανα και τη μέθοδο συλλογής δεδομένων. Ένα παράδειγμα τέτοιου διαγράμματος αζιμούθιων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4, στο οποίο η Φάση 1, η Φάση 2 και η Φάση 3 είναι ευδιάκριτες και έχουν την προσδοκώμενη ποιοτική μορφή, ενώ η Φάση 4 και η Φάση 5 παρουσιάζουν πολύ διασκορπισμένες τιμές. Είναι προφανές, πως τέτοια μεγάλη μεταβολή του αζιμούθιου του οχήματος είναι πρακτικώς αδύνατο να πραγματοποιηθεί, επομένως η πιθανότερη αιτία είναι η υποβάθμιση του σήματος του GPS εκείνο το χρονικό διάστημα, μάλλον εξαιτίας κάποιου εμποδίου πάνω από την οδό.



Σχήμα 4.4 Υποβάθμιση της ποιότητας του διαγράμματος αζιμούθιων που οφείλεται στο GPS.

Από την άλλη μεριά, ένας εξίσου κρίσιμος παράγοντας κατά την εκτέλεση του οδικού πειράματος ήταν οι ίδιοι οι οδηγοί. Υπενθυμίζεται, πως το πείραμα στηρίχτηκε σε εθελοντές οδηγούς, οι οποίοι μάλιστα δεν ήταν μνημένοι στο σκοπό της παρούσας εργασίας. Συνεπώς, δεν μπορούσαν να γνωρίζουν ποια προσπέραση θεωρείται “καλή”, γεγονός που εν μέρει αυξάνει την αμεροληψία και την τυχαιότητα του στατιστικού δείγματος. Εντούτοις, οδήγησε επίσης και στην εκτέλεση προσπεράσεων που βρέθηκε πως αποκλίνουν από τη θεωρητική μοντελοποίηση που εδραιώθηκε με το Σχήμα 4.1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του διαγράμματος αξιμούθιων, από τη σκοπιά της οδοποιίας. Επομένως, σε αυτήν την κατηγορία η κακή ποιότητα οφείλεται, εν αγνοία των ίδιων, στην οδηγική συμπεριφορά των εθελοντών.

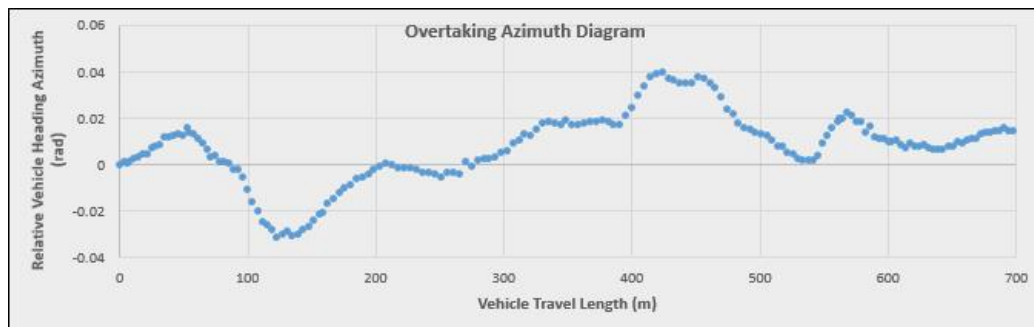
Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται ένα παράδειγμα τέτοιας προσπέρασης, όπου ενώ η Φάση 1 και η Φάση 2 είναι καλά αποτυπωμένες, κατά τη Φάση 3 η κίνηση του οχήματος δεν ήταν ακριβώς ευθύγραμμη, ενώ η Φάση 4 και η Φάση 5 αποκλίνουν σημαντικά από την προσδοκώμενη μορφή. Ειδικότερα, παρότι η Φάση 4 ξεκινάει στη Χ.Θ.  $L \approx 250\text{m}$  και ανέρχεται, στη συνέχεια το διάγραμμα αξιμούθιων οριζοντιώνεται ( $L \approx 310\text{m}$ ) και στη συνέχεια ανέρχεται εκ νέου. Αυτό σημαίνει, πως ο οδηγός αντί να έχει στραμμένο το τιμόνι συνεχώς προς τα αριστερά, το έστριψε για λίγο προς τα αριστερά, κατόπιν το έφερε στην ουδέτερη θέση για λίγο και κινήθηκε ευθύγραμμη και ακολούθως το ξανά-έστριψε προς τα αριστερά για λίγο. Η πιθανότερη αιτία για αυτή τη συμπεριφορά είναι, πως ο οδηγός επιχείρησε να επανέλθει στη δεξιά λωρίδα υπερβολικά σταδιακά και ομαλά. Επιπλέον, η Φάση 5, η οποία ξεκινάει στη Χ.Θ.  $L \approx 380\text{m}$ , περιέχει ένα σημείο απότομης μεταβολής της καμπυλότητας της κίνησης του οχήματος, στη Χ.Θ.  $L \approx 400\text{m}$ . Αυτό δεν είναι καλή πρακτική, καθώς υπονοεί ρισοκίνδυνη και απότομη οδήγηση, με την οποία καταστρατηγείται η οδική ασφάλεια και επιβαρύνονται με δυσάρεστες επιταχύνσεις οι επιβάτες του οχήματος.



Σχήμα 4.5 Υποβάθμιση της ποιότητας του διαγράμματος αξιμούθιων που οφείλεται στην οδηγική συμπεριφορά.

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται ένα ακόμη παράδειγμα προσπέρασης που αποκλίνει από την ιδεατή οδηγική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η Φάση 2 ( $130\text{m} \leq L \leq 200\text{m}$ ) φαίνεται να είναι καλά αποτυπωμένη, ενώ αντίθετα στη Φάση 1 ( $60\text{m} \leq L \leq 130\text{m}$ ) παρατηρείται ένα σημείο απότομης μεταβολής της καμπυλότητας στη Χ.Θ.  $L \approx 100\text{m}$ . Επιπρόσθετα, ενώ διαθέτει ευδιάκριτο σημείο εκκίνησης, η Φάση 3 δεν είναι ξεκάθαρο σε ποια Χ.Θ. ολοκληρώνεται. Ανάλογα, η Φάση 4 δε διαθέτει ευδιάκριτο σημείο εκκίνησης, ενώ στο σημείο που αναμενόταν να υπάρχει ένα ξεκάθαρο ολικό μέγιστο του αξιμούθιου ( $L \approx 425\text{m}$ ) το διάγραμμα παρουσιάζει μια ιδιομορφία. Και σε αυτήν την περι-

πτωση, η πιθανότερη αιτία για αυτήν την ποιοτικά κατώτερη απεικόνιση του διαγράμματος αζιμούθιων είναι η έλλειψη αποφασιστικότητας κατά την εκτέλεση της προσπέρασης και η νευρική οδήγηση από την πλευρά του οδηγού.



Σχήμα 4.6 Ένα ακόμη διάγραμμα αζιμούθιων που η μορφή του αποκλίνει από την προσδοκώμενη.

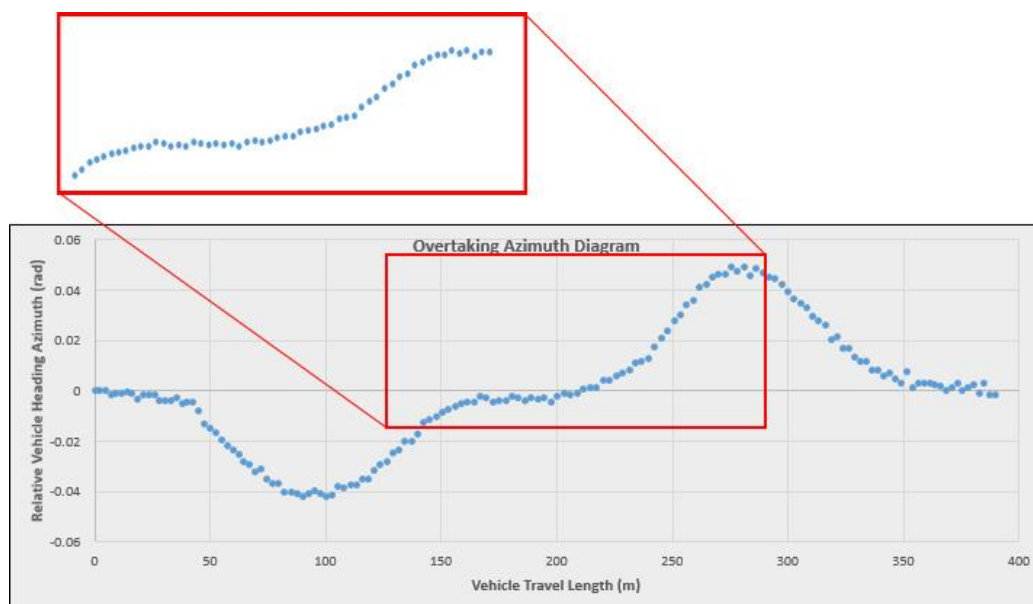
Η ειδοποιός διαφορά και ταυτόχρονα η ισχυρότερη ένδειξη για την αιτία που προκαλούσε την απεικόνιση ποιοτικά αμφιλεγόμενων διαγραμμάτων αζιμούθιων ήταν το κατά πόσο η διακριτή συνάρτηση του αζιμούθιου ήταν “συνεχής”. Με άλλα λόγια, αν τα διαδοχικά αζιμούθια σε μια προσπέραση ήταν πάντα κοντά το ένα στο άλλο, τότε πιθανότατα έφταιγε η οδηγική συμπεριφορά. Αντίθετα, αν τα διαδοχικά αζιμούθια ήταν στην πλειοψηφία τους “κοντά” το ένα στο άλλο, εκτός από έναν πεπερασμένο αριθμό σημείων, τα οποία βρίσκονταν “πολύ μακριά” από τα υπόλοιπα, τότε πιθανότερη αιτία ήταν η ποιότητα του σήματος GPS.

Στις προσπεράσεις με κακή ποιότητα GPS δεν θα είχε νόημα να χρησιμοποιηθούν οι εκάστοτε “κακές” φάσεις στην εξαγωγή των γεωμετρικών παραμέτρων, αφού η ύπαρξη διάσπαρτων σημείων θα αλλοίωνε σε πολύ μεγάλο βαθμό το αριθμητικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, στις προσπεράσεις με κακή οδηγική συμπεριφορά δεν θα είχε επίσης νόημα να χρησιμοποιηθούν οι εκάστοτε “κακές φάσεις”, αφού τότε οι εξαγόμενες παράμετροι ενδεχομένως να προέκυπταν ποιοτικά λανθασμένες. Για παράδειγμα, έστω εφαρμογή πολυωνυμικής παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού σε ένα πακέτο δεδομένων, των οποίων η πλειοψηφία εμφανίζουν πολύ μικρή διασπορά, εκτός από ελάχιστα, τα οποία είναι πολύ απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα. Αν η παραβολή που προσαρμόζεται προκύψει να στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ από τη θεωρία αναμενόταν να στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω, τότε το τελικό αποτέλεσμα εμπεριέχει ποιοτικό σφάλμα. Αντίθετα, αν η παραβολή που προσαρμόζεται προκύψει με την αναμενόμενη μορφή, αλλά με πολύ μικρό συντελεστή προσδιορισμού, τότε το τελικό αποτέλεσμα εμπεριέχει ποσοτικό σφάλμα και ευθύνονται τα λίγα “κακά σημεία”, τα οποία “ρίχνουν” υπερβολικά το  $R^2$ .

Παρόλα αυτά μια προσπέραση, στην απεικόνιση της οποίας ορισμένες φάσεις είναι ποιοτικά υποβαθμισμένες, ενδέχεται να διαθέτει και ορισμένες φάσεις που ποιοτικά θεωρούνται αποδεκτές. Αυτό αποδεικνύεται στο Σχήμα 4.5, όπου η Φάση 1 και η Φάση 2 διαθέτουν την αναμενόμενη από τη θεωρία μορφή. Δεδομένου πως οι πέντε φάσεις δύνανται να αποτελέσουν ανεξάρτητες οντότητες σε κάποιες αναλύσεις και για να εμπλουτιστεί περαιτέρω το στατιστικό δείγμα, αποφασίστηκε να ληφθούν υπόψη κατά την εξαγωγή των παραμέτρων όλες οι προσπεράσεις που διέθεταν έστω και μια αξιοποιήσιμη φάση. Συνεπώς, το στατιστικό δείγμα διαχωρίστηκε στις προσπεράσεις που αξιοποιήθηκαν πλήρως και σε αυτές που αξιοποιήθηκαν μερικώς.

Αμέσως μετά τη μόρφωση του διαγράμματος αζιμούθιων καθορίστηκαν τα σημεία αρχής και πέρατος για κάθε μια από τις πέντε φάσεις της προσπέρασης. Η επιλογή αυτή στηρίχθηκε στην “κρίση του μηχανικού” και δεν είναι υποχρεωτικό να υπάρχει ταύτιση απόψεων μεταξύ διαφορετικών ερευνητών. Αντίθετα, είναι μάλλον αναμενόμενο να υπάρχουν αποκλίσεις στο ποιο σημείο θα επέλεγε ο κάθε ερευνητής ως συνοριακό σημείο μιας φάσης. Θα ήταν πιο επιστημονικά ορθό, αν η μέθοδος καθορισμού των συνοριακών σημείων ήταν αλγοριθμική. Εντούτοις, παρότι το πρόβλημα αυτό διερευνήθηκε ενδελεχώς, κρίθηκε υπερβολικά περίπλοκο και ως εκ τούτου ασύμφορο, δεδομένου πως η διαφορά στην ακρίβεια θα προέκυπτε μάλλον μικρή. Το αντικείμενο αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει ένα αυτοτελές αντικείμενο διπλωματικής εργασίας, με τίτλο “Επινόηση ευρετικών κανόνων για τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου έναρξης μιας προσπέρασης”.

Ειδικά στις προσπεράσεις που το χρονικό βήμα των καταγραφών GPS ήταν 0.1s και που ο οδηγός έστριβε αρκετά αργά το τιμόνι για να μεταβάλλει κάθε φορά τη διεύθυνση κίνησής του, δεν ήταν ευδιάκριτο το ακριβές σημείο αρχής ή πέρατος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, έπαυε να έχει νόημα η χρήση της έννοιας “σημείο” αρχής και ήταν ορθότερο να χρησιμοποιείται η έννοια “περιοχή” αρχής. Ενδεικτικά, μια τέτοια περιοχή μπορεί να αποτελούνταν από τρία, τέσσερα ή περισσότερα σημεία. Τις περισσότερες φορές, ακριβώς επειδή οι διαφορές στη χιλιομετρική θέση και το αζιμούθιο των σημείων αυτών ήταν πολύ μικρές, το τελικό αποτέλεσμα επηρεαζόταν ελάχιστα από την επιλογή σημείου και το σφάλμα θα μπορούσε να αγνοηθεί. Το ίδιο πρόβλημα παρατηρήθηκε σχεδόν σε κάθε προσπέραση και εξίσου για τα σημεία αρχής ή πέρατος όλων των φάσεων. Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται σε μεγέθυνση η Φάση 3 και η Φάση 4 μιας προσπέρασης. Παρότι η “περιοχή αρχής” για τη Φάση 4 εντοπίζεται στη Χ.Θ.  $L \approx 200\text{m}$ , η αδυναμία χαρακτηρισμού αποκλειστικά ενός σημείου ως “σημείο αρχής” είναι προφανής.

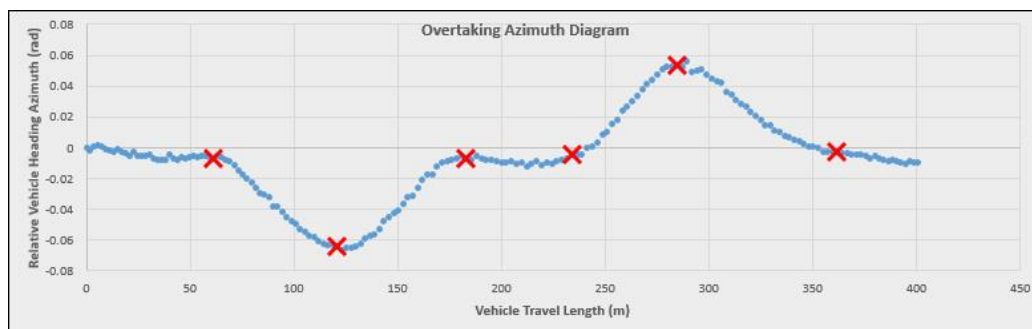


Σχήμα 4.7 Μεγέθυνση της “περιοχής αρχής” για τη Φάση 4 της προσπέρασης.

Σημειώνεται, πως κατά τον καθορισμό των επιμέρους φάσεων πραγματοποιήθηκε η θεμελιώδης παραδοχή, πως το σημείο πέρατος της προηγούμενης φάσης ταυτίζεται με

το σημείο αρχής της επόμενης. Επιπλέον, η Φάση 3 ορίστηκε ως συνάρτηση της Φάσης 2 και της Φάσης 4 και συγκεκριμένα ως το διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στο σημείο πέρατος της μιας και το σημείο αρχής της άλλης. Αυτό είχε ως συνέπεια, η Φάση 3 να έχει ορισμένες φορές μηδενικό μήκος και έτσι πρακτικά να μην συναντάται στην εν λόγω προσπέραση. Αυτό συνέβαινε, όταν το σημείο πέρατος της Φάσης 2 και το σημείο αρχής της Φάσης 4 ταυτίζονταν. Το φυσικό ανάλογο αυτού είναι, πως ο οδηγός που προσπερνούσε δεν πραγματοποίησε καθόλου ευθύγραμμη κίνηση στην αριστερή λωρίδα, αλλά με το που το όχημα ευθυγραμμίστηκε ξεκίνησε αμέσως να εισέρχεται πίσω στην δεξιά λωρίδα. Το ότι η Φάση 3 προέκυψε ορισμένες φορές μηδενική δεν επηρέασε στη στατιστική ανάλυση, καθώς ούτως ή άλλως αποτελεί μια βοηθητική φάση.

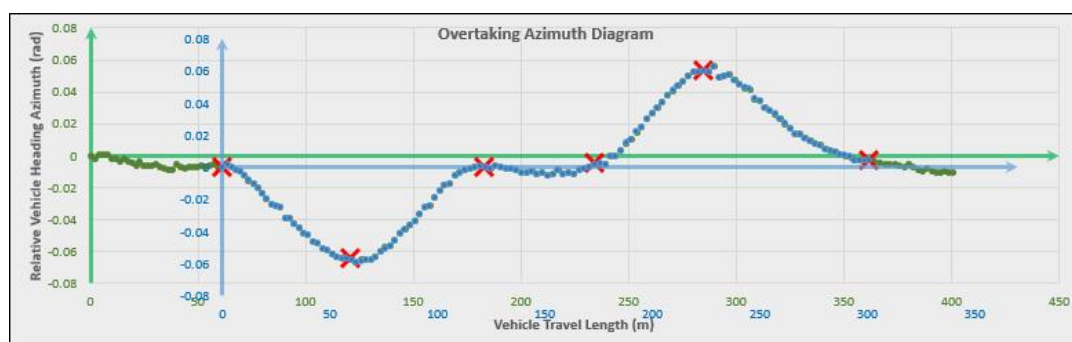
Συνεπώς, για την κάθε προσπέραση απαιτήθηκε ο προσδιορισμός συνολικά έξι σημείων ενδιαφέροντος. Αυτά είναι το σημείο εκκίνησης και το σημείο πέρατος της Φάσης 1, το σημείο πέρατος της Φάσης 2, το σημείο εκκίνησης και το σημείο πέρατος της Φάσης 4 και το σημείο πέρατος της Φάσης 5. Ο καθορισμός των επιμέρους φάσεων πραγματοποιήθηκε πάνω στο διάγραμμα αζιμούθιων της κάθε προσπέρασης. Για καλύτερη εποπτεία και επιλογή του βέλτιστου σημείου κάθε φορά, το κάθε υποψήφιο σημείο επισημαινόταν με ένα κόκκινο “X” πάνω στο διάγραμμα. Έτσι, υπήρχε η δυνατότητα να οπτικοποιηθεί το χιλιομετρικό εύρος της κάθε φάσης και να αποφασιστεί κατά πόσο τα επιλεγμένα σημεία ήταν ικανοποιητικά. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται το διάγραμμα αζιμούθιων μιας προσπέρασης, πάνω στο οποίο διακρίνονται με κόκκινο “X” τα έξι σημεία που διακριτοποιούν τον ελιγμό σε επιμέρους φάσεις. Τα έξι σημεία αυτά που καθορίστηκαν για κάθε προσπέραση καταγράφηκαν μαζί με τα υπόλοιπα αποτελέσματα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς από άλλους ερευνητές που ενδεχομένως επιθυμούν να αναπαράγουν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.8 Καθορισμός των επιμέρους φάσεων μιας προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων.

Στη συνέχεια, με τις πέντε επιμέρους φάσεις της προσπέρασης καθορισμένες, πραγματοποιήθηκε η δευτερογενής μείωση δεδομένων (secondary data reduction) και απομονώθηκαν τα δεδομένα που αφορούν στο καθαρό μέρος του ελιγμού. Η εξαγωγή των ζητούμενων παραμέτρων απαιτούσε τη γνώση της χιλιομετρικής θέσης και του αζιμούθιου για κάθε χρονική στιγμή που ανήκε στα δευτερογενή δεδομένα της προσπέρασης. Με άλλα λόγια, έπρεπε να μορφωθεί εκ νέου το διάγραμμα αζιμούθιων για τα δεδομένα αυτά. Το διάγραμμα αυτό, όμως, δεν προέκυψε με μαθηματικούς υπολογισμούς από τις συντεταγμένες, κάνοντας εκ νέου χρήση των 3.86-3.88, 3.92-3.95 και 3.98-3.101. Αντί αυτού, πραγματοποιήθηκε ένας μετασχηματισμός μετάθεσης των αξόνων του ήδη

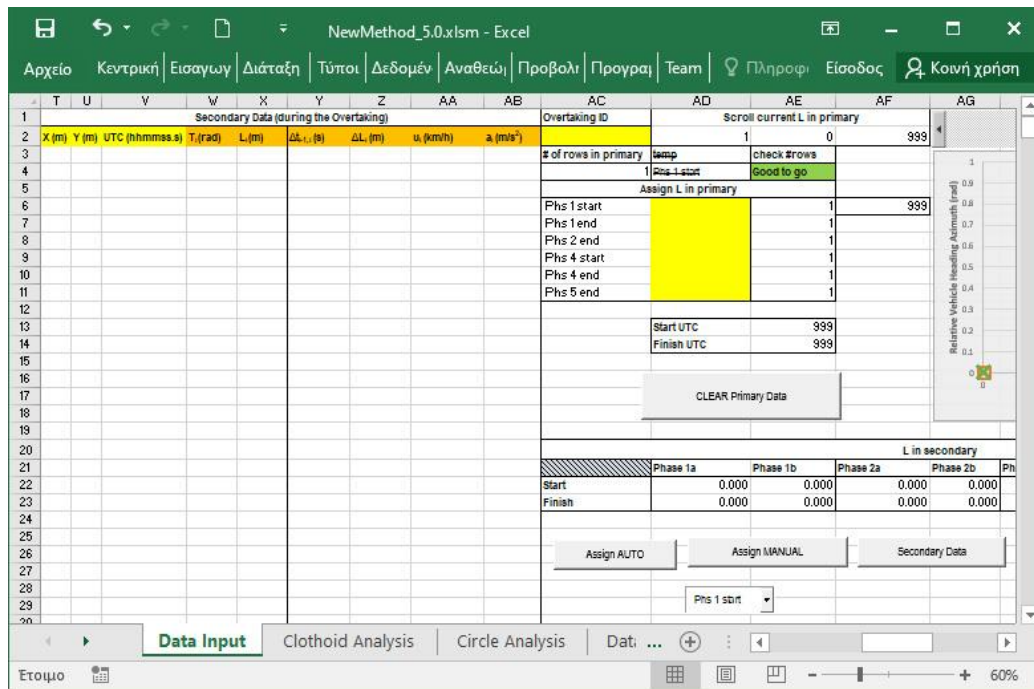
υπάρχοντος (για τα πρωτογενή δεδομένα) διαγράμματος αζιμούθιων και η αρχή των αξόνων μεταφέρθηκε στο σημείο αρχής της Φάσης 1 της προσπέρασης. Υπολογιστικά αυτό επιτεύχθηκε πολύ εύκολα, αφαιρώντας από κάθε ζεύγος χιλιομετρικής θέσης και αζιμούθιου που ανήκε στα δευτερογενή δεδομένα, τη χιλιομετρική θέση και το αζιμούθιο του σημείου αρχής της Φάσης 1 της προσπέρασης. Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται αυτός ο μετασχηματισμός και η μετάθεση του συστήματος συντεταγμένων από τα πρωτογενή (πράσινοι άξονες, πράσινα και μπλε σημεία) στα δευτερογενή (μπλε άξονες, μπλε σημεία) δεδομένα.



Σχήμα 4.9 Μόρφωση του διαγράμματος αζιμούθιων για τα δευτερογενή δεδομένα με χρήση μετάθεσης των αξόνων.

Εκτός από πολύ την εύκολη εφαρμογή και το μικρό υπολογιστικό κόστος, το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν “χάνονται” σημεία κατά την εκτέλεση των υπολογισμών. Υπενθυμίζεται, πως για τον υπολογισμό της χιλιομετρικής θέσης απαιτούνται σε κάθε επανάληψη τρία σημεία, ενώ για τον υπολογισμό του αζιμούθιου δύο σημεία. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα το πρώτο και το τελευταίο σημείο των δευτερογενών δεδομένων να χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά και έτσι δε θα λαμβάνονταν υπόψη κατά την εξαγωγή των ζητούμενων παραμέτρων. Πλέον, όλα τα σημεία λήφθηκαν κανονικά υπόψη στη μετέπειτα ανάλυση.

Επιστρέφοντας στο αρχείο Excel που γινόταν η επεξεργασία, η ανάθεση τιμών στα έξι σημεία ενδιαφέροντος πραγματοποιούνταν πατώντας το κουμπί “Assign AUTO” ή το κουμπί “Assign MANUAL”. Με το πρώτο γινόταν ανάθεση στο κάθε ένα σημείο σειριακά, για λόγους ταχύτητας, ενώ με το δεύτερο γινόταν ανάθεση απευθείας σε κάποιο από τα έξι σημεία, ώστε να μπορεί να διορθωθεί μια τιμή σε περίπτωση που βρισκόταν κάποια καλύτερη. Το ποιο σημείο από τα έξι θα άλλαζε επιλεγόταν από τη λίστα, η οποία βρισκόταν κάτω από το κουμπί “Assign MANUAL”. Τα κουμπιά αυτά και η λίστα είναι ουσιαστικά προγραμματιστικά στοιχεία ελέγχου της VBA. Επιπλέον, πατώντας το κουμπί “Secondary Data” πραγματοποιούνταν η δευτερογενής μείωση δεδομένων, κατά την οποία οι συντεταγμένες, η χρονική στιγμή, η ταχύτητα του οχήματος, η χιλιομετρική θέση και το αζιμούθιο που αντιστοιχούσαν στις χρονικές στιγμές ανάμεσα στην αρχή της Φάσης 1 και το πέρας της Φάσης 5 αντιγράφονταν στις σχετικές στήλες. Ταυτόχρονα με τη μεταφορά γινόταν και η μετάθεση των αξόνων που περιγράφηκε παραπάνω. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην ακόλουθη Εικόνα 4.51.



Εικόνα 4.51 Ο καθορισμός των επιμέρους φάσεων και η δευτερογενής μείωση δεδομένων στο αρχείο Excel της επεξεργασίας.

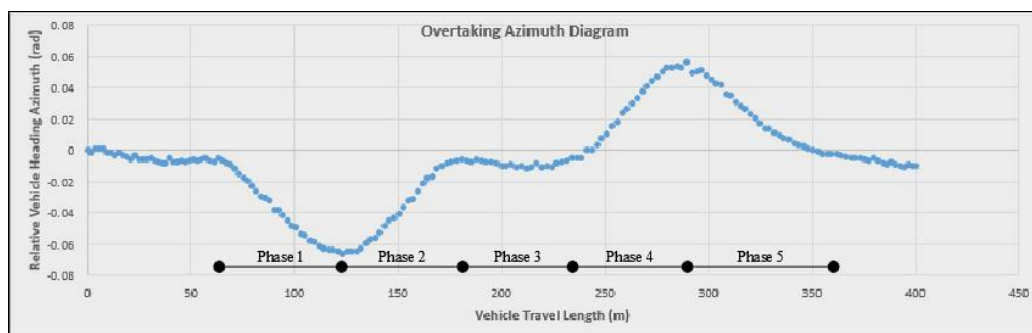
Παράλληλα, τα δευτερογενή δεδομένα διαχωρίστηκαν επιπρόσθετα και αποθηκεύτηκαν προσωρινά σε πέντε επιμέρους πίνακες, κάθε ένας εκ των οποίων αφορούσε και σε μια από τις πέντε φάσεις της προσπέρασης. Στην περίπτωση που η Φάση 3 προέκυπτε να έχει μηδενικό μήκος, στον πίνακα που αντιστοιχούσε σε αυτή δε γινόταν καμία εκχώρηση δεδομένων. Έτσι, ο πίνακας αυτός παρέμενε άδειος. Ο κάθε τέτοιος πίνακας διέθετε δύο στήλες, μια για τη χιλιομετρική θέση και μια για το αξιμούθιο που αντιστοιχεί σε αυτή και μεταβλητό αριθμό γραμμών.

Με αυτό το βήμα ολοκληρώθηκε το δεύτερο στάδιο της επεξεργασίας της τροχιάς, δηλαδή η επεξεργασία στο επίπεδο της προσπέρασης, κατά το οποίο η κάθε μια από αυτές λογίστηκε ως ανεξάρτητη οντότητα.

#### 4.2.5 Μέθοδος κύκλων

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.2, μια προσπέραση διακριτοποιείται σε πέντε επιμέρους φάσεις. Το πρόβλημα είναι η μαθηματική προτυποποίηση του ελιγμού της προσπέρασης, αλλά είναι αρκετά σύνθετο για να επιλυθεί μια και έξω. Μια καλή προσέγγιση είναι να κατακερματιστεί το αρχικό πρόβλημα σε άλλα, μικρότερα προβλήματα, τα οποία είναι πιο απλά, γρήγορα και εύκολο να επιλυθούν. Με βάση αυτό το σκεπτικό, οι πέντε φάσεις της προσπέρασης θεωρήθηκε ότι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και η εξαγωγή παραμέτρων πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για την κάθε μια από αυτές. Η ανεξαρτησία αυτή σημαίνει, πως στην οριζοντιογραφία κάθε φάση αναπαρίσταται και από μια διαφορετική γεωμετρική καμπύλη. Επιδιώχθηκε, επομένως, ο αριθμητικός προσδιορισμός παραμέτρων για αυτές τις καμπύλες. Στο Σχήμα 4.10 υπενθυμίζονται οι πέντε διακριτές φάσεις μιας προσπέρασης.

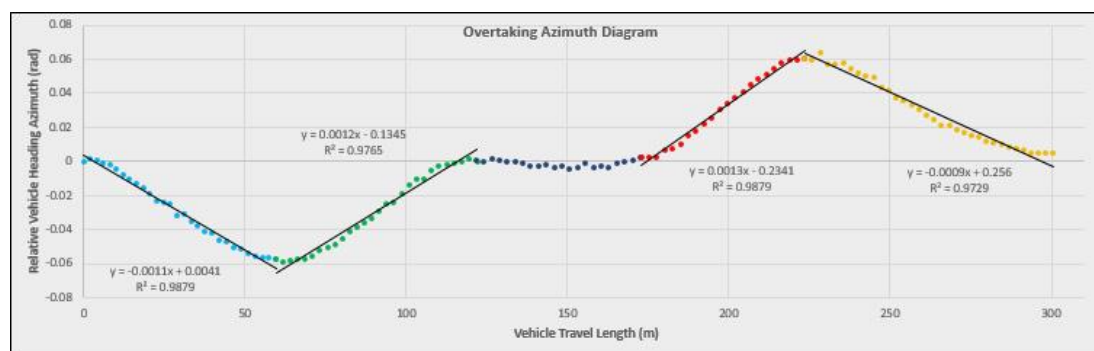




Σχήμα 4.10 Οι πέντε φάσεις μιας προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων.

Έγινε η παρατήρηση, πως τα διαδοχικά σημεία μιας φάσης του διαγράμματος αζιμούθιων σχηματίζουν αμυδρά μια ευθεία γραμμή. Επομένως, δεν θα ήταν παράλογο να ισχυριστεί κάποιος, πως η κάθε φάση δύναται να προσομοιωθεί με ένα ευθύγραμμο τμήμα. Εξάλλου, αυτό θα ήταν βολικό και από την υπολογιστική σκοπιά, μιας και είναι γνωστό, πως η ευθεία αποτελεί την απλούστερη και πιο εύκολα διαχειρίσιμη γεωμετρική καμπύλη. Ύστερα, οι παράμετροι του ευθύγραμμου τμήματος αυτού θα χρησιμοποιούνταν για τη μόρφωση μιας καμπύλης στην οριζοντιογραφία, η οποία θα περιέγραφε μαθηματικώς την τροχιά του οχήματος κατά τη συγκεκριμένη φάση της προσπέρασης.

Ως μέθοδος προσαρμογής ενός ευθύγραμμου τμήματος στα σημεία μιας φάσης στο διάγραμμα αζιμούθιων επιλέχθηκε η γραμμική παλινδρόμηση. Γνωρίζοντας εκ των προτέρων το σημείο αρχής και το σημείο πέρατος της φάσης, αναζητήθηκε το ευθύγραμμο εκείνο τμήμα, το οποίο εμφάνιζε το μικρότερο σφάλμα προσαρμογής στα δεδομένα. Το σφάλμα αυτό υπολογιζόταν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Επιπλέον, η αξιολόγηση της τελικής λύσης πραγματοποιούνταν με τη χρήση του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ . Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα αζιμούθιων μιας προσπέρασης ύστερα από τη δευτερογενή μείωση δεδομένων, με τις πέντε φάσεις χρωματισμένες διαφορετικά για να αναγνωρίζονται. Πάνω στο σχήμα φαίνονται οι γραμμές τάσης που χαράσσονταν κάθε φορά, ως προϊόν της γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς και η τελική εξίσωση ευθείας μαζί με το  $R^2$  που τη χαρακτηρίζει.



Σχήμα 4.11 Εξαγωγή των παραμέτρων από το διάγραμμα αζιμούθιων με τη μέθοδο των κύκλων.

Η Φάση 3 δεν χρήζει κάποιας ιδιαίτερης προσοχής στο στάδιο αυτό, καθώς είναι βοηθητική και θεωρείται ότι απλώς αποτελεί το συνδετικό κρίκο κατά τη μετάβαση του οχήματος από τη μια αλλαγή λωρίδας στην άλλη. Στη συνέχεια, οι εξισώσεις ευθείας

που προέκυψαν από τις γραμμικές παλινδρομήσεις χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν οι ζητούμενες παράμετροι.

Σύμφωνα με τη θεωρία του διαγράμματος αζιμούθιων, μια κεκλιμένη ευθεία στο εν λόγω διάγραμμα αντιστοιχεί σε ένα κυκλικό τόξο στην απεικόνιση της οριζοντιογραφίας. Επιπλέον, σύμφωνα με την 3.106 ο συντελεστής διεύθυνσης της ευθείας αυτής ισούται με το αντίστροφο της ακτίνας καμπυλότητας του εν λόγω κυκλικού τόξου. Με άλλα λόγια, αν  $T=aL+b$  η εξίσωση που προκύπτει με τη γραμμική παλινδρόμηση, τότε  $a=1/R$ , το οποίο ισοδυναμεί με  $R=1/a$ . Η ποσότητα  $a$  αποτελεί την καμπυλότητα της τροχιάς του οχήματος, καθώς αυτό εκτελεί τη φάση μιας προσπέρασης κινούμενο σε κυκλική τροχιά.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα υπολογίστηκαν οι τέσσερις ακτίνες των κυκλικών τόξων, έστω  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$  και  $R_5$ , που αντιστοιχούν στη Φάση 1, τη Φάση 2, τη Φάση 4 και τη Φάση 5. Σημειώνεται, πως η εύρεση της ακτίνας γινόταν αλγεβρικά, δηλαδή με το πρόσημό της. Επομένως, γίνονταν δεκτές και αρνητικές τιμές της ακτίνας, κάτι που δεν είναι παράλογο. Το φυσικό ανάλογο μιας ακτίνας μικρότερης του μηδενός είναι, πως το όχημα κινείται επί μιας αριστερόστροφης καμπύλης. Όμοια, όταν μια ακτίνα προκύπτει μεγαλύτερη του μηδενός σημαίνει, πως το όχημα κινείται επί μιας δεξιόστροφης καμπύλης. Όταν αποθηκεύονταν τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας για την κάθε προσπέραση, όμως, λαμβανόταν κάθε φορά η απόλυτη τιμή της ακτίνας και το πρόσημο αγνοούνταν.

Πέραν από τις ακτίνες των τεσσάρων κύκλων δεν αναζητήθηκαν άλλες παράμετροι. Ο συντελεστής  $b$  ( $T=aL+b$ ) της γραμμικής παλινδρόμησης δεν αξιοποιήθηκε κάπου και αγνοήθηκε. Εξάλλου, με τη μετάθεση των αξόνων κατά τη δευτερογενή μείωση δεδομένων ο συντελεστής  $b$  μεταβλήθηκε σε σχέση με αυτόν που θα προέκυπτε, αν πραγματοποιούνταν γραμμική παλινδρόμηση στο διάγραμμα αζιμούθιων των πρωτογενών δεδομένων. Ως εκ τούτου, θα μπορούσε να λογιστεί ως αυθαίρετος και άνευ σημασίας. Αντίθετα, ο μετασχηματισμός μετάθεσης δεν επηρεάζει καθόλου το συντελεστή  $a$  της γραμμικής παλινδρόμησης, ο οποίος είναι και αυτός που τελικά χρησιμοποιείται.

Η μέθοδος των κύκλων εκτελέστηκε στο αρχείο Excel της επεξεργασίας, δηλαδή στο “NewMethod\_5.0.xlsm”. Στην *Εικόνα 4.52* απεικονίζεται από το αρχείο το φύλλο εργασίας εκείνο, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί. Στις στήλες με πορτοκαλί επικεφαλίδα τοποθετούνταν για κάθε προσπέραση τα δευτερογενή δεδομένα, κατανεμημένα ανά φάση. Κατόπιν, πραγματοποιούνταν γραμμική παλινδρόμηση σε αυτά τα δεδομένα και η εξίσωση που προέκυπτε, μαζί με τον αντίστοιχο συντελεστή προσδιορισμού καταγραφόταν για την κάθε φάση ξεχωριστά. Τέλος, στα πράσινα κελιά υπολογιζόταν αυτόματα η αλγεβρική ακτίνα του κυκλικού τόξου της κάθε φάσης και με βάση το πρόσημο προσδιοριζόταν επιπρόσθετα και η φορά στροφής του. Με τη διαγραφή των δεδομένων της εκάστοτε προσπέρασης από το αρχείο Excel διαγράφονταν και τα δεδομένα εισόδου στο φύλλο εργασίας “Circle Analysis”, ώστε αυτό να είναι έτοιμο για την επεξεργασία της επόμενης προσπέρασης.

Εικόνα 4.52 Η μέθοδος κύκλων στο αρχείο επεξεργασίας Excel.

Γνωρίζοντας τις ακτίνες των τεσσάρων κύκλων και μεταβαίνοντας στην οριζοντιογραφία της τροχιάς, η κάθε φάση θα μπορούσε να αντικατασταθεί από το κυκλικό τόξο αντίστοιχης ακτίνας. Σε αυτό το σημείο γίνεται εμφανές και ο βασικός λόγος που χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα αξιμούθιων έναντι της οριζοντιογραφίας. Η εναλλακτική στη γραμμική παλινδρόμηση, για να υπολογιστούν οι ακτίνες, θα ήταν η πραγματοποίηση ανάλυσης παλινδρόμησης με καμπύλη αναφοράς το κυκλικό τόξο. Στη συνέχεια θα αναζητούνταν το τόξο εκείνο, το οποίο θα προσαρμοζόταν καλύτερα στα υπάρχοντα στίγματα GPS. Είναι προφανές, πως η πολυπλοκότητα και το υπολογιστικό κόστος θα εκτοξεύονταν, ουσιαστικά χωρίς λόγο. Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται η οριζοντιογραφία της τροχιάς ενός οχήματος που εκτελεί προσπέραση, μαζί με τα τέσσερα κυκλικά τόξα που προσαρμόστηκαν και υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των κύκλων. Στο εν λόγω σχήμα, το όχημα θεωρείται πως κινούνται από τα αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.12 Η οριζοντιογραφία μιας προσπέρασης υπό τη θεώρηση ότι κάθε φάση αποτελείται από ένα κυκλικό τόξο.

Γίνεται εμφανής η έμπνευση για την ονομασία της μεθόδου ως “Μέθοδος κύκλων”. Οι ασυνέχειες που προκύπτουν στην οριζοντιογραφία στα σημεία μετάβασης από τη Φάση 1 στη Φάση 2 και από τη Φάση 4 στη Φάση 5 θα μπορούσαν να αγνοηθούν, καθώς κατά την εύρεση των παραμέτρων των κύκλων δεν λογαριάστηκαν καθόλου οι συνοριακές συνθήκες. Θεωρητικά, σε μια πιο εκτενή επίλυση του προβλήματος αυτό το πρόβλημα δύναται να αντιμετωπιστεί. Εντούτοις, εγείρονται δύο σημαντικά ζητήματα, τα οποία δε θα ήταν ορθό να αγνοηθούν.

Πρώτον, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.12, η προσαρμογή των κυκλικών τόξων στην τροχιά του οχήματος δεν είναι τέλεια. Είναι πολύ καλή, αλλά αφήνεται να εννοηθεί, πως θα μπορούσε να είναι και καλύτερη. Ισοδύναμα, αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και παρατηρώντας το Σχήμα 4.11, με τη διαφορά ότι αξιολογείται η προσαρμογή των ευθύγραμμων τμημάτων στο διάγραμμα αξιμούθιων. Φαίνεται, πως το ευθύγραμμο

τμήμα περιγράφει πολύ καλά τα σημεία περίξ του μέσου της εκάστοτε φάσης, ενώ οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στις περιοχές της αρχής και του πέρατος. Σε αυτά τα σημεία υπάρχει μια υπόνοια καμπύλωσης του διαγράμματος αζιμούθιων, την οποία δεν είναι δυνατό να παρακολουθηθεί με τη γραμμική παλινδρόμηση.

Δεύτερον, η τροχιά με τα μαύρα κυκλικά τόξα στο *Σχήμα 4.12* αποτελεί μια κακή τροχιά, σε όρους οδοποιίας και οδικής ασφάλειας. Ένα όχημα που θα την ακολουθούσε, στα σημεία μετάβασης από τον ένα κύκλο στον άλλο θα δεχόταν πολύ έντονες εγκάρσιες επιταχύνσεις, ως αποτέλεσμα της εξωφρενικής σημειακής μεταβολής της καμπυλότητας. Το φυσικό ανάλογο θα ήταν, για παράδειγμα, να κινείται ένα όχημα επί μιας στροφής και ξαφνικά ο οδηγός να περιστρέψει το τιμόνι στιγμιαία, κατά μια πολύ μεγάλη γωνία, προς την αντίθετη κατεύθυνση. Φυσικά, κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ δύσκολο για τους επιβάτες και πολύ ριψοκίνδυνο.

Ωστόσο, το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι, πως πρόκειται για μια εξαιρετικά απλή στη σύλληψη μαθηματική προσομοίωση. Ως τέτοια, μπορεί να εφαρμόζεται εύκολα και με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος. Παράλληλα, δεν απέχει πάρα πολύ από την πραγματικότητα, όταν χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Ένα παράδειγμα είναι, όταν επιζητείται μια προσεγγιστική εκτίμηση του μήκους που θα απαιτήσει μια προσπέραση, σε ένα πραγματικό σενάριο οδήγησης σε μια επαρχιακή οδό. Σε καμία περίπτωση, όμως, δεν συστήνεται να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ακριβείας, όπως στη χάραξη μιας ιδεατής τροχιάς, την οποία θα κληθεί να ακολουθήσει το όχημα που προσπερνάει.

Συμπερασματικά, τα παραπάνω ζητήματα δικαιολογούν και εν μέρει επιτάσσουν την αναζήτηση ενός καλύτερου μαθηματικού μοντέλου, το οποίο να περιγράφει σε μεγαλύτερο βαθμό την κίνηση του οχήματος μέσα στη φάση και να ανταποκρίνεται καλύτερα στους φυσικούς περιορισμούς της προσπέρασης.

#### 4.2.6 Μέθοδος κλωθοειδών

Παρατηρήθηκε εκ νέου το *Σχήμα 4.11*, με ιδιαίτερη έμφαση στη συμπεριφορά του διαγράμματος αζιμούθιων κοντά στην αρχή και το πέρας της κάθε φάσης. Η μικρή καμπύλωση της αλληλουχίας των σημείων υπήρχε σε όλες σχεδόν τις επιμέρους φάσεις, όλων σχεδόν των προσπεράσεων. Επομένως δεν θα μπορούσε να συνιστά μεμονωμένο γεγονός. Αποφασίστηκε, λοιπόν, να πραγματοποιηθεί και πάλι παλινδρόμηση, αλλά αυτή τη φορά πολυωνυμική και μάλιστα δευτέρου βαθμού. Έτσι, αντί να επιχειρείται να προσαρμοστεί στα δεδομένα ένα ευθύγραμμο τμήμα, θα επιχειρούνταν να προσαρμοστεί στα δεδομένα μια παραβολή δευτέρου βαθμού. Έτσι, μια καμπύλη γραμμή πιθανότατα θα περιέγραφε τις μικρές καμπυλώσεις στα άκρα των φάσεων καλύτερα από μια ευθεία γραμμή.

Την ίδια στιγμή, αναζητήθηκε εκτενώς ένα μαθηματικό προσομοίωμα για τον ελιγμό της προσπέρασης, το οποίο να είναι ορθότερο από τη σκοπιά της οδοποιίας. Παρατηρήθηκε δε, στη βιβλιογραφία, πως οι τροχιές συνεχούς καμπυλότητας χαίρουν πολύ μεγάλης εκτίμησης από τους ερευνητές. Η πιο απλή γεωμετρική καμπύλη, η οποία δια-

θέτει συνάρτηση καμπυλότητας συνεχή ως προς το μήκος είναι η κλωθοειδής. Μάλιστα, η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια εκτενέστατα ως τόξο συναρμογής στο σχεδιασμό οδών υψηλών ταχυτήτων κυκλοφορίας.

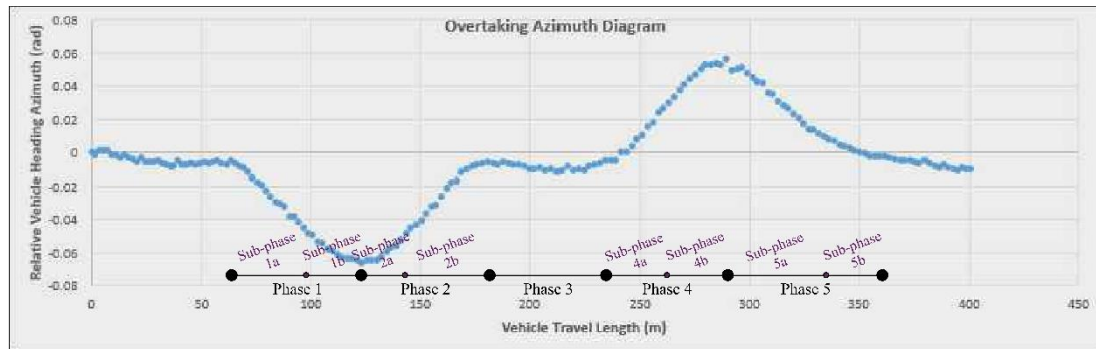
Οι δύο παραπάνω σκέψεις αποτελούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις του ίδιου προβλήματος, από τη σκοπιά του μαθηματικού και από τη σκοπιά του οδοποιού αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται, όμως, από τη θεωρία, πως η απεικόνιση μιας κλωθοειδούς καμπύλης στο διάγραμμα αζιμούθιων δεν είναι άλλο από μια παραβολή δευτέρου βαθμού. Και οι δύο προσεγγίσεις, λοιπόν, ουσιαστικά συγκλίνουν στο ίδιο συμπέρασμα. Τέθηκε, επομένως, το ερευνητικό ερώτημα του κατά πόσο θα μπορούσε ένας ελιγμός προσπέρασης να μοντελοποιηθεί με διαδοχικά τόξα κλωθοειδών.

Δεδομένων των περιορισμών που επιβάλλει η απαίτηση για συνεχή συνάρτηση καμπυλότητας, η πιθανή διάταξη των διαδοχικών τόξων κλωθοειδούς ήταν συγκεκριμένη. Ουσιαστικά, μια επιμέρους φάση της προσπέρασης θεωρήθηκε ότι αποτελείται από μια τυπική καμπύλη, της οποίας όμως το κυκλικό τόξο είναι σημειακό. Με άλλα λόγια, για κάθε φάση χρησιμοποιήθηκε η αλληλουχία τόξο κλωθοειδούς εισόδου-τόξο κλωθοειδούς εξόδου. Το κυκλικό τόξο δεν εισήχθη στο μοντέλο, επειδή αφενός μεν το μήκος μιας φάσης δεν εγείρει την ανάγκη για χρήση ακόμη ενός γεωμετρικού στοιχείου, αφετέρου δε επειδή θα αυξανόταν χωρίς λόγο η πολυπλοκότητα του μαθηματικού προσομοιώματος. Εξαιτίας της απουσίας του κυκλικού τόξου, η παραπάνω αλληλουχία αποτελεί πρακτικά μια κλωθοειδή κορυφής. Παρόλο, όμως, που η χρήση της γενικά δε συστήνεται, καθώς αποσυντονίζεται ο οδηγός, στην περίπτωση μιας προσπέρασης οι ακτίνες είναι σχετικά μεγάλες και οι μεταβολές διεύθυνσης αρκετά μικρές. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει λόγος αποφυγής της χρήσης της.

Σε επέκταση των παραπάνω, αν δύο διαδοχικές φάσεις εξεταστούν μαζί, τότε τα τέσσερα διαδοχικά τόξα κλωθοειδούς συνιστούν μια διαφορετική αλληλουχία. Η αλληλουχία αυτή είναι κλωθοειδής κορυφής-αντίρροπη κλωθοειδής κορυφής. Ισοδύναμα, αν εξεταστούν από μια διαφορετική οπτική γωνία, τότε τα τέσσερα τόξα κλωθοειδούς συνιστούν την αλληλουχία τόξο κλωθοειδούς εισόδου-καμπύλη τύπου “S”-τόξο κλωθοειδούς εξόδου. Και οι δύο οπτικές γωνίες είναι σωστές και δεν αλλάζει κάτι στο τελικό αποτέλεσμα. Συμπερασματικά, ένας ελιγμός αλλαγής λωρίδας θεωρήθηκε ότι αποτελείται από τέσσερα διαδοχικά τόξα κλωθοειδούς. Ένα κατατοπιστικό σκαρίφημα αυτής της θεώρησης απεικονίζεται στο *Σχήμα 2.22*. Αν δύο ελιγμοί αλλαγής λωρίδας ενωθούν μεταξύ τους με μια ευθυγραμμία, τότε το μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της προσπέρασης αποτελείται από οκτώ τόξα κλωθοειδούς, χωρισμένα σε δύο ομάδες των τεσσάρων.

Επειδή η κάθε φάση αποφασίστηκε να αποτελείται από δύο τόξα κλωθοειδούς, απαιτήθηκε μια μικρή αναθεώρηση στο πρότυπο της προσπέρασης για να μπορέσει να συμβαδίζει με τον αυξημένο αριθμό των διακριτών γεωμετρικών στοιχείων. Ειδικότερα, κάθε φάση της προσπέρασης διαχωρίστηκε σε δύο επιμέρους υπό-φάσεις (sub-phases), η κάθε μια από τις οποίες θα περιγραφόταν μαθηματικά από ένα τόξο κλωθοειδούς. Το αναθεωρημένο πρότυπο της προσπέρασης με τις ονομασίες των φάσεων απεικονίζεται στο *Σχήμα 4.13*. Επειδή, όμως, στο διάγραμμα αζιμούθιων δεν είναι σαφές το ακριβές σημείο μετάβασης από τη μια υπό-φάση στην επόμενη, το σημείο αυτό του διαχωρισμού δεν καθοριζόταν από το χρήστη. Σε αντίθεση με τον καθορισμό των υπόλοιπων

σημείων μετάβασης μεταξύ των φάσεων, τα εσωτερικά (ως προς τις φάσεις) σημεία διαχωρισμού αποφασίστηκε να καθορίζονται με μαθηματικό τρόπο. Αυτό είχε ως συνέπεια, τα μήκη των δύο υπό-φάσεων που αποτελούν μια φάση να μην είναι γνωστά κατά τη δευτερογενή μείωση δεδομένων. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί, καθώς και η μετέπειτα εξαγωγή των επιθυμητών παραμέτρων αποτέλεσαν τη “μέθοδο κλωθοειδών”.

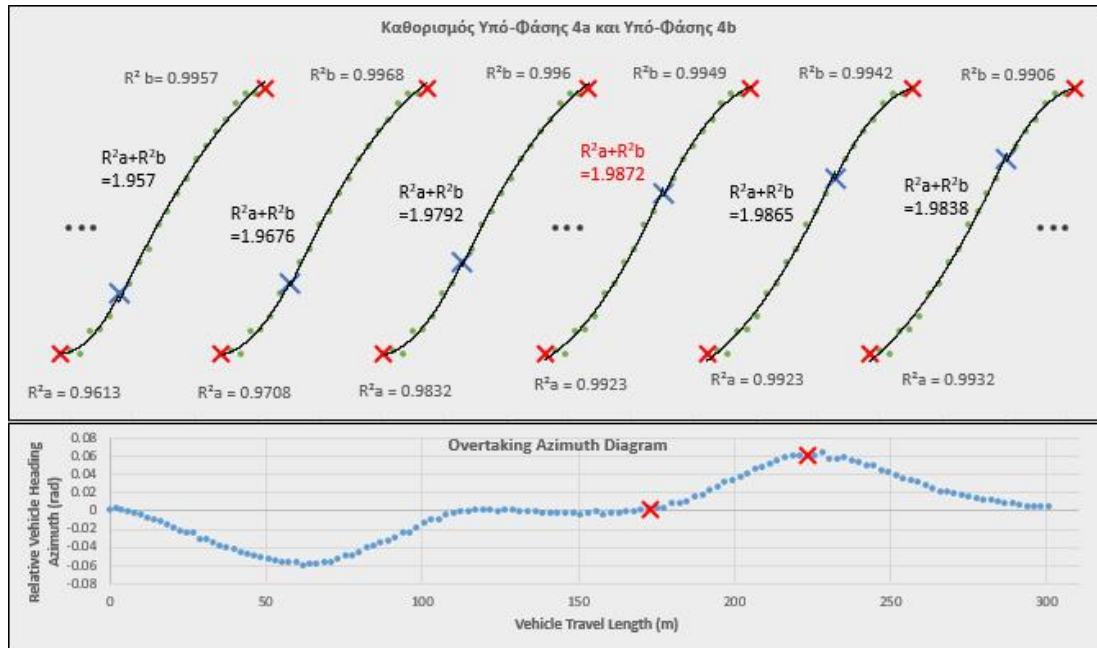


Σχήμα 4.13 Οι φάσεις και οι υπό-φάσεις μιας προσπέρασης στο διάγραμμα αζιμούθιων.

Η παραδοχή πως το σημείο τερματισμού της μιας φάσης αποτελεί το σημείο εκκίνησης της επόμενης επεκτάθηκε να ισχύει και για τα εσωτερικά σημεία μετάβασης μεταξύ των δύο υπό-φάσεων μιας φάσης. Με δεδομένα τα σημεία αρχής και πέρατος μιας φάσης θεωρήθηκε, πως ένα από τα ενδιάμεσα σημεία του διαγράμματος αζιμούθιων αποτελούσε το συνοριακό σημείο των υπό-φάσεων. Έτσι, πραγματοποιήθηκε από μια πολωνυμική παλινδρόμηση δευτέρου βαθμού σε κάθε υπό-φάση και οι δύο εξισώσεις που προέκυψαν καταγράφηκαν σε μια βοηθητική περιοχή του αρχείου επεξεργασίας “NewMethod\_5.0.xlsx”. Μαζί με τις εξισώσεις, οι οποίες ήταν της μορφής  $T=a_1L^2+b_1L+c_1$  και  $T=a_2L^2+b_2L+c_2$ , καταγράφηκαν και οι δύο συντελεστές  $R^2$  που αντιστοιχούσαν σε αυτές. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα ενδιάμεσα σημεία μεταξύ των συνοριακών σημείων της φάσης, δηλαδή πραγματοποιήθηκαν παλινδρομήσεις για όλα τα δυνατά ζεύγη μηκών των δύο υπό-φάσεων. Στη συνέχεια, αθροίστηκαν οι συντελεστές προσδιορισμού των δύο υπό-φάσεων (έστω  $R^2a$  και  $R^2b$ ) για όλες τις περιπτώσεις. Ο συνδυασμός που απέδωσε τη μέγιστη τιμή  $R^2a+R^2b$  θεωρήθηκε και ο ορθότερος προς χρήση, αφού αυτό σημαίνει, πως οι εξισώσεις προσαρμόζονται καλύτερα στα πραγματικά δεδομένα και άρα τα περιγράφουν καλύτερα. Το σημείο εκείνο, για το οποίο παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή του αθροίσματος των δύο επιμέρους συντελεστών προσδιορισμού αποτέλεσε και το τελικό σημείο διαχωρισμού των υπό-φάσεων.

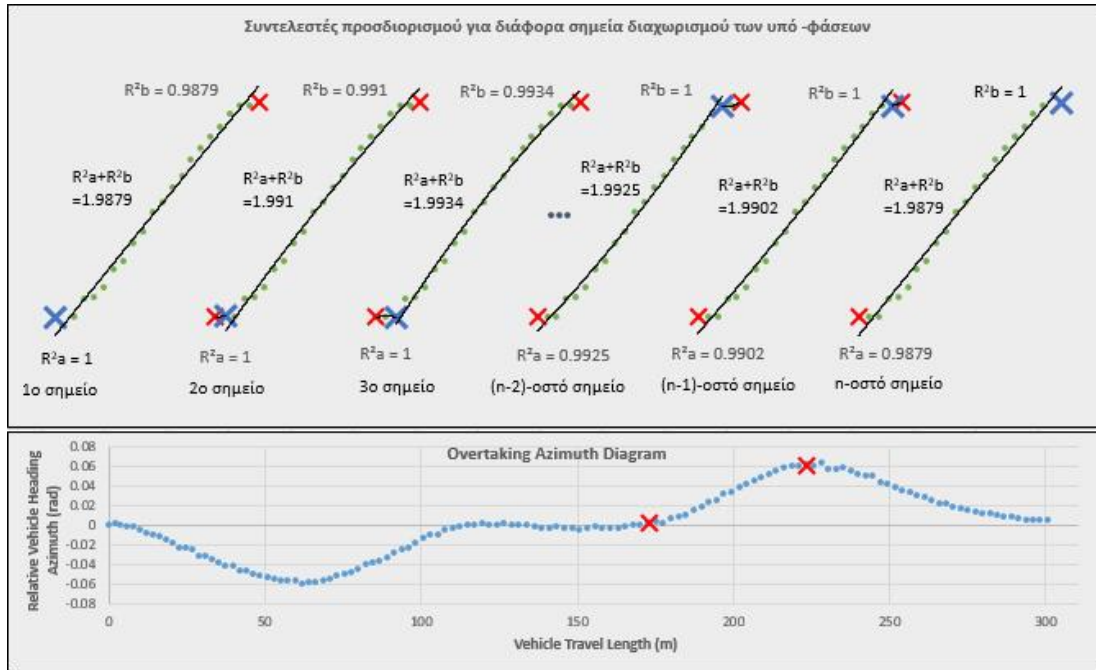
Η επαναληπτική αυτή διαδικασία εξηγείται σκαριφηματικά στο ακόλουθο Σχήμα 4.14. Δεν έχουν χαραχτεί όλα τα δυνατά ζεύγη υπό-φάσεων, επειδή δεν θα χωρούσαν στο σχήμα και αυτό δεν θα ήταν ευανάγνωστο. Εξ αιτίας αυτού, έχουν παρουσιαστεί ορισμένες μόνο περιπτώσεις, οι οποίες κρίθηκαν κατά το δυνατόν ενδεικτικές. Η ύπαρξη περισσότερων συνδυασμών υπονοείται στο εν λόγω σχήμα με τη χρήση αποσιωπητικών (“...”). Με κόκκινο “X” σημειώνεται η αρχή και το πέρασ της Φάσης 4 της προσπέρασης, ενώ με μπλε “X” σημειώνεται κάθε φορά το συνοριακό σημείο της Υπό-Φάσης 4a και της Υπό-Φάσης 4b. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.14 γίνεται άμεσα αντιληπτό, πως το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών προσδιορισμού αυξάνεται, καθώς το μπλε “X” κινείται προς το μέσον της Φάσης 4. Αυτή η παρατήρηση συνάδει και με

την κοινή λογική, αφού ένας οδηγός υποσυνείδητα θα προτιμούσε να ακολουθήσει μια συμμετρική τροχιά. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται και από τη θεωρία, όμως, αφού κατά το σχεδιασμό κλωθοειδών κορυφής προτιμάται οι δύο επιμέρους καμπύλες να είναι συμμετρικές.



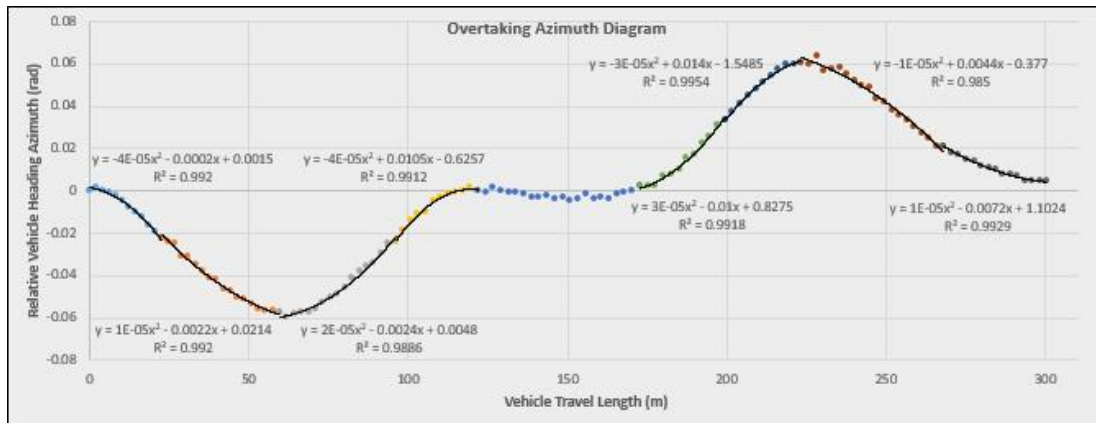
Σχήμα 4.14 Η επαναληπτική διαδικασία καθορισμού του σημείου μετάβασης από την Υπό-Φάση 4a στην Υπό-Φάση 4b.

Ένα σημαντικό σημείο, το οποίο πρέπει να τονιστεί, έχει να κάνει με τον αριθμό των βρόχων που εκτελούνταν κατά την επαναληπτική διαδικασία. Έστω  $n$  ο αριθμός των σημείων του διαγράμματος αζιμουθίων που ανήκαν στη φάση ενδιαφέροντος. Το πλήθος των υποψήφιων σημείων μετάβασης από τη μια υπό-φάση στην άλλη είναι προφανώς  $n-2$ , αφού εξαιρούνταν κάθε φορά το σημείο αρχής και το σημείο πέρατος της φάσης. Αυτό συνέβαινε, επειδή δεν θα είχε κανένα νόημα να καθοριστεί υπό-φάση μηδενικού μήκους. Ωστόσο, από τα μαθηματικά είναι γνωστό, πως μια παραβολή ορίζεται μοναδικά από τρία σημεία του επιπέδου (House, p. 88). Συνεπώς, στους βρόχους που το σημείο μετάβασης ήταν το δεύτερο ή το τρίτο σημείο (αντίστοιχα το  $(n-1)$ -οστό ή το  $(n-2)$ -οστό σημείο) της φάσης, η παλινδρόμηση είχε ως αποτέλεσμα την προσαρμογή μιας παραβολής με  $R^2_a=1$  (αντίστοιχα  $R^2_b=1$ ). Επειδή αυτή η τέλεια προσαρμογή είχε ως αποτέλεσμα το μέγιστο  $R^2_a+R^2_b$  να παγιδύεται σε κάποιο από τα τέσσερα αυτά ακριανά σημεία, ο αλγόριθμος αναζήτησης του μέγιστου αθροίσματος δομήθηκε να μην τα λαμβάνει υπόψη. Συνεπώς, το πραγματικό πλήθος των υποψήφιων σημείων μετάβασης από τη μια υπό-φάση στην άλλη θεωρήθηκε  $n-6$ . Αυτή η διαπίστωση είναι πολύ σημαντική, καθώς αποτελεί ένα παράδειγμα περίπτωσης που η λύση που υποδεικνύουν τα μαθηματικά δεν ταυτίζεται με την αναμενόμενη λύση από τη σκοπιά της οδοποιίας. Σε αυτήν την περίπτωση επιστρατεύτηκε η κρίση του μηχανικού. Στο Σχήμα 4.15 απεικονίζονται τα έξι σημεία που απορρίφθηκαν αλγοριθμικά από την επαναληπτική διαδικασία, με το συμβολισμό να είναι σε πλήρη αναλογία με το Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.15 Τα έξι σημεία μιας φάσης που δε λογίζονται ως εσωτερικά συνοριακά σημεία των δύο υπό-φάσεων.

Έπειτα από τον καθορισμό των τεσσάρων εσωτερικών σημείων διαχωρισμού των υπό-φάσεων, η χάραξη των γραμμών τάσης πάνω στο διάγραμμα αζιμούθιων πήρε την τελική της μορφή. Αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.16, στο οποίο επίσης σημειώνονται πάλι στην κάθε γραμμή η εξίσωση παλινδρόμησης που προέκυψε, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής  $R^2$ .



Σχήμα 4.16 Προσαρμογή πολυωνύμων δευτέρου βαθμού στο διάγραμμα αζιμούθιων.

Οι παράμετροι που εξάγονταν με τη μέθοδο των κλωθοειδών είναι το μήκος της εκάστοτε κλωθοειδούς, καθώς και η σημειακή ακτίνα στο πέρας της κάθε μιας από αυτές. Με άλλα λόγια και αγνοώντας προσωρινά τις υπό-φάσεις, για κάθε φάση αναζητήθηκαν τα δύο εσωτερικά μήκη των κλωθοειδών και η σημειακή ακτίνα.

Με τη βοήθεια της πολυωνυμικής παλινδρόμησης καθορίστηκαν τα δύο εσωτερικά μήκη. Πέρα από αυτά, η παλινδρόμηση δεν εξυπηρέτησε κανένα άλλο σκοπό, πλην ίσως ότι βοήθησε στο να διατηρηθεί μια εποπτεία σχετικά με την ποιότητα της προσαρμογής στα δεδομένα, αξιολογώντας το  $R^2$  που προέκυπτε κάθε φορά. Ως εκ τούτου, οι εξισώσεις που προέκυπταν με την παλινδρόμηση δεν αξιοποιήθηκαν κάπου.



Όσον αφορά στη σημειακή ακτίνα, αυτή αποδεικνύεται πως είναι ανεξάρτητη της επιλογής του σημείου μετάβασης από την κλωθοειδή εισόδου στην κλωθοειδή εξόδου. Ο υπολογισμός της πραγματοποιούνταν μαθηματικά, αξιοποιώντας μόνο τη συνολική μεταβολή του αζιμούθιου και τη συνολική μεταβολή της χιλιομετρικής θέσης κατά τη διάρκεια μιας φάσης της προσπέρασης.

Συγκεκριμένα, από την 3.13β, για την κάθε φάση ισχύει:

$$R = \frac{L_{final} - L_{start}}{2(\tau_{final} - \tau_{start})} \quad (4.2)$$

, όπου: R (m) η (αλγεβρική) σημειακή ακτίνα ανάμεσα στην κλωθοειδή εισόδου και την κλωθοειδή εξόδου της φάσης,

$L_{start}$  (m) η χιλιομετρική θέση ως προς τα δευτερογενή δεδομένα του σημείου αρχής της φάσης,

$L_{final}$  (m) η χιλιομετρική θέση ως προς τα δευτερογενή δεδομένα του σημείου πέρατος της φάσης,

$\tau_{start}$  (rad) το αζιμούθιο του οχήματος ως προς τα δευτερογενή δεδομένα στο σημείο αρχής της φάσης,

$\tau_{final}$  (rad) το αζιμούθιο του οχήματος ως προς τα δευτερογενή δεδομένα στο σημείο πέρατος της φάσης.

Επιπλέον, ύστερα και από τον καθορισμό του εσωτερικού συνοριακού σημείου των δύο υπό-φάσεων μέσω της πολυωνυμικής παλινδρόμησης, έγιναν γνωστά η χιλιομετρική του θέση και το αζιμούθιο του οχήματος σε αυτή. Έτσι, μπόρεσαν να υπολογιστούν περισσότερες παράμετροι για τις κλωθοειδείς, για την πλήρη γεωμετρική περιγραφή τους.

Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια της 3.9 υπολογίστηκαν:

$$A_a = \sqrt{|R| \cdot (L_{middle} - L_{start})} \quad (4.3)$$

$$A_b = \sqrt{|R| \cdot (L_{final} - L_{middle})} \quad (4.4)$$

, όπου:  $A_a$  (m) η παράμετρος της κλωθοειδούς εισόδου στην υπό-φάση a,

$A_b$  (m) η παράμετρος της κλωθοειδούς εξόδου στην υπό-φάση b,

|R| (m) η απόλυτη τιμή της σημειακής ακτίνας,

$L_{middle}$  (m) η χιλιομετρική θέση ως προς τα δευτερογενή δεδομένα του εσωτερικού συνοριακού σημείου των δύο υπό-φάσεων.

Επιπλέον, με τη βοήθεια της 3.14α υπολογίστηκαν:

$$L_a = \frac{A_a^2}{|R|} \quad (4.5)$$

$$L_b = \frac{A_b^2}{|R|} \quad (4.6)$$

, όπου:  $L_a$  (m) το μήκος της κλωθοειδούς εισόδου στην υπό-φάση a,

$L_b$  (m) το μήκος της κλωθοειδούς εξόδου στην υπό-φάση b.

Τέλος, με τη βοήθεια της 3.12γ υπολογίστηκαν:

$$\tau_a = \frac{L_a}{2|R|} \quad (4.7)$$

$$\tau_b = \frac{L_b}{2|R|} \quad (4.8)$$

, όπου:  $\tau_a$  (rad) η γωνία αλλαγής διεύθυνσης της κλωθοειδούς εισόδου στην υπό-φάση a,  
 $\tau_b$  (rad) η γωνία αλλαγής διεύθυνσης της κλωθοειδούς εξόδου στην υπό-φάση b.

Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, οι οποίες αφορούν σε μια μόνο κλωθοειδή καμπύλη, υπολογίστηκαν και ορισμένες παράμετροι που αφορούν συνολικά στην τυπική καμπύλη της κάθε φάσης της προσπέρασης.

Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια της 3.36 υπολογίστηκε:

$$\alpha = |\tau_{final} - \tau_{start}| - \tau_a - \tau_b \quad (4.9)$$

, όπου:  $\alpha$  (rad) η επίκεντρη γωνία που βαίνει στο κυκλικό τόξο της τυπική καμπύλης.

Έπειτα, μετασχηματίζοντας ισοδύναμα την 3.34 ισχύει:

$$b = \alpha \cdot |R| \quad (4.10)$$

, όπου:  $b$  (m) το μήκος του κυκλικού τόξου της τυπικής καμπύλης.

Δεδομένου πως έχει γίνει η παραδοχή του σημειακού κυκλικού τόξου, είναι προφανές, πως οι 4.9 και 4.10 πρέπει να δίνουν μηδενικές τιμές. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία λειτούργησαν περισσότερο ως έλεγχος επαλήθευσης, καθώς αν έδιναν αποτέλεσμα διάφορο του μηδενός θα σήμαινε πως κάπου θα υπήρχε λάθος. Εντούτοις, αν σε κάποια μελλοντική έρευνα αποφασιζόταν να χρησιμοποιηθεί πλήρης μια τυπική καμπύλη για να περιγραφεί μια φάση προσπέρασης, οι παράμετροι  $\alpha$  και  $b$  θα έπρεπε να υπολογιστούν.

Στα αποτελέσματα καταγράφονταν για την κάθε φάση της προσπέρασης μόνο τα μήκη  $L_a$  και  $L_b$  και η σημειακή ακτίνα  $R$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίζονταν κανονικά στο αρχείο “NewMethod\_5.0.xlsm” και παρότι δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, διατηρήθηκε η επιλογή να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές έρευνες. Μια εφαρμογή στην οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι η χάραξη τροχιών ακριβείας στην οριζοντιογραφία, με τη χρήση της θεώρησης των κλωθοειδών για διάφορα σενάρια προσπέρασης.

Στην *Εικόνα 4.53* απεικονίζεται μέρος από το φύλλο εργασίας “Clothoid Analysis” του αρχείου επεξεργασίας “NewMethod\_5.0.xlsm”, κατόπιν από την εκτέλεση των σχετικών υπολογισμών. Για να είναι πιο ευδιάκριτη η διάταξη παρουσιάζονται μόνο τα κελιά που αφορούν στη Φάση 1 και τη Φάση 2 της προσπέρασης. Οι αντίστοιχες περιοχές που αφορούν στις υπόλοιπες τρεις φάσεις έχουν ακριβώς την ίδια διάταξη. Στις στήλες με τις πορτοκαλί επικεφαλίδες τοποθετούνταν τα δευτερογενή δεδομένα του διαγράμματος αζιμούθιων που αφορούσαν στην εκάστοτε φάση, ενώ οι στήλες E έως H και M

έως P χρησιμοποιούνταν ως βοηθητικές για την επαναληπτική διαδικασία της πολυωνυμικής παλινδρόμησης. Στις περιοχές C2:D22 και K2:L22 πραγματοποιούνταν αυτόματα οι υπολογισμοί των ζητούμενων παραμέτρων, ενσωματώνοντας στα κελιά τύπους που αντιστοιχούν στις 4.2-4.10. Το κάτω μέρος της διαχωρισμένης οθόνης λειτουργούσε ως βοηθητικό σημειωματάριο κατά την εκτέλεση της επαναληπτικής διαδικασίας, όπου καταγράφονταν οι συντελεστές του δευτεροβάθμιου πολυωνύμου της παλινδρόμησης, καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί και σε ένα βρόχο της διαδικασίας. Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας μιας προσπέρασης διαγράφονταν όλα τα δεδομένα εκτός από τις περιοχές των υπολογισμών, ώστε να ετοιμαστεί το φύλλο εργασίας για την επόμενη προσπέραση.

Εικόνα 4.53 Τμήμα του φύλλου εργασίας με τους υπολογισμούς για τη μέθοδο των κλωθοειδών.

Σε αντίθεση με τη μέθοδο των κύκλων, στην οποία το  $R^2$  της παλινδρόμησης αποτελούσε σημαντικό μέσο αξιολόγησης της προσαρμογής, δεν ίσχυε το ίδιο και στη μέθοδο των κλωθοειδών. Η προσαρμογή των παραβολών στις επιμέρους υπό-φάσεις ήταν εξαιρετική ακόμα και στις χειρότερες περιπτώσεις, ενώ με την επαναληπτική διαδικασία εξασφαλιζόταν, πως το τελικό  $R^2$  θα ήταν το μεγαλύτερο δυνατό. Έτσι, η χρήση του συντελεστή προσδιορισμού ως μέσο αξιολόγησης δεν είχε και πολύ νόημα και ο ρόλος του περιορίστηκε σε μια πιο γενική ένδειξη της ποιότητας της προσαρμογής.

Ως μέθοδος αξιολόγησης προτιμήθηκε κάποια που είναι περισσότερο συνυφασμένη με το φυσικό ανάλογο των καμπυλών της παλινδρόμησης. Συγκεκριμένα, εξεταζόταν κάθε φορά κατά πόσο τα εσωτερικά συνοριακά σημεία των υπό-φάσεων βρίσκονταν

στην περιοχή του μέσου της αντίστοιχης φάσης. Όσο πιο κοντά γινόταν η σύνδεση των δύο κλωθοειδών, τόσο πιο καλό το αποτέλεσμα της ανάλυσης. Βέβαια πρέπει να τονιστεί, πως αυτή η μέθοδος είναι ποιοτική και όχι ποσοτική, αλλά και ότι είναι απλώς ενδεικτική. Ορισμένες φορές η αποτύπωση ασύμμετρων κλωθοειδών στο διάγραμμα αζιμούθιων τύχαινε να οφείλεται στην ίδια την οδηγική συμπεριφορά. Παρόλα αυτά, αν το εσωτερικό συνοριακό σημείο τοποθετούνταν, για παράδειγμα, στο 20% του μήκους της φάσης, τότε το σφάλμα πιθανότατα θα οφειλόταν στα μαθηματικά.

Ο προφανής τρόπος αντιμετώπισης θα ήταν να εντοπιστεί το σημείο για το οποίο επιτυγχάνεται το δεύτερο ή το τρίτο καλύτερο αθροιστικό  $R^2$  και να συνεχιστούν οι υπολογισμοί με βάση εκείνο. Δεν συνέβη κάτι τέτοιο, όμως, στην προκειμένη περίπτωση. Δεδομένου πως τα σημεία αρχής και πέρατος των φάσεων δεν ήταν ισχυρά τεκμηριωμένα, προτιμήθηκε να δοκιμαστούν διαφορετικοί συνδυασμοί συνοριακών σημείων με παράλληλη εκτέλεση εκ νέου της επαναληπτικής διαδικασίας. Επιλεγόταν, έτσι, διαφορετικό σημείο αρχής ή/και πέρατος της εν λόγω φάσης, προσέχοντας, όμως, το νέο σημείο να ανήκει στην ίδια “περιοχή αρχής” ή/και “περιοχή πέρατος”. Εξάλλου, τα συνοριακά σημεία μιας φάσης τις περισσότερες φορές δεν ήταν ισχυρά τεκμηριωμένα, αλλά το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί και για τις περιοχές. Ως αποτέλεσμα, οι δοκιμές αυτές τις περισσότερες φορές οδήγησαν σε πολύ καλύτερη συνολική προσαρμογή, με τις κλωθοειδείς να συναντώνται πιο κοντά στο μέσον της εκάστοτε φάσης. Μάλιστα, επειδή το αρχείο Excel ήταν βελτιστοποιημένο να απαιτείται ο ελάχιστος δυνατός χρόνος επεξεργασίας, ακόμα και αν απαιτούνταν δοκιμές για τα συνοριακά σημεία όλων των φάσεων το συνολικό κόστος της επεξεργασίας σε όρους χρόνου παρέμενε εντυπωσιακά χαμηλό.

#### 4.2.7 Κινηματική Ανάλυση

Παράλληλα με τη μελέτη του ελιγμού προσπέρασης από τη σκοπιά της γεωμετρίας, έντονο ενδιαφέρον παρουσίασε και η μελέτη του από τη σκοπιά της κινηματικής του οχήματος. Η παρούσα εργασία εστίασε σε δύο παραμέτρους, την επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνούσε και την απόσταση μεταξύ αυτού και του οχήματος που προσπερνούσαν, κατά την εκκίνηση του ελιγμού. Επομένως, ενώ στις παραπάνω ενότητες το ενδιαφέρον είχε εστιάσει μόνο στο ένα όχημα, πλέον η ανάλυση επεκτάθηκε να συμπεριλάβει και το άλλο όχημα, μελετώντας την προσπέραση ως ένα σύστημα δύο αλληλεπιδρώντων σωμάτων.

Όσον αφορά στις παραμέτρους, για κάθε μια από τις πέντε φάσεις της προσπέρασης υπολογίστηκε η μέση επιτάχυνση του οχήματος που εκτελούσε τον ελιγμό. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν οι ταχύτητες που εξάγονταν από το αρχείο με τις πληροφορίες NMEA και οι οποίες εισάγονταν ως δεδομένα εισόδου στο αρχείο Excel της επεξεργασίας. Έπειτα έγινε η θεώρηση, πως η επιτάχυνση μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών είναι σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο απλοποιήθηκε πολύ η διαδικασία υπολογισμού, χωρίς ουσιαστικά να υπεισέρχεται στη μεθοδολογία κάποια αβεβαιότητα, αφού το χρονικό βήμα καταγραφής δεδομένων ήταν τις περισσότερες φορές 0.1s ή 0.2s. Με άλλα λόγια, μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμάτων GPS το όχημα θεωρήθηκε πως εκτελεί κίνηση ομαλά επιταχυνόμενη.

Έστω δύο τυχόντα σημεία  $P_{i-1}$  και  $P_i$ ,  $i=2, 3, \dots, n$ , όπου  $n$  το πλήθος των καταγραφών GPS στο σύνολο των πρωτογενών δεδομένων μιας προσπέρασης. Το κάθε ένα από αυτά τα σημεία αντιστοιχεί σε μια χρονική στιγμή. Η επιτάχυνση για την κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκε ως εξής:

$$a_{i-1}^i = \frac{V_{NMEA,i} - V_{NMEA,i-1}}{\Delta t_{i-1}^i} \quad (4.11)$$

, όπου:  $a_{i-1}^i$  ( $m/s^2$ ) η επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάει από τη χρονική στιγμή  $i-1$  έως τη χρονική στιγμή  $i$ ,

$V_{NMEA,i}$  ( $m/s$ ) η ταχύτητα του οχήματος τη χρονική  $i$  σύμφωνα με τα δεδομένα του αρχείου NMEA,

$V_{NMEA,i-1}$  ( $m/s$ ) η ταχύτητα του οχήματος τη χρονική στιγμή  $i-1$  σύμφωνα με τα δεδομένα του αρχείου NMEA,

$\Delta t_{i-1}^i$  ( $s$ ) το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της χρονικής στιγμής  $i-1$  και της χρονικής στιγμής  $i$ .

Κατά τη δευτερογενή μείωση δεδομένων διατηρήθηκαν για περαιτέρω επεξεργασία μόνο οι επιταχύνσεις που αφορούν στις χρονικές στιγμές που ανήκουν στα δευτερογενή δεδομένα. Οι επιταχύνσεις αυτές μεταφέρονται αυτούσιες και δεν υπολογίζονται από την αρχή. Έτσι, εξασφαλίστηκε η πληροφορία για όλες τις χρονικές στιγμές ενδιαφέροντος, χωρίς να χρειαστεί να λογιστεί η πρώτη ή η τελευταία από αυτές ως βοηθητική. Οι υπόλοιπες επιταχύνσεις δε λήφθηκαν υπόψη.

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τη χρονική στιγμή εκκίνησης και πέρατος της εκάστοτε φάσης, διαχωρίστηκαν οι επιταχύνσεις σε πέντε επιμέρους υποσύνολα. Το κάθε ένα από αυτά αφορούσε και σε μια από τις πέντε φάσεις της προσπέρασης. Έπειτα, υπολογίστηκε η μέση επιτάχυνση για την κάθε φάση, ως ο μέσος όρος του κάθε υποσυνόλου. Έστω  $k$  το πλήθος των χρονικών στιγμών που ανήκαν στη Φάση 1 μιας προσπέρασης. Η σχέση υπολογισμού ήταν η εξής:

$$a_{m1} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k} \quad (4.12)$$

, όπου:  $a_{m1}$  ( $m/s^2$ ) η μέση επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάει για ολόκληρη τη Φάση 1,

$a_j$ ,  $j=1, 2, \dots, k$  ( $m/s^2$ ) η επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάει τη χρονική στιγμή  $j$  ως προς τα δευτερογενή δεδομένα.

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις υπόλοιπες τέσσερις φάσεις, για όλες τις προσπεράσεις που εξετάστηκαν.

Σημειώνεται, πως επειδή τα χρονικά διαστήματα  $\Delta t_{i-1}^i$  ήταν τα ίδια για τη συντριπτική πλειοψηφία των καταγραφών σε μια προσπέραση, δεν απαιτήθηκε η χρήση κάποιας πιο σύνθετης μορφής της μέσης τιμής αντί της 4.12. Αν παρατηρούνταν μια τέτοια συμπεριφορά των δεδομένων, αντί της 4.12 θα ήταν ορθότερο να χρησιμοποιηθεί κάποια συνάρτηση σταθμισμένου μέσου.

Ένα δεύτερο ιδιαίτερο σημείο, κατά τη διαδικασία αυτή, συνιστούσε η Φάση 3. Στις περιπτώσεις που η Φάση 3 προέκυπτε μηδενικού μήκους, αντί για την αριθμητική τιμή

“0”, στα αποτελέσματα σημειωνόταν ο αλφαριθμητικό χαρακτήρας “NULL”. Με αυτόν τον τρόπο γινόταν αμέσως σαφές, πως η Φάση 3 δεν διέθετε δεδομένα. Αν χρησιμοποιούνταν η μηδενική τιμή, δυνητικά κάποιος θα μπορούσε να την παρερμηνεύσει και να νομίσει πως αυτή θα ήταν το αποτέλεσμα της 4.12.

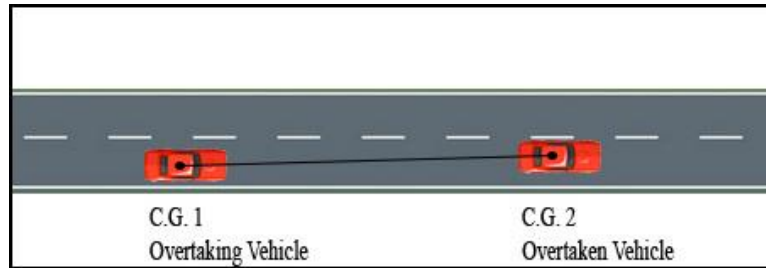
Η δεύτερη παράμετρος που υπολογίστηκε ήταν το headway τη στιγμή της έναρξης της Φάσης 1. Ως “headway” ορίζεται η συνιστώσα επί το διαμήκη άξονα της απόστασης ανάμεσα στον πίσω προφυλακτήρα του οχήματος που προσπερνάται και το μπροστά προφυλακτήρα του οχήματος που προσπερνάει. Με άλλα λόγια είναι η καθαρή διαμήκης απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων.

Κατά τον υπολογισμό του headway στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δύο παραδοχές. Πρώτον, χρησιμοποιήθηκε η Ευκλείδεια καθαρή απόσταση μεταξύ των οχημάτων και όχι η διαμήκης συνιστώσα της. Με αυτήν τη θεώρηση εισήχθη ένα σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς είναι προφανές, πως οι δύο αποστάσεις διαφέρουν μεταξύ τους. Ωστόσο, επειδή η αναζήτηση του headway έγινε ακριβώς για την έναρξη της Φάσης 1 της προσπέρασης, δεν θα ήταν παράλογο να υποθέσει κάποιος, πως τα δύο οχήματα εκείνη τη χρονική στιγμή θα βρίσκονταν περίπου στην ίδια εγκάρσια θέση μέσα στη λωρίδα κυκλοφορίας. Συνεπώς, το σφάλμα υπολογισμού αναμενόταν να είναι αμελητέο και χάριν απλότητας και εξοικονόμησης χρόνου τελικά αγνοήθηκε.

Δεύτερον, θεωρήθηκε, πως τα δύο GPS ήταν τοποθετημένα κάθε φορά στο κεντροειδές της οροφής του εκάστοτε οχήματος. Όσον αφορά στον εγκάρσιο άξονα του οχήματος η παραδοχή αυτή είναι αληθής, καθώς ο δέκτης τοποθετούνταν στο μέσον της οροφής. Όσον αφορά στο διαμήκη άξονα, όμως, η παραδοχή είναι μάλλον αναληθής, καθώς όσον αφορά στο διαμήκη άξονα, ο δέκτης τοποθετούνταν ακριβώς στο ύψος του κατακόρυφου πλαισίου στήριξης που συναντάται ανάμεσα στο μπροστινό και το πίσω διαμέρισμα των οχημάτων. Η απόσταση από το σημείο αυτό έως το μπροστά (ή τον πίσω προφυλακτήρα) είναι διαφορετική για το εκάστοτε όχημα και στη γενική περίπτωση δεν ταυτίζεται με το ήμισυ του μήκους του οχήματος. Στατιστικά, βέβαια, θα μπορούσε κάποιες φορές και να ταυτίζεται. Πραγματοποιήθηκε εκτενής έρευνα στο διαδίκτυο για να βρεθούν οι ακριβείς αποστάσεις από το σημείο που είχαν τοποθετηθεί οι δέκτες GPS στους δύο προφυλακτήρες, η οποία όμως δεν απέδωσε καρπούς. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε μια απλοποιητική παραδοχή και η απόσταση αυτή λαμβανόταν ίση με το ήμισυ του μήκους του οχήματος, το οποίο βρέθηκε εύκολα για όλα τα οχήματα που συμμετείχαν στο οδικό πείραμα. Η απόκλιση αναμενόταν να είναι της τάξης των 20cm.

Το συνολικό σφάλμα που υπεισήλθε στα τελικά αποτελέσματα, εξαιτίας των δύο παραπάνω παραδοχών κρίθηκε αποδεκτό για την εφαρμογή που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Για μια ενδεικτική τιμή headway 20m, τα 20cm αποτελούν μόλις το 1% της απόστασης, τιμή σφάλματος η οποία θεωρείται αποδεκτή στις περισσότερες εφαρμογές μηχανικού.

Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται σκαριφηματικά η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους (Center of Gravity, C.G.) των δύο οχημάτων, ακριβώς τη στιγμή που το πίσω όχημα ξεκινάει τον ελιγμό της προσπέρασης.



Σχήμα 4.17 Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των δύο οχημάτων τη στιγμή έναρξης της προσπέρασης.

Από τα μαθηματικά ισχύει:

$$dist_{CG} = \sqrt{(X_{CG1} - X_{CG2})^2 + (Y_{CG1} - Y_{CG2})^2} \quad (4.13)$$

, όπου:  $dist_{CG}$  (m) η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των δύο οχημάτων, τη στιγμή έναρξης του ελιγμού προσπέρασης,

$X_{CG1}$  (m) η συντεταγμένη X στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάει, τη στιγμή έναρξης του ελιγμού,

$Y_{CG1}$  (m) η συντεταγμένη Y στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάει, τη στιγμή έναρξης του ελιγμού,

$X_{CG2}$  (m) η συντεταγμένη X στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάται, τη στιγμή έναρξης του ελιγμού,

$Y_{CG2}$  (m) η συντεταγμένη Y στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάται, τη στιγμή έναρξης του ελιγμού.

Εφαρμόζοντας την πρώτη και τη δεύτερη παραδοχή, το ζητούμενο headway προέκυψε ως εξής:

$$Hdw = dist_{CG} - \frac{L_{BAIT}}{2} - \frac{L_{HUNTER}}{2} \quad (4.14)$$

, όπου:  $Hdw$  (m) το headway τη στιγμή έναρξης του ελιγμού προσπέρασης,

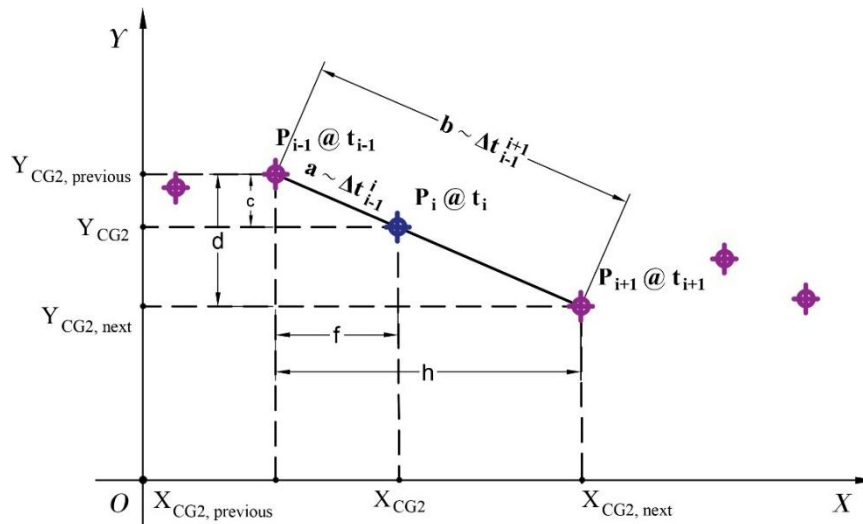
$L_{BAIT}$  (m) το μήκος του οχήματος που προσπερνούνται,

$L_{HUNTER}$  (m) το μήκος του οχήματος που προσπερνούσε.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτήθηκε στις προσπεράσεις εκείνες, στις οποίες δεν ήταν γνωστές οι  $X_{CG2}$  και  $Y_{CG2}$ . Αυτό οφειλόταν στο ότι τα δύο όργανα GPS πολύ συχνά δεν πραγματοποιούσαν καταγραφές με το ίδιο χρονικό βήμα. Επομένως, για τη χρονική στιγμή έναρξης της προσπέρασης ενδεχομένως να μην υπήρχε διαθέσιμη καταγραφή συντεταγμένων για το όχημα που προσπερνούνταν. Σημειώνεται, πως για το όχημα που προσπερνούσε υπήρχε πάντοτε διαθέσιμη καταγραφή συντεταγμένων στην έναρξη της προσπέρασης, αφού κατά τη μόρφωση της βάσης δεδομένων των προσπεράσεων αυτή η χρονική στιγμή είχε επιλεγεί ειδικά για να υπάρχει μέσα στις καταγραφές.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε, λαμβάνοντας υπόψη την αμέσως προηγούμενη και την αμέσως επόμενη διαθέσιμη καταγραφή συντεταγμένων, όσο χρόνο και αν απείχαν από τη χρονική στιγμή της έναρξης της προσπέρασης. Ύστερα, οι ζητούμενες συντεταγμένες προσδιορίστηκαν μαθηματικά, με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Δεδομένου πως το όχημα που προσπερνούνταν θεωρητικά κινούνταν στο μέσον της λωρίδας κυκλοφορίας, ευθύγραμμα και με σταθερή ταχύτητα, το σφάλμα της παραδοχής αυτής αναμενόταν να είναι αμελητέο.

Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζεται ένα τμήμα της οριζοντιογραφίας του οχήματος που προσπερνούνταν. Με μωβ χρώμα διακρίνονται τα καταγεγραμμένα στίγματα GPS, ενώ με μπλε χρώμα δείχνεται η θέση στην οποία θα βρισκόταν το όχημα αν είχε υπήρχε καταγεγραμμένο στίγμα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η θέση αυτή, έστω σημείο  $P_i$  τη χρονική στιγμή  $t_i$ , θεωρήθηκε ενώνοντας με μια ευθεία γραμμή την αμέσως προηγούμενη καταγεγραμμένη θέση, έστω σημείο  $P_{i-1}$  τη χρονική στιγμή  $t_{i-1}$ , με την αμέσως επόμενη καταγεγραμμένη θέση, έστω σημείο  $P_{i+1}$  τη χρονική στιγμή  $t_{i+1}$ .



Σχήμα 4.18 Υπολογισμός της θέσης του οχήματος που προσπερνούνταν με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.

Από το Σχήμα 4.18 προκύπτει:

$$\frac{X_{CG2,next} - X_{CG2,previous}}{X_{CG2} - X_{CG2,previous}} = \frac{h}{f} \quad (4.15)$$

$$\frac{Y_{CG2,next} - Y_{CG2,previous}}{Y_{CG2} - Y_{CG2,previous}} = \frac{d}{c} \quad (4.16)$$

, όπου:  $X_{CG2, previous}$  (m) η συντεταγμένη X στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάται, τη χρονική στιγμή  $t_{i-1}$ ,

$X_{CG2}$  (m) η συντεταγμένη X στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάται, τη χρονική στιγμή έναρξης του ελιγμού  $t_i$ ,

$X_{CG2, next}$  (m) η συντεταγμένη X στο ΕΓΣΑ 87 του κέντρου βάρους του οχήματος που προσπερνάται, τη χρονική στιγμή  $t_{i+1}$ ,

c και d (m) βοηθητικές αποστάσεις στην κατακόρυφη διεύθυνση,

f και h (m) βοηθητικές αποστάσεις στην οριζόντια διεύθυνση.

Από την ομοιότητα τριγώνων, όμως, ισχύει:

$$\frac{h}{f} = \frac{d}{c} = \frac{b}{a} \quad (4.17)$$

, όπου: a (m) η απόσταση που διανύει το κέντρο βάρους του οχήματος που προσπερνάται, από τη χρονική στιγμή  $t_{i-1}$  έως και τη χρονική στιγμή  $t_i$ ,

b (m) η απόσταση που διανύει το κέντρο βάρους του οχήματος που προσπερνάται, από τη χρονική στιγμή  $t_{i-1}$  έως και τη χρονική στιγμή  $t_{i+1}$ .



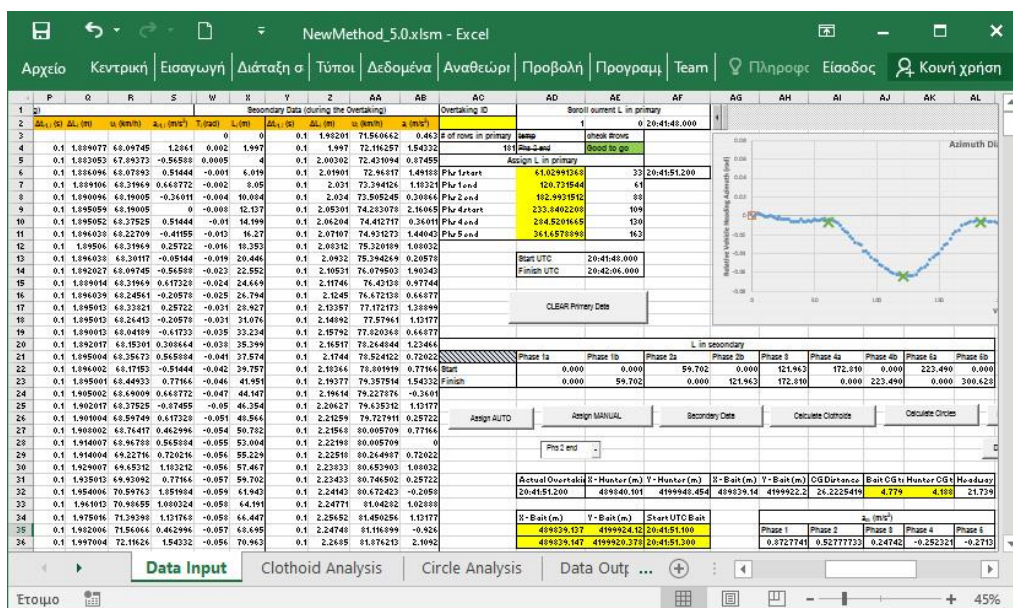
Η απόσταση  $a$  δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή. Όμως, η ταχύτητα κίνησης του οχήματος που προσπερνάται θεωρήθηκε σταθερή. Άρα, η απόσταση  $a$  είναι ευθέως ανάλογη του χρόνου που παρήλθε κατά τη μετακίνηση του οχήματος από τη θέση  $P_{i-1}$  έως και τη θέση  $P_i$ , δηλαδή του  $\Delta t_{i-1}^i$  και μάλιστα με συντελεστή αναλογίας την ταχύτητα κίνησης. Εντελώς όμοια, η απόσταση  $b$  είναι ευθέως ανάλογη του  $\Delta t_{i-1}^{i+1}$  και μάλιστα με τον ίδιο συντελεστή αναλογίας. Ως εκ τούτου, οι λόγοι  $b/a$  και  $\Delta t_{i-1}^{i+1}/\Delta t_{i-1}^i$  είναι ίσοι. Επομένως, στην 4.17 αντί της άγνωστης ποσότητας  $b/a$ , χρησιμοποιείται ο λόγος  $\Delta t_{i-1}^{i+1}/\Delta t_{i-1}^i$ .

Συνεπώς, με βάση την παραπάνω παρατήρηση, τις 4.15 και 4.16 και λαμβάνοντας υπόψη την 4.17 προέκυψαν οι ζητούμενοι τύποι υπολογισμού:

$$X_{CG2} = X_{CG2,previous} + \frac{a}{b} (X_{CG2,next} - X_{CG2,previous}) \quad (4.18)$$

$$Y_{CG2} = Y_{CG2,previous} + \frac{a}{b} (Y_{CG2,next} - Y_{CG2,previous}) \quad (4.19)$$

Στην ακόλουθη *Εικόνα 4.54* απεικονίζεται το τμήμα του αρχείου επεξεργασίας “NewMethod\_5.0.xlsm”, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η κινηματική ανάλυση. Στο κελί AL32 υπολογιζόταν η τελική τιμή του headway. Επιπλέον, στην περιοχή κελιών AD35:AF36 εισάγονταν οι πλησιέστερες γνωστές θέσεις του οχήματος που προσπερνούνταν εκατέρωθεν της χρονικής στιγμής έναρξης του ελιγμού. Ακόμη, στα κελιά AJ32 και AK32 εισάγονταν το μήκος του οχήματος που προσπερνούσε και το μήκος του οχήματος που προσπερνούνταν. Στη στήλη P υπολογιζόταν αυτόματα, με τη βοήθεια τύπου, το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  που μεσολαβούσε ανάμεσα σε κάθε ζεύγος καταγραφών GPS, ενώ στη στήλη S υπολογιζόταν αυτόματα η επιτάχυνση  $a$  για κάθε χρονική στιγμή, με τη χρήση τύπου όμοιου της 4.11. Κατά τη δευτερογενή μείωση δεδομένων, οι τιμές που αφορούσαν στον καθαρό ελιγμό της προσπέρασης αντιγράφονταν στις στήλες Y και AB αντίστοιχα. Τέλος, στην περιοχή κελιών AH34:AL36 υπολογιζόνταν αυτόματα η μέση επιτάχυνση  $a_{mi}$ ,  $i=1, 2, \dots, 5$  για την κάθε φάση  $i$ , με τη χρήση της συνάρτησης “AVERAGE” του Excel.



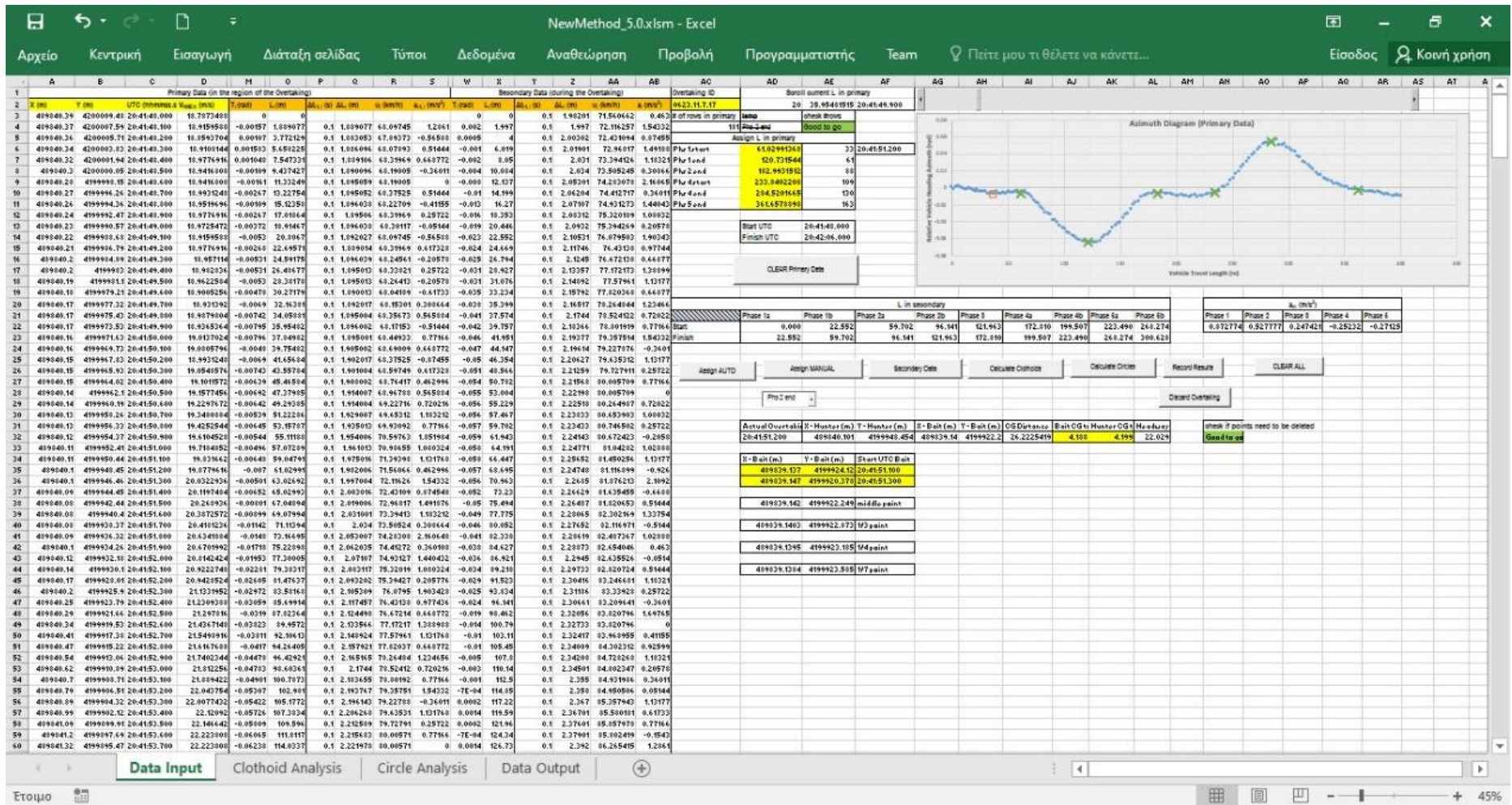
Εικόνα 4.54 Η περιοχή των υπολογισμών της κινηματικής ανάλυσης στο αρχείο Excel της επεξεργασίας.

Με αυτό το βήμα ολοκληρώθηκε το τρίτο και τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας της τροχιάς, δηλαδή η επεξεργασία στο επίπεδο της φάσης της προσπέρασης, κατά το οποίο η κάθε μια από αυτές λογίστηκε ως ανεξάρτητη οντότητα.

Την επεξεργασία της κάθε προσπέρασης ακολουθούσε πάντα η καταγραφή των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, σε ένα ειδικά διαμορφωμένο πρωτόκολλο καταγραφής στο φύλλο εργασίας “Data Output” του αρχείου “NewMethod\_5.0.xlsm”. Δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα στο να καταγραφούν όσο το δυνατόν περισσότερα αποτελέσματα για την κάθε προσπέραση, αλλά κυρίως στο να εξασφαλιστεί η δυνατότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Έτσι, τα αποτελέσματα της κάθε προσπέρασης καταγράφονταν μαζί με τη μοναδική ονομασία αυτής. Επιπλέον, καταγράφονταν πάντα και οι χιλιομετρικές θέσεις ως προς τα πρωτογενή δεδομένα, των έξι εκάστοτε επιλεγμένων συνοριακών σημείων των φάσεων της κάθε προσπέρασης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, οποιοσδήποτε ερευνητής επιθυμεί να μπορεί να αξιολογήσει ή/και αναπαράγει με απόλυτη ακρίβεια και μεγάλη ευκολία τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την παρούσα εργασία.

Τέλος, προβλέφθηκε ειδική περιοχή στο φύλλο εργασίας των αποτελεσμάτων για την καταγραφή των προσπεράσεων που κρίθηκαν για τον οποιοδήποτε λόγο ακατάλληλες προς αξιοποίηση. Σε αυτήν την κατηγορία δεν εντάχθηκαν οι προσπεράσεις που αξιοποιήθηκαν έστω και μερικώς. Αυτές καταγράφηκαν κανονικά στο πρωτόκολλο καταγραφής των αποτελεσμάτων, αλλά τα αποτελέσματα που αφορούσαν στις φάσεις που κρίθηκαν μη αξιοποιήσιμες διαγράφονταν εντελώς. Στο φύλλο “Data Output”, συνεπώς, συναντώνται πολλές γραμμές πλήρως συμπληρωμένες με αποτελέσματα, καθώς και πολλές γραμμές μερικώς συμπληρωμένες με αποτελέσματα, οι οποίες διαθέτουν διάσπαρτα κενά σε τυχαία διάταξη. Σημειώνεται, πως το πρωτόκολλο καταγραφής μορφώθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε η κάθε γραμμή να αντιστοιχεί και σε μια διαφορετική προσπέραση.

Στις ακόλουθες τέσσερις εικόνες απεικονίζονται στην πλήρη έκτασή τους τα τέσσερα φύλλα εργασίας του αρχείου της επεξεργασίας “NewMethod\_5.0.xlsm”. Ειδικότερα, στην *Εικόνα 4.55* διακρίνεται το φύλλο εργασίας “Data Input”, το οποίο χρησίμευσε για την εισαγωγή των δεδομένων και την εποπτεία της διαδικασίας της επεξεργασίας, καθώς σε αυτό βρίσκονταν τα κουμπιά ελέγχου της VBA και το διάγραμμα αζιμούθιων. Η όλη διαδικασία μπορούσε να εκτελεστεί από το εν λόγω φύλλο μόνο, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για μετάβαση σε κάποιο από τα υπόλοιπα τρία. Στην *Εικόνα 4.56* διακρίνεται το βοηθητικό φύλλο εργασίας “Clothoid Analysis”, στο οποίο εκτελούνταν η επαναληπτική διαδικασία καθορισμού των εσωτερικών υπό-φάσεων και καταγράφονταν τα αποτελέσματα της μεθόδου των κλωθοειδών. Στη συνέχεια, στην *Εικόνα 4.57* διακρίνεται το επίσης βοηθητικό φύλλο εργασίας “Circle Analysis”, στο οποίο πραγματοποιούνταν όλοι οι υπολογισμοί που σχετίζονταν με τη μέθοδο των κύκλων. Τέλος, στην *Εικόνα 4.58* διακρίνεται το συγκεντρωτικό φύλλο εργασίας “Data Output”, το οποίο λειτούργησε ως πρωτόκολλο καταγραφής των αποτελεσμάτων συνολικά για την επεξεργασία όλων των προσπεράσεων. Κατά τη λήψη των στιγμιότυπων είχαν εισαχθεί τα δεδομένα μιας προσπέρασης, ώστε να φαίνονται οι δυνατότητες του αρχείου επεξεργασίας στο μέγιστο δυνατό βαθμό.



Εικόνα 4.55 Το φύλλο εργασίας "Data Input".

NewMethod\_5.0.xlsnm - Excel

Αρχείο Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή Προγραμματιστής Team Πείτε μου τι θέλετε να κάνετε... Εισόδος Κοινή χρήση

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ			
1																																							
2	T (ms)	L (m)	Loop (m)	R <sup>2</sup>																																			
3																																							
4	0.00195	1.997																																					
5	-0.001	0.01903																																					
6	-0.002	0.05003																																					
7	-0.004	0.10004																																					
8	-0.007	0.15007																																					
9	-0.010	0.20010																																					
10	-0.013	0.25013																																					
11	-0.016	0.30016																																					
12	-0.019	0.35019																																					
13	-0.022	0.40022																																					
14	-0.025	0.45025																																					
15	-0.028	0.50028																																					
16	-0.031	0.55031																																					
17	-0.034	0.60034																																					
18	-0.037	0.65037																																					
19	-0.040	0.70040																																					
20	-0.043	0.75043																																					
21	-0.046	0.80046																																					
22	-0.049	0.85049																																					
23	-0.052	0.90052																																					
24	-0.055	0.95055																																					
25	-0.058	1.00058																																					
26	-0.061	1.05061																																					
27	-0.064	1.10064																																					
28	-0.067	1.15067																																					
29	-0.070	1.20070																																					
30	-0.073	1.25073																																					
31	-0.076	1.30076																																					
32																																							
33																																							
34																																							
35																																							
36																																							
84	T=U*L^2+K*Le																																						
85	c1	b1	c1	R2convol	a2	b2	c2	R2convol	c1	b1	c1	R2convol	a2	b2	c2	R2convol	c1	b1	c1	R2convol	a2	b2	c2	R2convol	c1	b1	c1	R2convol	a2	b2	c2	R2convol	c1	b1	c1	R2convol	a2	b2	c2
86	0.0005	0	-4.3E-19		5.398E-06	-0.00169	0.001203432	0.99402	-9E-06	0	-0.00105		1	-9.82E-07	0.0013524	-0.94471927	0.98129																						
87	-0.0004	0.00187	4.3E-19		6.39E-06	-0.001857	0.009893355	0.9949	0.00034	-0.0447	1.328134		1	-2.72E-06	0.001713	-0.1624403	0.8219																						
88	-0.0002	0.00187	0.001179		0.004812853	7.919E-06	-0.001649	0.01097321	0.99571	0.00011	-0.0942	0.219153		5.93E-06	-8.99E-06	0.021649	-0.1814489	0.8952																					
89	-0.0001	0.00048	0.00045		0.007184646	6.825E-06	-0.001736	0.015271764	0.99625	4.2E-05	-0.0053	0.169284		2.994E-06	-7.19E-06	0.002451	-0.2051424	0.9175																					
90	-0.00007	0.00037	0.000332		0.924073916	9.531E-06	-0.001794	0.01426184	0.99597	4.6E-05	-0.0058	0.125594		6.969E-05	-1.91E-06	0.002455	-0.2223412	0.9478																					
91	-9E-05	0.00033	0.000252		0.971893255	1.002E-05	-0.001823	0.09440379	0.99548	6.1E-05	-0.0065	0.21263		9.910E-05	-1.05E-05	0.0022623	-0.2223412	0.9582																					
92	-7E-05	0.00021	0.000173		0.979797421	1.010E-05	-0.001919	0.0949926	0.99522	6.1E-05	-0.0079	0.310171		9.951E-05	-1.29E-05	0.0037777	-0.2648736	0.9692																					
93	-4E-05	2.6E-05	0.000199		0.990294623	1.62E-05	-0.001997	0.09170476	0.99461	4.6E-05	-0.0097	0.521864		9.964E-05	-1.89E-05	0.0049267	-0.3262743	0.9842																					
94	-3E-05	-9E-05	0.000175		0.99577744	1.29E-05	-0.001993	0.07429729	0.99372	4.1E-05	-0.0092	0.932297		9.9704E-05	-0.004423	-0.3408163	0.9912																						
95	-2E-05	-0.0002	0.000142		0.99910844	1.231E-05	-0.002064	0.01830992	0.99271	4.5E-05	-0.0095	0.196336		0.000501	-1.03E-05	0.000501	-0.3232462	0.9864																					
96	-1E-05	-0.0004	0.000147		0.999912534	1.417E-05	-0.002102	0.01358444	0.99196	4.1E-05	-0.0092	0.162524		0.00043	-2.28E-05	0.0005094	-0.2716202	0.9819																					
97	-3E-06	-0.0004	0.000147		0.999912534	1.739E-05	-0.00247	0.02764737	0.99129	3.8E-05	-0.0043	0.027199		0.00043	-0.00043	0.00043	-0.2231724	0.9819																					
98	-2E-06	-0.0004	0.000142		0.999912534	1.994E-05	-0.002417	0.029944625	0.99137	3E-05	-0.0035	0.04393		0.00043	-0.00043	0.00043	-0.2231724	0.9819																					
99	-2E-06	-0.0004	0.000142		0.999912534	1.794E-05	-0.002427	0.02764737	0.99129	3.8E-05	-0.0043	0.027199		0.00043	-0.00043	0.00043	-0.2231724	0.9819																					
200	-9E-05	-0.0007	0.00283		0.948244403	2.27E-05	-0.002492	0.029515921	0.99627	2.6E-05	-0.003	0.026397		0.9989494	-2.49E-05	0.0089335	-0.5404782	0.98883																					

Ετοιμο

Εικόνα 4.56 Το φύλλο εργασίας "Clothoid Analysis".

Phase 1			Phase 2			Phase 3			Phase 4			Phase 5		
T (rad)	L (m)	T=a*L+b	T (rad)	L (m)	T=a*L+b	T (rad)	L (m)	T=a*L+b	T (rad)	L (m)	T=a*L+b	T (rad)	L (m)	T=a*L+b
0	0	0	-0.0572	59.7016	0.0012	-0.0007	124.342	0.0026	175.244	0.00139	-0.2431	0.99002	720.6532	0.05983
0.00199	1.997	-0.0012	-0.0593	61.9431	0.0012	-0.0007	126.734	0.0022	177.679				0.06362	228.254
0.00048	4.00002		-0.0575	64.1908			0.00017	129.125	0.00714	180.111			0.05664	230.627
-0.001	6.01903		-0.0574	68.6948			-0.0007	131.52	0.00753	182.542			0.05721	233.004
-0.002	8.05003		-0.0557	70.9633			-0.0007	133.924	0.01044	184.978			0.05823	235.375
-0.0044	10.084		-0.0522	73.2296			-0.0015	136.334	0.01541	187.407			0.05476	237.739
-0.0078	12.137		-0.0501	75.4944			-0.0027	138.747	0.01749	189.832			0.0523	240.107
-0.0102	14.1991		-0.0489	77.7751			-0.0027	141.167	0.02245	192.256			0.04985	242.471
-0.0125	16.2701		-0.0456	80.0516			-0.0019	143.589	0.02544	194.678			0.04905	244.831
-0.0158	18.3533		-0.0408	82.3378			-0.0036	146.015	0.03083	197.092			0.04319	247.189
-0.019	20.4465		-0.0381	84.6265			-0.0027	148.446	0.03377	199.507			0.04195	249.543
-0.0227	22.5518		-0.0358	86.921			-0.0048	150.881	0.03755	201.918			0.03772	251.894
-0.0236	24.6692		-0.0336	89.2183			-0.0036	153.319	0.04092	204.327			0.03568	254.244
-0.0249	26.7937		-0.0292	91.5225			-0.0015	155.754	0.0452	206.733			0.03359	256.588
-0.0312	28.9273		-0.0249	93.8344			-0.004	158.192	0.0482	209.134			0.03065	258.928
-0.0311	31.0762		-0.0239	96.141			-0.0027	160.63	0.05144	211.531			0.0276	261.265
-0.0347	33.2341		-0.0187	98.4615			-0.0036	163.064	0.0541	213.932			0.02473	263.606
-0.0378	35.3993		-0.0139	100.789			-0.0015	165.499	0.05756	216.327			0.02123	265.936
-0.0408	37.5737		-0.0105	103.113			-0.0007	167.937	0.05975	218.717			0.02137	268.274
-0.042	39.7574		-0.01	105.453			0.00014	170.375	0.05975	221.104			0.0183	270.597
-0.0461	41.9511		-0.0049	107.795			0.00219	172.81	0.06075	223.49			0.01708	272.928
-0.0472	44.1473		-0.0028	110.14									0.01495	275.249
-0.0503	46.3535		-0.0015	112.495									0.01407	277.568
-0.0511	48.5661		-0.0007	114.853									0.01196	279.888
-0.0537	50.7818		0.00019	117.22									0.0111	282.2
-0.0554	53.0038		0.00144	119.587									0.00981	284.511
-0.0564	55.229		0.00018	121.963									0.0081	286.821
-0.0565	57.4673												0.00768	289.126
-0.0572	59.7016												0.00681	291.428
													0.00464	293.73
													0.00464	296.029
													0.00464	298.329
													0.00466	300.628

Εικόνα 4.57 Το φύλλο εργασίας “Circle Analysis”.

The image shows a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet. The title bar reads "NewMethod\_5.0.xlsx - Excel". The menu bar includes "Αρχείο", "Κεντρική", "Εισαγωγή", "Διάταξη σελίδας", "Τύποι", "Δεδομένα", "Αναθεώρηση", "Προβολή", "Προγραμματιστής", "Team", and "Πείτε μου τι θέλετε να κάνω...". The ribbon shows "Εισόδος" and "Κοινή χρήση". The main area contains a large table with columns labeled with letters (A through Z) and numbers (1 through 28). The data is organized into several sections, with the bottom section labeled "Data Output". The table contains numerical data, likely representing a complex calculation or simulation results.

Εικόνα 4.58 Το φύλλο εργασίας “Data Output”.

### 4.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι παράμετροι που εξήχθησαν για την κάθε προσπέραση υπολογίζονταν με τη μέθοδο των κύκλων, τη μέθοδο των κλωθοειδών ή την κινηματική ανάλυση.

Όσον αφορά στη μέθοδο των κύκλων (“C”=Circle), καταγράφηκαν:

- CP1 (m): η ακτίνα του κυκλικού τόξου για τη Φάση 1 (“P”=Phase),
- CP1R22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για τη Φάση 1,
- CP2 (m): η ακτίνα του κυκλικού τόξου για τη Φάση 2,
- CP2R22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για τη Φάση 2,
- CP4 (m): η ακτίνα του κυκλικού τόξου για τη Φάση 4,
- CP4R22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για τη Φάση 4,
- CP5 (m): η ακτίνα του κυκλικού τόξου για τη Φάση 5,
- CP5R22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για τη Φάση 5.

Όσον αφορά στη μέθοδο των κλωθοειδών (“K”=Κλωθοειδής), καταγράφηκαν:

- KP1aL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 1a,
- KP1aR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 1a,
- KP1R (m): η ακτίνα του σημειακού κυκλικού τόξου για τη Φάση 1,
- KP1bL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 1b,
- KP1bR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 1b,
- KP2aL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 2a,
- KP2aR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 2a,
- KP2R (m): η ακτίνα του σημειακού κυκλικού τόξου για τη Φάση 2,
- KP2bL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 2b,
- KP2bR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 2b,
- KP3L (m): το μήκος της ευθυγραμμίας για τη Φάση 3 (KP3L=CP3L),
- KP4aL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 4a,
- KP4aR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 4a,
- KP4R (m): η ακτίνα του σημειακού κυκλικού τόξου για τη Φάση 4,
- KP4bL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 4b,
- KP4bR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 4b,
- KP5aL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 5a,
- KP5aR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 5a,
- KP5R (m): η ακτίνα του σημειακού κυκλικού τόξου για τη Φάση 5,
- KP5bL (m): το μήκος του τόξου κλωθοειδούς για την Υπό-Φάση 5b,
- KP5bR22: το  $R^2$  της παλινδρόμησης για την Υπό-Φάση 5b.

Όσον αφορά στην κινηματική ανάλυση, καταγράφηκαν:

- am1 ( $m/s^2$ ): η μέση επιτάχυνση για τη Φάση 1 (“m”=mean),
- am2 ( $m/s^2$ ): η μέση επιτάχυνση για τη Φάση 2,
- am3 ( $m/s^2$ ): η μέση επιτάχυνση για τη Φάση 3,
- am4 ( $m/s^2$ ): η μέση επιτάχυνση για τη Φάση 4,
- am5 ( $m/s^2$ ): η μέση επιτάχυνση για τη Φάση 5,

- P1stHdw (m): το headway τη στιγμή της έναρξης της Φάσης 1 (“st”=start).

Επιπρόσθετα, υπολογίστηκαν ορισμένες παράμετροι ακόμα, οι οποίες δεν ήταν πρωταρχικό εύρημα της μεθοδολογίας, αλλά αντίθετα προέκυψαν ως σύνθεση δύο ή περισσότερων ήδη γνωστών παραμέτρων. Αυτές είναι οι:

- KLtot (m): το συνολικό μήκος του ελιγμού προσπέρασης (“tot”=total),
- KP1L (m): το μήκος των τόξων κλωθοειδούς για τη Φάση 1,
- KP2L (m): το μήκος των τόξων κλωθοειδούς για τη Φάση 2,
- KP4L (m): το μήκος των τόξων κλωθοειδούς για τη Φάση 4,
- KP5L (m): το μήκος των τόξων κλωθοειδούς για τη Φάση 5.

Από τις 250 προσπεράσεις που καταγράφηκαν στο οδικό πείραμα αξιοποιήθηκαν οι 154 (61.6%). Από αυτές, οι 102 προσπεράσεις αξιοποιήθηκαν πλήρως, δηλαδή προέκυψαν τιμές για όλες τις υπολογιζόμενες παραμέτρους, ενώ οι υπόλοιπες 52 αξιοποιήθηκαν μερικώς, δηλαδή δεν προέκυψε τουλάχιστον μια από τις υπολογιζόμενες παραμέτρους. Ειδικότερα, από τις 102 πλήρεις προσπεράσεις, οι 62 αφορούσαν στο σενάριο των ταχυτήτων 70-90km/h και οι 40 αφορούσαν στο σενάριο των ταχυτήτων 90-110km/h. Συνολικά, από τις 154 προσπεράσεις που αξιοποιήθηκαν, οι 82 αφορούσαν στο σενάριο των ταχυτήτων 70-90km/h και οι υπόλοιπες 72 αφορούσαν στο σενάριο των ταχυτήτων 90-110km/h.

Στη συνέχεια, οι παράμετροι αυτές αναλύθηκαν με στατιστικές μεθόδους, ώστε να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα. Η ανάλυση αυτή κινήθηκε σε δύο βασικούς άξονες. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η πλήρης στατιστική περιγραφή όλων των καταγεγραμμένων παραμέτρων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα θηκογράμματα (boxplots). Έπειτα, κατασκευάστηκαν μοντέλα πρόβλεψης για ορισμένες από τις παραπάνω παραμέτρους.

Το σύνολο της ανάλυσης αυτής πραγματοποιήθηκε στο RStudio, το οποίο είναι ένα Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης για τη γλώσσα προγραμματισμού R. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας φορτώθηκαν απευθείας στο RStudio από το φύλλο εργασίας “Data Output” του αρχείου “NewMethod\_5.0.xlsm”, με τη χρήση του σχετικού πακέτου “readxl”.

#### 4.3.1 Κατασκευή θηκογραμμάτων

Για κάθε μια από τις καταγεγραμμένες παραμέτρους κατασκευάστηκαν δύο θηκογράμματα. Το ένα αναφερόταν στις προσπεράσεις με κατώτατη επιτρεπόμενη ταχύτητα 70km/h και το άλλο στις προσπεράσεις με κατώτατη επιτρεπόμενη ταχύτητα 90km/h. Επειδή η κάθε παράμετρος λογίστηκε ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες, δεν υπήρχε κάποιος περιορισμός στο να έχουν όλες τον ίδιο αριθμό παρατηρήσεων. Συνεπώς, κατά την κατασκευή των θηκογραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι πλήρως όσο και οι μερικώς αξιοποιημένες προσπεράσεις. Εξάλλου, όσο μεγαλύτερο είναι το στατιστικό δείγμα, τόσο πιο αξιόπιστα προκύπτουν τα αποτελέσματα.

Το στατιστικό δείγμα για τα 70-90km/h περιλάμβανε τις 82 αντίστοιχες αξιοποιημένες προσπεράσεις, ενώ το στατιστικό δείγμα για τα 90-110km/h περιλάμβανε τις 72 αντίστοιχες αξιοποιημένες προσπεράσεις.



### 4.3.2 Κατασκευή μοντέλων

Σε αυτήν την περίπτωση κατασκευάστηκαν μοντέλα παλινδρόμησης για την πρόβλεψη των πιο σημαντικών παραμέτρων. Για τα δύο διαφορετικά σενάρια του πειράματος διαμορφώθηκαν και διαφορετικά μοντέλα. Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί παραμέτρων ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Ως εκ τούτου, όλες οι παράμετροι έπρεπε να έχουν τον ίδιο αριθμό παρατηρήσεων. Αποφασίστηκε, λοιπόν, τα μοντέλα να τροφοδοτηθούν με τα αποτελέσματα μόνο των πλήρως αξιοποιήσιμων προσπεράσεων.

Συγκεκριμένα, για το σενάριο με τις ταχύτητες 70-90km/h χρησιμοποιήθηκαν ως στατιστικό δείγμα οι 62 αντίστοιχες πλήρεις, ενώ για το σενάριο με τις ταχύτητες 90-110km/h χρησιμοποιήθηκαν ως στατιστικό δείγμα οι 40 αντίστοιχες πλήρεις προσπεράσεις.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να αποτελέσουν τις εξαρτημένες μεταβλητές των μοντέλων είναι οι KPiR,  $i=1, 2, 4, 5$ , δηλαδή οι ακτίνες των σημειακών κυκλικών τόξων για τις τέσσερις φάσεις της προσπέρασης. Αναζητήθηκε ένα μοντέλο για την κάθε μια από αυτές τις ακτίνες για κάθε ένα από τα δύο σενάρια ταχυτήτων. Σημειώνεται, πως ως εξαρτημένες μεταβλητές δοκιμάστηκαν οι παραπάνω παράμετροι τόσο στη γραμμική όσο και στη λογαριθμική τους μορφή ( $\log_{10}KPiR$ ).

Κατά την αναζήτηση αυτή, εκτός από τις ήδη καταγεγραμμένες παραμέτρους (έστω M), μορφώθηκαν και πολλές άλλες δοκιμαστικές παράμετροι (έστω N), ώστε να διαπιστωθεί με ποιες από αυτές συσχετίζονται καλύτερα οι εν λόγω ακτίνες. Οι νέες αυτές παράμετροι υπολογίστηκαν ως οι λογάριθμοι, τα τετράγωνα, οι αντίστροφοι, τα πηλίκια και τα αθροίσματα των ήδη καταγεγραμμένων παραμέτρων, μέσω των σχέσεων  $N=\log_{10}M$ ,  $N=M^2$ ,  $N=1/M$ ,  $N=M_1/M_2$  και  $N=M_1+M_2$  αντίστοιχα. Ύστερα, τα δύο στατιστικά δείγματα εμπλουτίστηκαν με αυτές τις νέες παραμέτρους και φορτώθηκαν στο RStudio.

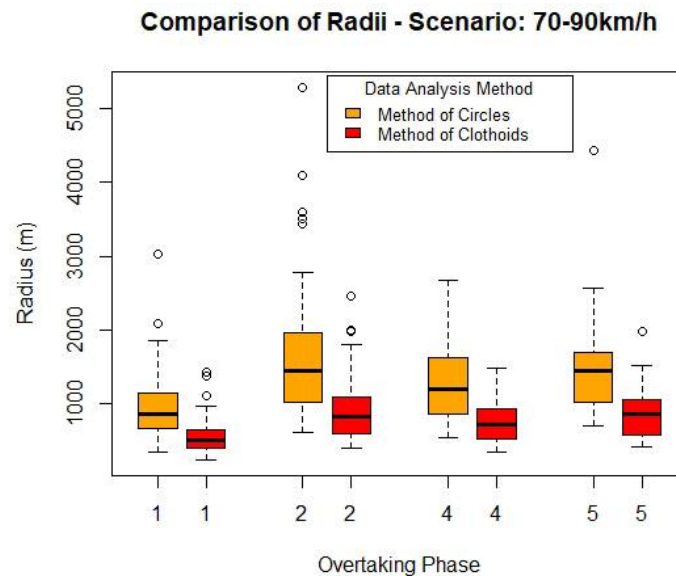
Στις περιπτώσεις που η δοκιμαστική ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν το άθροισμα ή το πηλίκιο δύο άλλων ανεξάρτητων μεταβλητών, τότε δοκιμάστηκαν μόνο συνδυασμοί αρχικών παραμέτρων που αφορούσαν σε διαδοχικές φάσεις ή διαδοχικές υπό-φάσεις. Για παράδειγμα, δεν δοκιμάστηκε ο συνδυασμός KP2aL/KP4aL, επειδή στο φυσικό ανάλογο η Υπό-Φάση 2a και η Υπό-Φάση 4a δεν αναμένεται να συσχετίζονται μεταξύ τους, κάτι επομένως η δοκιμή δεν θα είχε νόημα και θα αποτελούσε χάσιμο χρόνου. Η παραδοχή πως οι δύο ελιγμοί αλλαγής λωρίδας που αποτελούν την προσπέραση είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους αποτελεί μάλλον μια καλά θεμελιωμένη παραδοχή. Αντίθετα, θα είχε περισσότερο νόημα να δοκιμαστούν συνδυασμοί όπως KP2aL/KP2bL και KP1L/KP2L. Εξάλλου, οι φάσεις και υπό-φάσεις του ίδιου ελιγμού αλλαγής λωρίδας θα ήταν λογικό να συσχετίζονται μεταξύ τους και να επηρεάζουν η μια την άλλη. Ιδιαίτερα δε, διαδοχικές φάσεις ή υπό-φάσεις.

Η επιλογή του βέλτιστου μοντέλου πραγματοποιήθηκε με κριτήριο να προκύπτει η μεγαλύτερη δυνατή τιμή για το δείκτη Adjusted-R<sup>2</sup>. Επιπλέον, η στατιστική σημαντικότητα των μεταβλητών ελέγχθηκε με το δείκτη p-value, ο οποίος ορίστηκε ως  $p<0.05$ . Τέλος, όσον αφορά στον έλεγχο t του εκάστοτε δείγματος, καθορίστηκε ως επιθυμητή οριακή τιμή η  $t=1.5$ , δηλαδή έπρεπε να ισχύει  $|t\text{-test}|>1.5$ .

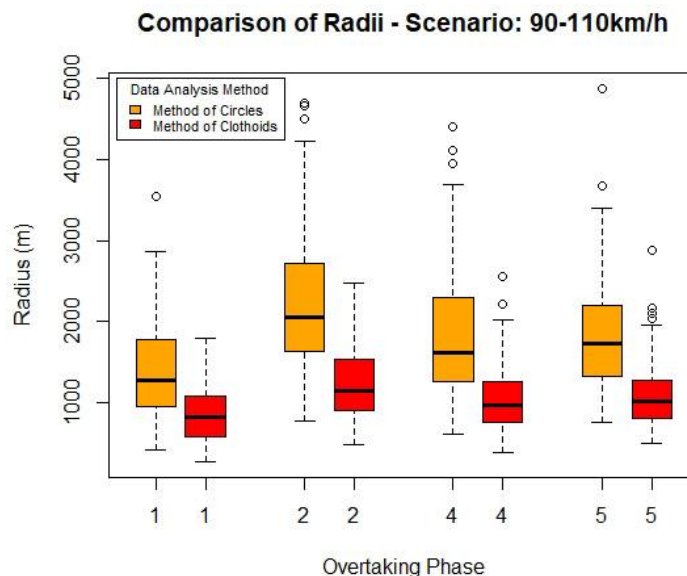
## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε. Τα κυριότερα από αυτά απεικονίζονται επιπρόσθετα και σε σχετικά γραφήματα, για πιο εύκολη αναγνωσιμότητα.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια σύγκριση, σε επίπεδο φάσης, της ακτίνας που προέκυπτε από τη μέθοδο των κύκλων και της ακτίνας που προέκυπτε από τη μέθοδο των κλωθοειδών. Τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται με τη χρήση ενός πολλαπλού θηκογράμματος. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται οι τιμές που αφορούν στο πρώτο σενάριο του οδικού πειράματος. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται οι τιμές που αφορούν στο δεύτερο σενάριο.

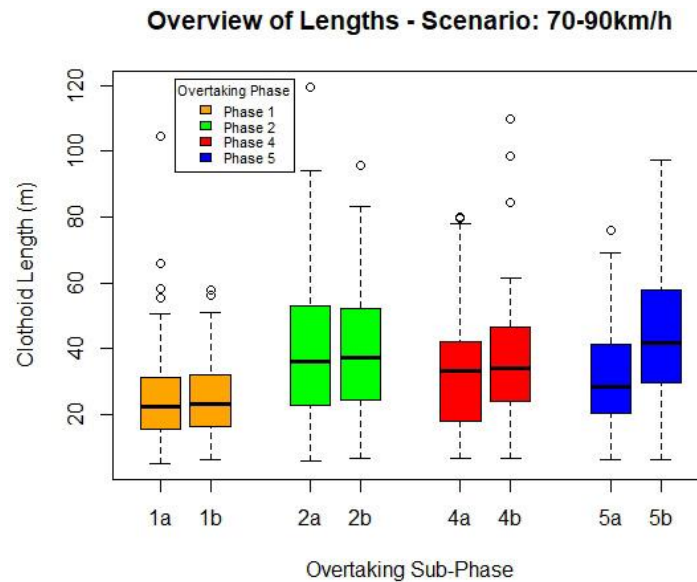


Σχήμα 5.1 Σύγκριση των ακτίνων που προέκυψαν με τις δύο μεθόδους για το πρώτο σενάριο του οδικού πειράματος.

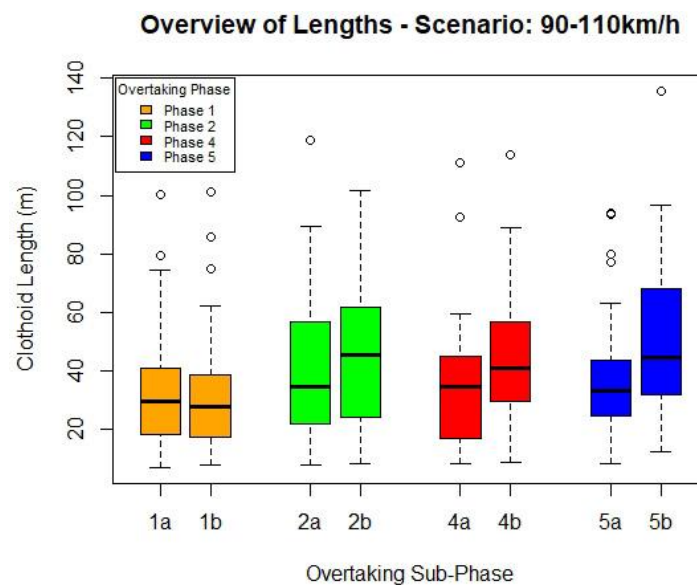


Σχήμα 5.2 Σύγκριση των ακτίνων που προέκυψαν με τις δύο μεθόδους για το δεύτερο σενάριο του οδικού πειράματος.

Στη συνέχεια, συνοψίζονται τα μήκη των επιμέρους υπό-φάσεων της προσπεράσης, όπως προέκυψαν από τη μέθοδο των κλωθοειδών, ώστε να διαφάνεται και η σχέση που έχουν μεταξύ τους. Η απεικόνιση πραγματοποιείται και πάλι με τη βοήθεια ενός πολλαπλού θηκογράμματος. Το Σχήμα 5.3 αφορά στις προσπεράσεις του πρώτου σεναρίου του οδικού πειράματος και αντίστοιχα το Σχήμα 5.4 αφορά στις προσπεράσεις του δεύτερου σεναρίου.

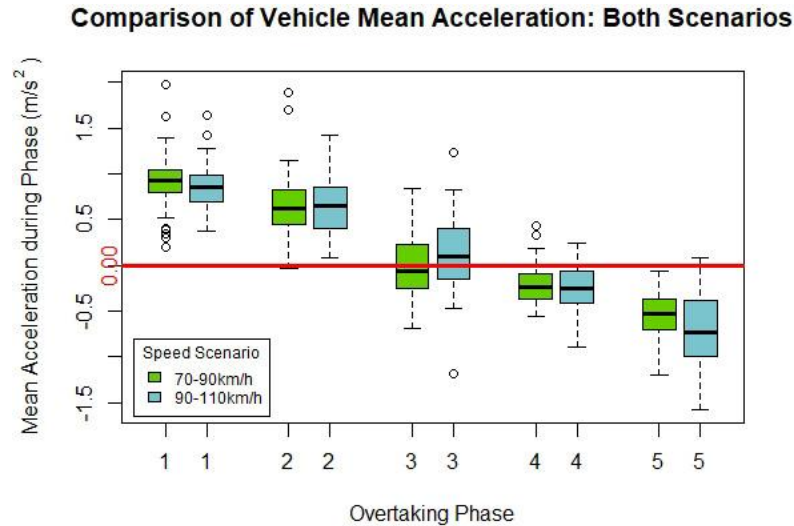


Σχήμα 5.3 Σύγκριση του μήκους των επιμέρους υπό-φάσεων για το πρώτο σενάριο του οδικού πειράματος.



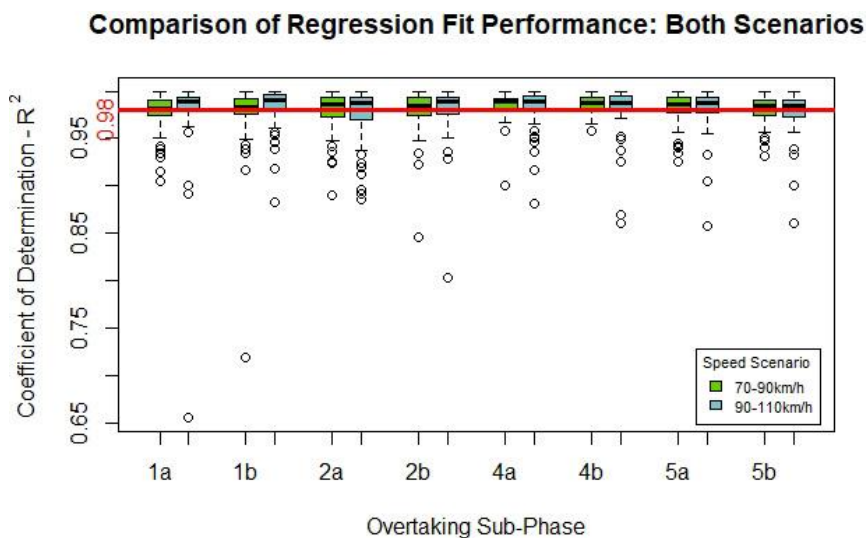
Σχήμα 5.4 Σύγκριση του μήκους των επιμέρους υπό-φάσεων για το δεύτερο σενάριο του οδικού πειράματος.

Η μελέτη μιας προσπεράσης από τη σκοπιά της κινηματικής του οχήματος επίσης προσφέρεται για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται η μέση επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάει κατά τη διάρκεια της κάθε φάσης του ελιγμού, συνολικά και για τα δύο σενάρια που προσομοιώθηκαν στο οδικό πείραμα. Η κόκκινη γραμμή έχει χαραχτεί για να διακρίνεται εύκολα το σημείο αλλαγής του προσήμου, καθώς η επιτάχυνση εδώ εξετάζεται αλγεβρικά.



*Σχήμα 5.5 Η μέση επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνάει κατά τη διάρκεια της εκάστοτε φάσης και για τα δύο σενάρια του οδικού πειράματος.*

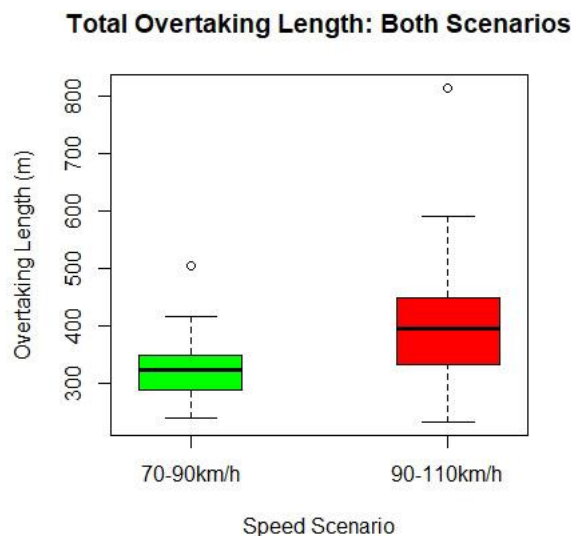
Μια ακόμη πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ , με τον οποίο ποσοτικοποιείται η ποιότητα της προσαρμογής μιας καμπύλης σε μια ομάδα δεδομένων. Στο Σχήμα 5.6 συγκεντρώνονται οι συντελεστές προσδιορισμού για όλες τις υπό-φάσεις μιας προσπέρασης, όπως αυτοί προέκυψαν από τις πολυωνυμικές παλινδρομήσεις στη μέθοδο των κλωθοειδών. Η οριζόντια κόκκινη γραμμή χαρακτήκε στην τιμή  $R^2=0.98$  και φαίνεται αμέσως, πως η προσαρμογή ήταν σε όλες τις περιπτώσεις εξαιρετική.



*Σχήμα 5.6 Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού από τη μέθοδο των κλωθοειδών για όλες τις υπό-φάσεις και των δύο σεναρίων.*

Τέλος, στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται το θηκόγραμμα του συνολικού μήκους που απαιτούνταν για να ολοκληρωθεί ο εκάστοτε ελιγμός προσπέρασης, για τα δύο σενάρια που εξετάστηκαν στο οδικό πείραμα. Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική, παρόλο

που δεν εμπεριέχει πληροφορίες για τις διάφορες φάσεις του ελιγμού. Με το συγκεκριμένο γράφημα εξάγονται γρήγορα συμπεράσματα για τη σχέση που διέπει την ταχύτητα κίνησης και το συνολικό απαιτούμενο μήκος προσπέρασης.



Σχήμα 5.7 Σύγκριση του συνολικού απαιτούμενου μήκους προσπέρασης για τα δύο σενάρια του οδικού πειράματος.

Εκτός από τα θηκογράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, κατά τη στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε αριθμητικός υπολογισμός των θηκογραμμάτων για τα αποτελέσματα όλων των παραμέτρων που είχαν καταγραφεί. Στον Πίνακα 5.1 καταγράφονται οι πέντε αριθμητικές τιμές που περιλαμβάνονται σε ένα τυπικό θηκογράμμα, για όλες τις παραμέτρους που αφορούν στο σενάριο με τις ταχύτητες 70-90km/h. Οι τιμές, όπως προκύπτουν από το RStudio είναι η ελάχιστη τιμή (min value), η τιμή που αντιστοιχεί στο πρώτο τεταρτημόριο (1<sup>st</sup> quartile value), η διάμεσος (median), η τιμή που αντιστοιχεί στο τρίτο τεταρτημόριο (3<sup>rd</sup> quartile value) και η μέγιστη τιμή (max value).

Πίνακας 5.1 Οι αριθμητικές τιμές των θηκογραμμάτων όλων των παραμέτρων για το σενάριο 70-90km/h.

Parameter	min	1 <sup>st</sup> Quartile	Median	3 <sup>rd</sup> Quartile	Max
CP1 (m)	342.9727	660.0964	861.8787	1137.7227	1851.3880
CP1R22	0.9273099	0.9539560	0.9718488	0.9838970	0.9944082
CP2 (m)	605.6992	1019.9844	1438.0920	1968.7906	2786.3198
CP2R22	0.9411243	0.9649909	0.9764280	0.9843686	0.9969611
CP4 (m)	542.8520	866.2909	1196.9376	1615.3546	2674.9137
CP4R22	0.9474264	0.9686631	0.9788169	0.9838552	0.9943836
CP5 (m)	692.8968	1017.3458	1447.5693	1700.6089	2566.9396
CP5R22	0.9233684	0.9570233	0.9719359	0.9803139	0.9942949
KP1aL (m)	5.012235	15.629001	22.551769	31.229846	50.621932
KP1aR22	0.9512630	0.9740513	0.9818130	0.9903225	0.9999788
KP1R (m)	233.2724	396.7804	509.0355	652.4984	960.9032
KP1bL (m)	6.446981	16.171331	23.140412	32.092755	50.969654
KP1bR22	0.9493118	0.9750168	0.9834484	0.9923168	0.9999887
KP2aL (m)	5.863729	22.805325	36.272851	52.993021	94.119560
KP2aR22	0.9478388	0.9734104	0.9863472	0.9931324	0.9999640
KP2R (m)	394.2808	594.5546	829.1905	1087.2480	1800.6527
KP2bL (m)	6.894081	24.336968	37.246262	52.394352	83.387856
KP2bR22	0.9483477	0.9746332	0.9844135	0.9931137	1.0000000
KP3L (m)	0.000000	23.22667	50.84707	66.99513	89.74854
KP4aL (m)	6.672181	18.183996	33.193579	42.245779	77.816333
KP4aR22	0.9662804	0.9799067	0.9885744	0.9924486	1.0000000

KP4R (m)	337.6743	525.2200	722.5838	926.1811	1479.8350
KP4bL (m)	6.515888	23.922870	33.955942	46.395823	61.416000
KP4bR22	0.9650608	0.9814863	0.9875269	0.9933439	0.9999956
KP5aL (m)	6.456738	20.322048	28.503362	41.319869	69.225689
KP5aR22	0.9563823	0.9773723	0.9862880	0.9931486	0.9999882
KP5R (m)	409.7178	583.4857	852.5280	1054.2282	1510.7694
KP5bL (m)	6.324344	29.647309	41.836573	57.710987	97.406004
KP5bR22	0.9570659	0.9746277	0.9844835	0.9902060	1.0000000
am1 (m/s <sup>2</sup> )	0.5201560	0.7908372	0.9336133	1.0389851	1.3862599
am2 (m/s <sup>2</sup> )	-0.03741382	0.44944215	0.62748142	0.82830862	1.13999904
am3 (m/s <sup>2</sup> )	-0.68592000	-0.24507350	-0.06793963	0.23289593	0.83713418
am4 (m/s <sup>2</sup> )	-0.55419218	-0.37149898	-0.23252688	-0.09382684	0.18314064
am5 (m/s <sup>2</sup> )	-1.19207420	-0.70750393	-0.52439690	-0.37296900	-0.06079745
P1stHdw(m)	11.17911	19.32382	21.98486	27.69104	38.81861
KLtot (m)	238.9114	287.8230	323.1158	350.0637	417.7032

Αντίστοιχα, στον Πίνακα 5.2 καταγράφονται οι πέντε αριθμητικές τιμές για όλες τις παραμέτρους που αφορούν στο σενάριο με τις ταχύτητες 90-110km/h.

Πίνακας 5.2 Οι αριθμητικές τιμές των θηκογραμμάτων όλων των παραμέτρων για το σενάριο 90-110km/h.

Parameter	min	1 <sup>st</sup> Quartile	Median	3 <sup>rd</sup> Quartile	Max
CP1 (m)	425.8964	952.9074	1270.5528	1780.3004	2862.7726
CP1R22	0.9275460	0.9568543	0.9736680	0.9837680	0.9934536
CP2 (m)	780.3172	1630.7971	2058.3785	2715.8286	4224.4543
CP2R22	0.9306452	0.9589758	0.9749431	0.9856398	0.9940628
CP4 (m)	611.6632	1265.8656	1612.2421	2295.0409	3687.6729
CP4R22	0.9477786	0.9685541	0.9790281	0.9851202	0.9982286
CP5 (m)	765.7593	1329.2780	1738.3465	2196.4850	3393.5542
CP5R22	0.9034340	0.9448516	0.9692337	0.9770141	0.9905642
KP1aL (m)	7.016576	18.317967	29.784252	41.071045	74.496997
KP1aR22	0.9621913	0.9794620	0.9888344	0.9938992	0.9999996
KP1R (m)	271.4883	583.4593	818.6960	1089.3437	1797.2816
KP1bL (m)	7.819153	17.580183	28.044966	38.919157	62.290450
KP1bR22	0.9611094	0.9813618	0.9907575	0.9967398	0.9999819
KP2aL (m)	7.808586	22.082780	34.588084	56.910079	89.338520
KP2aR22	0.9366332	0.9702093	0.9882083	0.9936414	0.9999747
KP2R (m)	486.6769	910.0470	1141.6412	1537.7588	2475.3721
KP2bL (m)	8.447182	24.206051	45.588175	61.651413	101.661441
KP2bR22	0.9503936	0.9752752	0.9889901	0.9931354	0.9999778
KP3L (m)	0.00000	17.63238	54.08073	101.62078	198.37410
KP4aL (m)	8.281869	17.052775	34.883201	45.097400	59.393433
KP4aR22	0.9660885	0.9811696	0.9889322	0.9954131	0.9999999
KP4R (m)	392.7249	757.3380	965.7901	1268.1812	2019.7628
KP4bL (m)	8.733249	29.583734	40.991298	56.706946	88.838282
KP4bR22	0.9710998	0.9809564	0.9881224	0.9945407	0.9999862
KP5aL (m)	8.53444	24.87335	33.35228	43.65146	63.37105
KP5aR22	0.9553104	0.9777054	0.9872716	0.9930704	0.9997045
KP5R (m)	494.4661	803.5667	1026.3383	1272.6691	1965.1245
KP5bL (m)	12.74118	31.77580	44.47077	68.14692	96.47807
KP5bR22	0.9572591	0.9731470	0.9843824	0.9906232	0.9994895
am1 (m/s <sup>2</sup> )	0.3719797	0.6924362	0.8555361	0.9798857	1.2697315
am2 (m/s <sup>2</sup> )	0.0800240	0.4064076	0.6528066	0.8548782	1.4162231
am3 (m/s <sup>2</sup> )	-0.47585700	-0.14861600	0.09961151	0.40403847	0.81795960
am4 (m/s <sup>2</sup> )	-0.8916960	-0.4152266	-0.2463897	-0.0583032	0.2461963
am5 (m/s <sup>2</sup> )	-1.5785185	-0.9950739	-0.7336894	-0.3812908	0.0800240
P1stHdw(m)	9.14227	20.73181	24.98291	35.13736	56.51331
KLtot (m)	233.4614	333.2957	395.9111	448.2503	590.8030

Όσον αφορά στα στατιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν, παρακάτω παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία του καθενός και οι έλεγχοι στατιστικής εγκυρότητας, όπως υπολογίζονταν στο RStudio.

Στην *Εικόνα 5.1* συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο “KP1R” και για το σενάριο που οι ταχύτητες κίνησης ήταν 70-90km/h. Η παράμετρος αυτή δεν είναι άλλη από τη σημειακή ακτίνα στη Φάση 1 της προσπέρασης.

```
Call:
lm(formula = Model70$KP1R ~ Model70$am1 + Model70$P1stHdw + Model70$KP1L)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-192.81  -81.74  -29.34   57.42  574.70

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -56.905    105.110  -0.541   0.5903
Model70$am1  -110.338    65.478  -1.685   0.0973
Model70$P1stHdw  8.189     2.681   3.055   0.0034 ***
Model70$KP1L  10.358     1.260   8.220  2.63e-11 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 133.8 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.683,    Adjusted R-squared:  0.6666
F-statistic: 41.65 on 3 and 58 DF,  p-value: 1.747e-14
```

*Εικόνα 5.1* Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 1 και για το σενάριο των 70-90km/h.

Το μοντέλο είναι ένα γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης (linear regression model). Η σταθερά της ευθείας (intercept) δεν προκύπτει στατιστικά σημαντική και έτσι επιλέχθηκε να μη ληφθεί υπόψη στο τελικό μοντέλο. Αντίθετα, η μέση επιτάχυνση (am1) λήφθηκε υπόψη, καθώς κρίθηκε, πως έχει στατιστική σημαντικότητα που διαφέρει λίγο από το όριο και ταυτόχρονα, πως συντελεί στη γενικότερη αύξηση του συντελεστή προσδιορισμού για το συγκεκριμένο μοντέλο. Η τελική τιμή του προσαρμοσμένου R<sup>2</sup> για το μοντέλο αυτό είναι ίση με Adjusted R-squared=0.6666, η οποία κρίνεται ικανοποιητική. Επιπλέον, η τελική p-value του μοντέλου είναι ίση με p-value=1.747·10<sup>-14</sup><<0.05.

Συνεπώς, η εξίσωση πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 1 είναι η εξής:

$$KP1R = 10.358 \cdot KP1L + 8.189 \cdot P1stHdw - 110.338 \cdot am1 \quad (5.1)$$

Στην *Εικόνα 5.2* συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο “KP2R” και για το σενάριο που οι ταχύτητες κίνησης ήταν 70-90km/h. Η παράμετρος αυτή αντιστοιχεί στη σημειακή ακτίνα στη Φάση 2 της προσπέρασης.

```
Call:
lm(formula = Model70$`LOG(KP2R)` ~ Model70$am2 + Model70$P1stHdw +
  Model70$KP1R + Model70$`KP1L/KP2L`)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.207366 -0.057571  0.004879  0.049261  0.285431

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.810e+00  7.598e-02  36.990 < 2e-16 ***
Model70$am2  2.546e-02  5.478e-02   0.465  0.64390
Model70$P1stHdw  5.951e-03  2.026e-03   2.938  0.00476 **
Model70$KP1R  5.868e-04  6.953e-05   8.439  1.29e-11 ***
Model70$`KP1L/KP2L` -5.190e-01  5.469e-02  -9.491  2.46e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.08736 on 57 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7569,    Adjusted R-squared:  0.7399
F-statistic: 44.38 on 4 and 57 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

*Εικόνα 5.2* Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 2 και για το σενάριο των 70-90km/h.

Το μοντέλο αυτό προέκυψε λογαριθμικό-γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης (log-linear regression model). Εδώ η παράμετρος “am2” δεν προκύπτει στατιστικά σημαντική και έτσι επιλέχθηκε να μη ληφθεί υπόψη. Προκύπτει Adjusted R-squared=0.7399, τιμή η οποία είναι πολύ ικανοποιητική. Η τελική p-value του μοντέλου είναι ίση με p-value=2.2·10<sup>-16</sup> που πρακτικώς ισούται με το μηδέν και άρα είναι επίσης πολύ ικανοποιητική.

Συνεπώς, η εξίσωση πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 2 είναι η εξής:

$$\log_{10} KP2R = -0.52 \frac{KP1L}{KP2L} + 5.87 \cdot 10^{-4} \cdot KP1R + 2.81 + 5.95 \cdot 10^{-3} \cdot P1stHdw \quad (5.2)$$

Ομοίως, στην *Εικόνα 5.3* συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο “KP4R” και για το σενάριο με τις ταχύτητες 70-90km/h. Η παράμετρος αυτή αντιστοιχεί στη σημειακή ακτίνα στη Φάση 4 της προσπέρασης.

```
Call:
lm(formula = Model170$KP4R ~ +Model170$am4 + Model170$KP4L)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-323.35 -103.57  -6.74    58.22   565.44

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -25.110    100.571  -0.250   0.804
Model170$am4 -139.547    109.527  -1.274   0.208
Model170$KP4L  10.638     1.302   8.172  2.8e-11 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 175.2 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.531,    Adjusted R-squared:  0.5152
F-statistic: 33.41 on 2 and 59 DF,  p-value: 1.988e-10
```

*Εικόνα 5.3* Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 4 και για το σενάριο των 70-90km/h.

Το μοντέλο αυτό προέκυψε γραμμικό. Επειδή, όμως, η “am4” και το “Intercept” δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικά, προτιμήθηκε να μη συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού είναι Adjusted R-squared=0.5152, η οποία είναι μια μάλλον όχι κακή τιμή. Όσον αφορά στο p-value, ισχύει ότι p-value=1.988·10<sup>-10</sup>.

Συνεπώς, η εξίσωση πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 4 είναι η εξής:

$$KP4R = 10.638 \cdot KP4L \quad (5.3)$$

Στην *Εικόνα 5.4* συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για τη σημειακή ακτίνα στη Φάση 5 της προσπέρασης, με το οποίο ολοκληρώνεται το πρώτο σενάριο του οδικού πειράματος.



```

Call:
lm(formula = Model705`LOG(KP5R)` ~ Model705`KP4L/KP5L` + Model705am5 +
  Model705KP4R)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.275932 -0.059276 -0.002333  0.061378  0.231788

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.816e+00  7.127e-02  39.519 < 2e-16 ***
Model705`KP4L/KP5L` -2.095e-01  5.830e-02  -3.593 0.000674 ***
Model705am5    1.108e-01  5.691e-02   1.947 0.056362 .
Model705KP4R   4.707e-04  5.702e-05   8.255 2.3e-11 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.09915 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5888,    Adjusted R-squared:  0.5675
F-statistic: 27.68 on 3 and 58 DF,  p-value: 3.073e-11

```

Εικόνα 5.4 Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 5 και για το σενάριο των 70-90km/h.

Το μοντέλο αυτό προέκυψε επίσης λογαριθμικό-γραμμικό και έχει Adjusted R-squared=0.5675 και p-value=3.073·10<sup>-11</sup>. Η τιμή του προσαρμοσμένου συντελεστή προσδιορισμού δεν είναι πολύ υψηλή, αλλά κρίθηκε ικανοποιητική.

Συνεπώς, η εξίσωση πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 5 είναι η εξής:

$$\log_{10} KP5R = 2.816 - 0.21 \frac{KP4L}{KP5L} + 0.111 \cdot am5 + 4.707 \cdot 10^{-4} \cdot KP4R \quad (5.4)$$

Περνώντας στο δεύτερο σενάριο που προσομοιώθηκε στο οδικό πείραμα, οι ταχύτητες κίνησης ήταν 90-110km/h. Στην Εικόνα 5.5 συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για τη σημειακή ακτίνα στη Φάση 1 της προσπέρασης.

```

Call:
lm(formula = Model1905`LOG(KP1R)` ~ Model1905am1 + Model1905P1stHdw +
  Model1905KP1L)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.253504 -0.052547 -0.004794  0.047496  0.247725

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.625144  0.098511  26.648 < 2e-16 ***
Model1905am1 -0.152357  0.076260  -1.998 0.053329 .
Model1905P1stHdw 0.004652  0.001851   2.513 0.016591 *
Model1905KP1L  0.004304  0.001014   4.246 0.000146 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1028 on 36 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6954,    Adjusted R-squared:  0.67
F-statistic: 27.4 on 3 and 36 DF,  p-value: 2.098e-09

```

Εικόνα 5.5 Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 1 και για το σενάριο των 90-110km/h.

Για μια ακόμη φορά, το μοντέλο βρέθηκε να είναι λογαριθμικό-γραμμικό, με Adjusted R-squared=0.67 και p-value=2.098·10<sup>-9</sup>. Και οι δύο αυτές τιμές είναι ικανοποιητικές. Συνεπώς, η εξίσωση πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 1 είναι η εξής:

$$\log_{10} KP1R = 0.004 \cdot KP1L + 2.625 + 0.005 \cdot P1stHdw - 0.152 \cdot am1 \quad (5.5)$$

Στην Εικόνα 5.6 συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για τη σημειακή ακτίνα στη Φάση 2 της προσπέρασης.

```

Call:
lm(formula = Model190$`LOG(KP2R)` ~ Model190$P1stHdw + Model190$am2 +
  Model190$KP1R + Model190$`KP1L/KP2L`)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.15388 -0.06469 -0.01236  0.04461  0.29336

Coefficients:
(Intercept)          2.906e+00  9.013e-02  32.242 < 2e-16 ***
Model190$P1stHdw    5.114e-03  2.147e-03   2.382  0.0228 *
Model190$am2        4.069e-02  6.174e-02   0.659  0.5141
Model190$KP1R       3.358e-04  7.337e-05   4.576  5.73e-05 ***
Model190$`KP1L/KP2L` -3.521e-01  7.190e-02  -4.897  2.19e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1027 on 35 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.71,    Adjusted R-squared:  0.6769
F-statistic: 21.42 on 4 and 35 DF,  p-value: 5.245e-09

```

*Εικόνα 5.6* Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 2 και για το σενάριο των 90-110km/h.

Το εν λόγω μοντέλο προέκυψε λογαριθμικό-γραμμικό, με Adjusted R-squared=0.6769 και p-value=5.245·10<sup>-9</sup>. Οι τιμές αυτές κρίνονται ικανοποιητικές. Εντούτοις, επειδή η μέση επιτάχυνση (am2) φαίνεται να μην είναι στατιστικά σημαντική, επιλέχθηκε να μη συμπεριληφθεί στην τελική μαθηματική έκφραση. Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της σημειακής ακτίνας είναι η εξής:

$$\log_{10} KP2R = 2.91 + 3.36 \cdot 10^{-4} \cdot KP1R - 0.35 + 5.11 \cdot 10^{-3} \cdot P1stHdw \quad (5.6)$$

Στην *Εικόνα 5.7* απεικονίζεται το μοντέλο πρόβλεψης για τη Φάση 4 του ελιγμού της προσπέρασης.

```

Call:
lm(formula = Model190$`LOG(KP4R)` ~ Model190$am4 + Model190$KP4L +
  Model190$`KP4aL/KP4bL`)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.21062 -0.08530  0.00786  0.06655  0.34639

Coefficients:
(Intercept)          2.6132632  0.0884851  29.533 < 2e-16 ***
Model190$am4         0.0776082  0.0854616   0.908  0.370
Model190$KP4L        0.0052435  0.0009919   5.287  6.24e-06 ***
Model190$`KP4aL/KP4bL` -0.0044675  0.0174132  -0.257  0.799
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1244 on 36 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4569,    Adjusted R-squared:  0.4116
F-statistic: 10.1 on 3 and 36 DF,  p-value: 5.752e-05

```

*Εικόνα 5.7* Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 4 και για το σενάριο των 90-110km/h.

Και σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο προκύπτει λογαριθμικό-γραμμικό, με τιμή Adjusted R-squared=0.4116 και p-value=5.752·10<sup>-5</sup>. Η τιμή του προσαρμοσμένου συντελεστή προσδιορισμού είναι χαμηλή και επομένως το μοντέλο αυτό κρίνεται, πως χρήζει εκτενέστερης διερεύνησης. Οι μεταβλητές “am4” και “KP4aL/KP4bL” δε βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντικές και άρα δε χρησιμοποιήθηκαν στο τελικό μοντέλο. Η εξίσωση υπολογισμού της σημειακής ακτίνας είναι η εξής:

$$\log_{10} KP4R = 2.6133 + 0.0052 \cdot KP4L \quad (5.7)$$

Τέλος, στην *Εικόνα 5.8* συνοψίζεται το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 5 του ελιγμού της προσπέρασης, με το οποίο ολοκληρώνεται και το δεύτερο σενάριο που προσομοιώθηκε στο οδικό πείραμα.

```

Call:
lm(formula = Model90$`LOG(KP5R)` ~ Model90$KP4R + Model90$`KP4L/KP5L` +
  Model90$am5 + Model90$am4)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.174579 -0.032806 -0.003327  0.032444  0.153197

Coefficients:
(Intercept)          3.083e+00  6.909e-02  44.630 < 2e-16 ***
Model90$KP4R         3.057e-04  3.461e-05   8.832 1.97e-10 ***
Model90$`KP4L/KP5L` -3.288e-01  4.632e-02  -7.099 2.85e-08 ***
Model90$am5          7.704e-02  3.749e-02   2.055  0.0474 *
Model90$am4          9.110e-02  5.013e-02   1.817  0.0778 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.07236 on 35 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8216,    Adjusted R-squared:  0.8012
F-statistic: 40.29 on 4 and 35 DF,  p-value: 1.224e-12

```

Εικόνα 5.8 Το μοντέλο πρόβλεψης της σημειακής ακτίνας στη Φάση 5 και για το σενάριο των 90-110km/h.

Το μοντέλο που προκύπτει είναι λογαριθμικό-γραμμικό και εμφανίζει τιμές Adjusted R-squared και p-value ίσες με 0.8012 και  $1.224 \cdot 10^{-4}$  αντίστοιχα. Και οι δύο αυτές τιμές είναι πολύ ικανοποιητικές. Παρότι η μεταβλητή “am4” εμφανίζει στατιστική σημαντικότητα ελαφρώς μεγαλύτερη από το όριο, κρίθηκε πως η διαφορά είναι μικρή και επειδή η παρουσία της αυξάνει το Adjusted R-squared αποφασίστηκε να συμπεριληφθεί στο τελικό μοντέλο. Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της σημειακής ακτίνας είναι η εξής:

$$\log_{10} KP5R = 3.08 + 3.06 \cdot 10^{-4} \cdot KP4R - 0.329 \frac{KP4L}{KP5L} + 0.077am5 + 0.091am4 \quad (5.8)$$

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται ορισμένα στοιχεία που προέκυψαν κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας και που παρουσιάζουν έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον. Αρχικά, στην ενότητα 6.1 γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και δίνονται ορισμένα γενικά συμπεράσματα. Τέλος, στην ενότητα 6.2 παρουσιάζονται ορισμένες χρήσιμες κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα επί του θέματος, όπως προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

### 6.1 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατηρώντας τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν προκύπτει, πως κάθε άρτια φάση της προσπέρασης επηρεάζεται από την προηγούμενη (περιττή) φάση. Για παράδειγμα, στην 5.2 φαίνεται πως η Φάση 2 για το σενάριο των 70-90km/h επηρεάζεται τόσο από το μήκος της Φάσης 1 (μέσω του λόγου KP1L/KP2L) όσο και από την ακτίνα της Φάσης 1 (ευθέως μέσω της μεταβλητής KP1R).

Από το Σχήμα 5.7 εξάγεται το συμπέρασμα, πως όσο αυξάνει η ταχύτητα, τόσο αυξάνει και το συνολικό απαιτούμενο μήκος για ολοκλήρωση της προσπέρασης. Από αυτό υπονοείται, πως ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος για ολοκλήρωση της προσπέρασης παραμένει σταθερός, ανεξαρτήτως της ταχύτητας κίνησης των δύο οχημάτων που συμμετέχουν στον ελιγμό. Κάτι τέτοιο εξηγείται από την κοινή λογική, επειδή η διαφορά στη μέγιστη ταχύτητα των δύο οχημάτων παρέμενε σταθερή και ίση με 20km/h, αλλά επίσης και η επιτάχυνση του οχήματος που προσπερνούσε, κατά τις δύο πρώτες φάσεις, ήταν περίπου η ίδια και στα δύο σενάρια ταχυτήτων που εξετάστηκαν (Σχήμα 5.5).

Μελετώντας το Σχήμα 5.5 γίνεται αμέσως εμφανές, πως το όχημα που προσπερνάει επιτάχυνε κατά τη Φάση 1 και τη Φάση 2 της προσπέρασης. Ο μηδενισμός της επιτάχυνσης κατά τη Φάση 3 σημαίνει, πως το όχημα είχε πιάσει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας (+20km/h σε σχέση με το όχημα που προσπερνούσαν) και κινούνταν πλέον ευθύγραμμο ομαλά. Αυτό που δεν ήταν αναμενόμενο, όμως, είναι η αρνητική επιτάχυνση (δηλαδή η επιβράδυνση) που εμφανίζεται κατά τη Φάση 4 και ακόμα περισσότερο κατά τη Φάση 5 του ελιγμού.

Μια πολύ πιθανή εξήγηση έχει να κάνει με το γεγονός, ότι κατά τη Φάση 3 οι οδηγοί είχαν στραμμένη την προσοχή τους μόνο στο γκάζι και στη λωρίδα κυκλοφορίας τους, που ήταν ακριβώς μπροστά στο οπτικό τους πεδίο. Αντίθετα, με τη Φάση 4 ξεκινούσε ο δεύτερος ελιγμός αλλαγής λωρίδας, ώστε να επανέλθει το όχημα στη δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας. Ως εκ τούτου, οι οδηγοί έπαυαν να έχουν την προσοχή τους αποκλειστικά προς τα εμπρός και έστρεφαν το βλέμμα τους και στους καθρέπτες, ώστε να μη συγκρουστούν με το όχημα που προσπερνούσαν. Επομένως η προσοχή τους διαιρούσαν σε τρία επιμέρους στοιχεία, με τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας να αποτελεί τη λιγότερο κρίσιμη παράμετρο από τη σκοπιά της οδικής ασφάλειας. Συνεπώς, οι οδηγοί “ξεχνούσαν” να διατηρήσουν σταθερή την ταχύτητά τους πατώντας όσο πρέπει το

γκάζι και εξαιτίας των τριβών που αναπτύσσονταν στο σύστημα τροχοί-οδόστρωμα, το όχημα προέκυπτε να επιβραδύνει.

Εκτός από αυτό, όμως, δεν μπορεί να αποκλειστεί και το ενδεχόμενο οι οδηγοί να ήταν απλώς “αγχωμένοι” να μην υπερβούν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα του εκάστοτε σεναρίου. Παρότι η ερευνητική ομάδα διαβεβαίωνε τους οδηγούς, πως μια απόκλιση  $\pm 5\text{km/h}$  από τη θεωρητική ανώτατη ταχύτητα ήταν αποδεκτή, ίσως οι οδηγοί υποσυνείδητα να φοβούνται να πατήσουν το γκάζι όσο έπρεπε, μη και υπερέβαιναν το όριο ταχύτητας. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα, οι όποιες διακυμάνσεις στην ταχύτητα κίνησης να ήταν μόνο προς τα κάτω, κάτι το οποίο θα μεταφραζόταν ως επιβράδυνση, δεδομένου πως κατά τη Φάση 3 η μέγιστη ταχύτητα κίνησης θα είχε ήδη επιτευχθεί. Σε κάθε περίπτωση, η εμφάνιση επιβράδυνσης κατά τη Φάση 4 και τη Φάση 5 έρχεται σε αντίθεση με τις γενικότερες οδηγίες που είχαν δοθεί και η πραγματική αιτία θα μπορούσε να είναι η διάσπαση της προσοχής, ο φόβος υπέρβασης του ορίου ταχύτητας, ένας συνδυασμός αυτών ή κάποια εντελώς άλλη εξήγηση.

Ένα ακόμη πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα, το οποίο εξάγεται παρατηρώντας τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, έχει να κάνει με τις επιμέρους υπό-φάσεις της προσπέρασης. Συγκεκριμένα διαπιστώνεται, πως σε κανένα από τα οκτώ μοντέλα δεν υπαισέρχεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή η αναλογία των μηκών των επιμέρους υπό-φάσεων, δηλαδή για παράδειγμα για τη Φάση 2 ο λόγος  $KP2aL/KP2bL$ . Αυτό σημαίνει, πως η ακτίνα δεν επηρεάζεται από το σημείο μετάβασης από την κλωθοειδή εισόδου στην κλωθοειδή εξόδου, στην τυπική καμπύλη της κάθε φάσης. Πράγματι, αυτό αποτελεί ένα λογικό συμπέρασμα, καθώς αποδείχτηκε και μαθηματικά, πως η ακτίνα του εκάστοτε κυκλικού τόξου είναι ανεξάρτητη της επιλογής του ενδιάμεσου σημείου μετάβασης. Αντίθετα, αυτό που παίζει ρόλο είναι το συνολικό μήκος  $L$  της κάθε φάσης, το οποίο πράγματι υπαισέρχεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή και στα οκτώ μοντέλα που κατασκευάστηκαν.

Παρατηρώντας το *Σχήμα 5.1* και το *Σχήμα 5.2* και πραγματοποιώντας τη σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων επεξεργασίας εξάγεται το συμπέρασμα, πως οι ακτίνες που προκύπτουν με τη μέθοδο των κύκλων είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις ακτίνες που προκύπτουν με τη μέθοδο των κλωθοειδών. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στις τέσσερις φάσεις της προσπέρασης και στα δύο σενάρια ταχυτήτων.

Μια ακόμα διαπίστωση που εξάγεται από τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν είναι, πως η παράμετρος  $headway$  ( $P1stHdw$ ) επηρεάζει μόνο την ακτίνα στη Φάση 1 και στη Φάση 2 και μάλιστα και στις δύο ταχύτητες που εξετάστηκαν. Δε βρέθηκε καμία συσχέτιση μεταξύ αυτού και της ακτίνας στη Φάση 4 ή τη Φάση 5 σε κανένα από τα δύο σενάρια ταχυτήτων. Παράλληλα, καμία παράμετρος από τη Φάση 1, τη Φάση 2 ή τη Φάση 3 δε βρέθηκε να συσχετίζεται με την ακτίνα στη Φάση 4 και τη Φάση 5. Αυτό σημαίνει, πως οι δύο ελιγμοί αλλαγής λωρίδας (Φάση 1-Φάση 2 και Φάση 4-Φάση 5) είναι εντελώς ανεξάρτητοι μεταξύ τους και μπορούν να μελετηθούν ακόμα και ξεχωριστά. Αυτό το εύρημα επιβεβαιώνει και την παραδοχή που είχε πραγματοποιηθεί στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της παρούσας εργασίας, σύμφωνα με την οποία λήφθηκαν εξίσου υπόψη μελέτες που αφορούν στην προσπέραση και μελέτες που αφορούν μόνο στην αλλαγή λωρίδας.

Τέλος, στο Σχήμα 5.6 αποκρυσταλλώνεται αδιαμφισβήτητα η εξαιρετική προσαρμογή στα δεδομένα που επιτεύχθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου των κλωθοειδών. Οι διάμεσοι που αντιστοιχούν σε όλες τις υπό-φάσεις του ελιγμού βρίσκονται πάνω από το φράγμα του 0.98. Αυτή η σχεδόν τέλεια προσαρμογή που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των κλωθοειδών σημαίνει, πως αυτή δύναται να χρησιμοποιηθεί για τη μαθηματική περιγραφή της τροχιάς που ακολουθεί ένα όχημα καθώς εκτελεί ελιγμό προσπέρασης.

Μάλιστα, οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού που προκύπτουν με τη μέθοδο των κλωθοειδών είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου που προκύπτουν με τη μέθοδο των κύκλων. Αυτό το τελευταίο δεν αποτυπώνεται σε κάποιο σχήμα, αλλά αποτελεί γενική διαπίστωση, η οποία επιβεβαιώνεται και από τις τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 5.1 και στον Πίνακα 5.2. Αυτή η καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των κλωθοειδών αποτελεί ισχυρότατη ένδειξη (αλλά όχι απόδειξη), πως η εν λόγω μέθοδος αποτελεί καλύτερο μαθηματικό προσομοίωμα από τη μέθοδο των κύκλων για τον ελιγμό της προσπέρασης.

Είναι γεγονός, πως με τη χρήση κλωθοειδών διασφαλίζεται η συνέχεια του διαγράμματος καμπυλότητας κατά την κίνηση του οχήματος. Επιπλέον, οι επιταχύνσεις που νιώθουν οι επιβάτες και το ίδιο το όχημα είναι τέτοιες, που δεν εγείρεται ζήτημα άνεσης ή οδικής ασφάλειας.

Συμπερασματικά, και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η μέθοδος των κλωθοειδών συστήνεται έντονα για χρήση ως μαθηματικό προσομοίωμα για την περιγραφή της τροχιάς ενός οχήματος που εκτελεί ελιγμό προσπέρασης.

## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία μιας λειτουργικής και χρηστικής βάσης δεδομένων, στην οποία συγκεντρώθηκαν όλες οι καταγεγραμμένες τροχιές προσπεράσεων. Προκειμένου, όμως, να μπορούν να εκτελεστούν πιο εκτεταμένες έρευνες πάνω στο αντικείμενο, θα πρέπει η βάση δεδομένων να εμπλουτιστεί με περισσότερα πειραματικά δεδομένα. Προτείνεται, τα δεδομένα αυτά να αφορούν σε μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων κίνησης, ώστε τα μοντέλα που θα προκύψουν να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερα οδηγικά σενάρια. Παράλληλα, καλό θα ήταν να συμπεριληφθούν περισσότεροι οδηγοί μεγαλύτερης ηλικίας στα πειράματα, ώστε να παίζει ρόλο στη στατιστική ανάλυση και η δική τους οδηγική συμπεριφορά.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για έρευνα θα ήταν η διενέργηση όμοιων πειραμάτων, αλλά με την εγκατάσταση μιας αισθητήριας διάταξης στο όχημα που προσπερνάει, η οποία θα καταγράφει για κάθε χρονική στιγμή τη γωνία στροφής του τιμονιού. Η ακριβής γνώση αυτής της παραμέτρου αναμένεται να εξασφαλίσει τη σχετικά εύκολη ανάπτυξη ακριβούς αλγοριθμικής μεθόδου για τον προσδιορισμό των συνοριακών σημείων της κάθε φάσης της προσπέρασης. Με αυτόν τον τρόπο, τα σφάλματα που σχετίζονται με την επιλογή των σημείων αυτών θα εξαλειφθούν από τη μεθοδολογία. Επιπλέον, δεν θα γίνεται πλέον λόγος για “περιοχή αρχής” (αντίστοιχα πέρατος)

μιας φάσης αλλά για “σημείο αρχής” (αντίστοιχα πέρατος). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων όπως θα προέκυπταν με αυτή τη μέθοδο, με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα αποτελούσε μια ενδιαφέρουσα αξιολόγηση της επιρροής που τελικά έχει στο αποτέλεσμα ο ακριβής προσδιορισμός των συνοριακών σημείων.

Μια ακόμη κατεύθυνση για μελλοντική εφαρμογή είναι η αναζήτηση και η ενσωμάτωση στα μοντέλα πρόβλεψης περισσότερων και καλύτερων ανεξάρτητων μεταβλητών, ιδιαίτερα σε αυτά που αναφέρονται στη Φάση 1 και τη Φάση 4. Ειδικότερα, οι διαμήκεις και εγκάρσιες αποστάσεις των δύο οχημάτων (headway και lateral safety margin) στην αρχή της κάθε φάσης αναμένεται να εμφανίσουν μεγάλη συσχέτιση με τις αντίστοιχες σημειακές ακτίνες. Οι παράμετροι αυτές αποτελούν μεγέθη τα οποία θα μπορούσαν να μετρώνται απευθείας στο πεδίο και σε πραγματικό χρόνο, μέσω συσκευών RADAR ή και LiDAR, τις οποίες τα αυτόνομα οχήματα ούτως η άλλως διαθέτουν.

Επιπλέον, θα είχε έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον η προσπάθεια ένταξης στα εξαγόμενα μοντέλα και ενός τρίτου, αντίθετα κινούμενου οχήματος. Η ύπαρξη ενός τέτοιου οχήματος αναμένεται να επιδράσει σε μεγάλο βαθμό στα μοντέλα και σίγουρα θα συντελέσει στο να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τις παραδοχές των υπαρχόντων μοντέλων ορατότητας για προσπέρασης (PSD models).

Τέλος, μια σημαντική εφαρμογή της μεθόδου των κλωθοειδών θα ήταν η χάραξη μιας πλήρους τροχιάς προσπέρασης. Αρκεί η ενσωμάτωση των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, ώστε να συνδεθούν στην οριζοντιογραφία τα γεωμετρικά στοιχεία των διαδοχικών φάσεων και να μην υπάρχουν ασυνέχειες στην τροχιά του οχήματος. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό, θα ήταν να εισαχθούν στα μοντέλα της εκάστοτε επόμενης φάσης ο προσανατολισμός και η χιλιομετρική θέση που έχει το όχημα στο τέλος της προηγούμενης φάσης. Ύστερα από αυτό το βήμα, η χάραξη σε πραγματικό χρόνο ολόκληρων τροχιών προσπέρασης θα ήταν μια απλή υπόθεση.

---

 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ
 

---

- AASHTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 6th Edition*.
- AASHTO. (2018). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 7th Edition*.
- AG-NAV. (n.d.). Retrieved from <https://archive.ph/20120203041216/http://www.agnav.com/RealTimeKinematicSystem>
- Alia, C., Reine, T., & Ali, C. (2017, October). Maneuver planning for autonomous vehicles, with clothoid tentacles for local trajectory planning. *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (pp. 1-6).
- Al-Kaisy, A., Hall, F., & Reisman, E. (2002). Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(8), pp. 725-742.
- Apostoleris, K., Vardaki, S., & Mertzanis, F. (2013). Identification of safety hazards on existing road network regarding road—Geometric design: Implementation in Greece. *Proceedings RSS Conference*.
- ARGUS TRACKING. (2020). Retrieved from <https://argustracking.zendesk.com/hc/en-us/articles/333757037696-GPS-Accuracy-Bouncing-Multipath->
- Asaithambi, G., & Shrivani, G. (2017). Overtaking behaviour of vehicles on undivided roads in non-lane based mixed traffic conditions. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, 4(3), pp. 252-261.
- Benedetto, A., Calvi, A., & D'Amico, F. (2006). Approach based on interactive simulation for design of main rural roads. *Proceedings of Third Gulf Conference on Road TGCR06Muscat, Oman*.
- Carlson, P., Miles, J., & Johnson, P. (2006). Daytime high-speed passing maneuvers observed on rural two-lane, two-way highway: Findings and implications. *Transportation research record*, 1961(1), pp. 9-15.
- CGS Europe. (n.d.). Retrieved from <http://repository.cgseurope.net/eng/cgseurope/knowledge-repository/key-reports/monitoring/2/2/2.aspx>
- Chee, W., & Tomizuka, M. (1994). *Vehicle lane change maneuver in automated highway systems*.
- Chee, W., & Tomizuka, M. (1994, June). Lane change maneuver of automobiles for the intelligent vehicle and highway system (IVHS). *Proceedings of 1994 American Control Conference-ACC'94, Vol. 3*, (pp. 3586-3587).



- Chee, W., Tomizuka, M., Patwardhan, S., & Zhang, W. (1995, June). Experimental study of lane change maneuver for AHS applications (002) 19951031. *Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95, Vol. 1*, (pp. 139-143).
- Chen, J., Zhao, P., Mei, T., & Liang, H. (2013, July). Lane change path planning based on piecewise bezier curve for autonomous vehicle. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, (pp. 17-22).
- Choi, J., Curry, R., & Elkaim, G. (2008, October). Path planning based on bézier curve for autonomous ground vehicles. *Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008*, pp. 158-166.
- Choi, J., Curry, R., & Elkaim, G. (2010). Piecewise bezier curves path planning with continuous curvature constraint for autonomous driving. *Machine learning and systems engineering*, pp. 31-45.
- Clynch, J. (2000). GPS Accuracy Factors. Retrieved 2021, from <https://www.oc.nps.edu/oc2902w/gps/accfact.html>
- Clynch, J. (2001). GPS Accuracy Levels. Retrieved 2021, from <https://www.oc.nps.edu/oc2902w/gps/gpsacc.html>
- Connors, J., & Elkaim, G. (2007, April). Analysis of a spline based, obstacle avoiding path planning algorithm. *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring*, (pp. 2565-2569).
- eeNewsEurope*. (n.d.). Retrieved 2021, from <https://www.eenewseurope.com/news/elektrobit-rolls-four-more-software-modules-autonomous-driving>
- Federal Highway Administration Research and Technology*. (2017a). Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/07030/>
- Federal Highway Administration Research and Technology*. (2017b). Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/06137/>
- Ghaffari, A., Alimardani, F., Khodayari, A., & Sadati, H. (2011, November). ANFIS based modeling for overtaking maneuver trajectory in motorcycles and autos. *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, (pp. 68-73).
- GISGeography*. (2021). Retrieved from <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>
- Glaser, S., Vanholme, B., Mammari, S., Gruyer, D., & Nouveliere, L. (2010). Maneuver-based trajectory planning for highly autonomous vehicles on real road with traffic and driver interaction. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 11(3), pp. 589-606.

- Godthelp, J. (1985). Precognitive control: Open-and closed-loop steering in a lane-change manoeuvre. *Ergonomics*, 28(10), pp. 1419-1438.
- GPS.GOV. (n.d.). Retrieved from <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy>
- Gray, A., Gao, Y., Lin, T., Hedrick, J., Tseng, H., & Borrelli, F. (2012, June). Predictive control for agile semi-autonomous ground vehicles using motion primitives. *2012 American Control Conference (ACC)*, (pp. 4239-4244).
- Henning, W. (2014). *National Geodetic Survey*. Retrieved 2021, from [https://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/UserGuidelinesForSingleBaseRealTimeGNSSPositioningv.3.1APR2014-1.pdf](https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/UserGuidelinesForSingleBaseRealTimeGNSSPositioningv.3.1APR2014-1.pdf)
- Holgado-Barco, A., González-Aguilera, D., Arias-Sanchez, P., & Martinez-Sanchez, J. (2015). Semiautomatic extraction of road horizontal alignment from a mobile LiDAR system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(3), pp. 217-228.
- House, D. (n.d.). Retrieved 2021, from <https://people.cs.clemson.edu/~dhouse/courses/405/notes/splines.pdf>
- Huang, X., Zhang, W., & Li, P. (2019). A path planning method for vehicle overtaking maneuver using sigmoid functions. *IFAC-PapersOnLine*, 52(8), pp. 422-427.
- IGS Product Specifications. (n.d.). Retrieved from About Products: <https://www.igs.org/products/#about>
- International GNSS Service. (n.d.). Retrieved from Ephemeris Products FTP Server: <ftp://igs.ign.fr/>
- Isermann, R., Mannale, R., & Schmitt, K. (2012). Collision-avoidance systems PRORETA: Situation analysis and intervention control. *Control Engineering Practice*, 20(11), pp. 1236-1246.
- Jenkins, J., & Rilett, L. (2004). Application of distributed traffic simulation for passing behavior study. *Transportation research record*, 1899(1), pp. 11-18.
- Jolly, K., Jumar, R., & Vijayakumar, R. (2009). A Bezier curve based path planning in a multi-agent robot soccer system without violating the acceleration limits. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(1), pp. 23-33.
- Kanayama, Y., & Hartman, B. (1997). Smooth local-path planning for autonomous vehicles1. *The International Journal of Robotics Research*, 16(3), pp. 263-284.
- Karamanou, A., Papazissi, K., Paradissis, D., & Psarianos, B. (2009). Precise estimation of road horizontal and vertical geometric features using mobile mapping techniques. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15(5), pp. 762-775.
- Kasper, H., Schürba, W., & Lorenz, H. (1956). *Die Klothoide als Trassierungselement*. Bonn, Germany.
- Kline, M. (1977). *Calculus: An Intuitive and Physical Approach (2nd ed.)*.

- Levien, R. (2008). *The Euler spiral: a mathematical history*. Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley.
- Llorca, C., & Farah, H. (2016). Passing behavior on two-lane roads in real and simulated environments. *Transportation Research Record*, 2556(1), pp. 29-38.
- Llorca, C., & García, A. (2011). Evaluation of passing process on two-lane rural highways in Spain with new methodology based on video data. *Transportation research record*, 2262(1), pp. 42-51.
- Llorca, C., Moreno, A., Garcia, A., & Zuriaga, A. (2014). Multiple passing maneuvers: new design and marking criteria to improve safety. *Advances in Transportation Studies*.
- Lu, C., Wang, H., Lv, C., Gong, J., Xi, J., & Cao, D. (2018). Learning driver-specific behavior for overtaking: A combined learning framework. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8), pp. 6788-6802.
- Matias, B., Oliveira, H., Almeida, J., Dias, A., Ferreira, H., Martins, A., & Silva, E. (2015, May). High-accuracy low-cost RTK-GPS for an unmanned surface vehicle. *OCEANS 2015-Genova (pp. 1-4)*, pp. 1-4.
- Mavromatis, S., Matragos, V., Liza, R., Apostoleris, K., Grammatikopoulos, L., & Yannis, G. (2019). Passing sight distance assessment through the interaction of road–vehicle parameters.
- Montes, N., Mora, M., & Tornero, J. (2007, June). Trajectory generation based on rational bezier curves as clothoids. *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (pp. 505-510).
- Moridpour, S., Rose, G., & Sarvi, M. (2010). Effect of surrounding traffic characteristics on lane changing behavior. *Journal of Transportation Engineering*, 136(11), pp. 973-985.
- Naranjo, J., Gonzalez, C., Garcia, R., & De Pedro, T. (2008). Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(3), pp. 438-450.
- Nelson, W. (1989, May). Continuous-curvature paths for autonomous vehicles. *Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 1260-1264).
- NGS GPS Calendar. (n.d.). Retrieved from <https://geodesy.noaa.gov/CORS/Gpscal.shtml>
- Nilsson, J., Brännström, M., Coelingh, E., & Fredriksson, J. (2015, July). Longitudinal and lateral control for automated lane change maneuvers. *2015 American Control Conference (ACC)*, (pp. 1399-1404).
- Ossen, S., & Hoogendoorn, S. (2008). Validity of trajectory-based calibration approach of car-following models in presence of measurement errors. *Transportation Research Record*, 2088(1), pp. 117-125.

- Papadimitriou, I., & Tomizuka, M. (2003, June). Fast lane changing computations using polynomials. *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003, Vol. 1*, (pp. 48-53).
- Perez, J., Milanes, V., Onieva, E., Godoy, J., & Alonso, J. (2011, April). Longitudinal fuzzy control for autonomous overtaking. *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, (pp. 188-193).
- Petrov, P., & Nashashibi, F. (2014). Modeling and nonlinear adaptive control for autonomous vehicle overtaking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4), pp. 1643-1656.
- Pietzsch, W. (1976). *Strassenplanung*.
- Polus, A., & Tomecki, A. (1987). Passing experiment on two-lane rural highways. *Transportation research record*, 1112, pp. 115-123.
- Polus, A., Livneh, M., & Frischer, B. (2000). Evaluation of the passing process on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 1701(1), pp. 53-60.
- Pressley, A. (2010). *Elementary Differential Geometry, Second Edition*. Springer.
- Ren, D., Zhang, J., Zhang, J., & Cui, S. (2011). Trajectory planning and yaw rate tracking control for lane changing of intelligent vehicle on curved road. *Science China Technological Sciences*, 54(3), pp. 630-642.
- RietDorf, A., Daub, C., & Loef, P. (2006, March). Precise positioning in real-time using navigation satellites and telecommunication. *Proceedings of The 3rd Workshop on Positioning and Communication (WPNC'06)*.
- Salvucci, D., & Liu, A. (2002). The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 5(2), pp. 123-132.
- Sazgar, H., Azadi, S., & Kazemi, R. (2020). Trajectory planning and combined control design for critical high-speed lane change manoeuvres. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(2-3), pp. 823-839.
- Scheuer, A., & Fraichard, T. (1997, April). Collision-free and continuous-curvature path planning for car-like robots. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1*, (pp. 867-873).
- Shamir, T. (2004). How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle: Design and analysis of an optimal trajectory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(4), pp. 607-610.
- Shiller, Z., & Sundar, S. (1998). Emergency lane-change maneuvers of autonomous vehicles.
- Spanier, J., & Oldham, K. (1987). *AN ATLAS OF FUNCTIONS*. Hemisphere Publishing Corporation.

- Stewart, J. (2012). *Calculus: Early Transcendentals, Seventh Edition*. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Thiemann, C., Treiber, M., & Kesting, A. (2008). Estimating acceleration and lane-changing dynamics from next generation simulation trajectory data. *Transportation Research Record, 2088(1)*, pp. 90-101.
- Thompson, S., & Kagami, S. (2005, November). Continuous curvature trajectory generation with obstacle avoidance for car-like robots. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06), Vol. 1*, (pp. 863-870).
- Usman, G., & Kunwar, F. (2009, August). Autonomous vehicle overtaking-an online solution. *2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, (pp. 596-601).
- Vetters, A., & Jaehrig, T. (2015, October). Verification of the existing model for passing sight distance on single two-lane rural carriageways. *2015 6th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, (pp. 557-561).
- Vu, A., Farrell, J., & Barth, M. (2013). Centimeter-accuracy smoothed vehicle trajectory estimation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 5(4)*, pp. 121-135.
- Wang, J., Wang, C., Song, X., & Raghavan, V. (2017). Automatic intersection and traffic rule detection by mining motor-vehicle GPS trajectories. *Computers, Environment and Urban Systems*, pp. 19-29.
- Wang, Q., Li, Z., & Li, L. (2014). Investigation of discretionary lane-change characteristics using next-generation simulation data sets. *Journal of Intelligent Transportation Systems, 18(3)*, pp. 246-253.
- Wanninger, L. (2008). Introduction to Network RTK. Retrieved 2021, from <http://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html>
- Wikimedia Commons. (n.d.). Retrieved from <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gps-atmospheric-efects.png>
- Wilde, D. (2009, October). Computing clothoid segments for trajectory generation. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (pp. 2440-2445).
- Xuan, Y., & Coifman, B. (2006, September). Lane change maneuver detection from probe vehicle DGPS data. *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, (pp. 624-629).
- Yang, D., Zheng, S., Wen, C., Jin, P., & Ran, B. (2018). A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 95*, pp. 228-247.

- Yang, D., Zhu, L., Ran, B., Pu, Y., & Hui, P. (2016). Modeling and analysis of the lane-changing execution in longitudinal direction. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 17(10), pp. 2984-2992.
- Yang, D., Zhu, L., Yang, F., & Pu, Y. (2015). Modeling and analysis of lateral driver behavior in lane-changing execution. *Transportation research record*, 2490(1), pp. 127-137.
- Yao, W., Zhao, H., Bonnifait, P., & Zha, H. (2013, June). Lane change trajectory prediction by using recorded human driving data. *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 430-436), (pp. 430-436).
- Yates, R. (1947). *A Handbook On Curves And Their Properties*. J.W. Edwards.
- Yu, Y., El Kamel, A., & Gong, G. (2014). Modeling and simulation of overtaking behavior involving environment. *Advances in Engineering Software*, 67, pp. 10-21.
- Zhang, S., Deng, W., Zhao, Q., Sun, H., & Litkouhi, B. (2013, October). Dynamic trajectory planning for vehicle autonomous driving. *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, (pp. 4161-4166).
- Αλβέρτης, Α. (2020). Διερεύνηση της τροχιάς οχημάτων κατά τη διαδικασία προσπέρασης με χρήση προσομοιωτή οδήγησης. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Βασιλάς, Α. (2013). Ανάπτυξη Λογισμικού για Ψηφιακή Απόδοση της Χάραξης Υφιστάμενης Οδού. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κανελλαΐδης, Γ., Μερτζάνης, Φ., Γλαρός, Γ., & Βαρδάκη, Σ. (2017). *Σημειώσεις Γεωμετρικού Σχεδιασμού των Οδών*. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κεφάλαιο 6: Εγγεγραμμένα Σχήματα. (n.d.). Στο Η. Αργυρόπουλος, Π. Βλάμος, Γ. Κατσούλης, Σ. Μαρκάτης, & Π. Σιδέρης, *Γεωμετρία (Α' Λυκείου) - Βιβλίο Μαθητή*. Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων "Διόφαντος".
- Κύρκος, Ε. (2015). *Επιχειρηματική ευφυΐα και εξόρυξη δεδομένων*.
- Μαυρομάτης, Σ. (2018). *Σημειώσεις για το μάθημα Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών*. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΟΜΟΕ - Χ. (2001). *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ)*. Τεύχος 3: Χαράξεις. Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας.
- Πατλάκης, Κ. (2018). *Τοπογραφία: Σημειώσεις, Τυπολόγιο, Ασκήσεις-Παραδείγματα*. Σέρρες: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας.
- Ρασσιάς, Θ. (2014). *ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Ι*. Τσότρας.

Χατζηελευθερίου, Γ. (2020). Προτυποποίηση τροχιάς προσπέρασης οχημάτων κινούμενα με σταθερή ταχύτητα μέσω προσομοιωτή οδήγησης. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.