



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Οχημάτων

**Επεξεργασία Μετρήσεων Δυναμικών
Μεγεθών Βυτιοφόρων Οχημάτων για την
εκτίμηση της οδηγικής συμπεριφοράς**

Διπλωματική Εργασία

Χατζηγιαννίδης Αριστοτέλης

Επιβλέπων:

Δρ.-Μηχ. Δημήτριος Κουλοχέρης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία ασχολείται με την ανάλυση μετρήσεων δυναμικών μεγεθών οχήματος με στόχο την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς στην ιδιαίτερη περίπτωση των βυτιοφόρων οχημάτων. Εξετάσθηκαν λεπτομερώς μετρήσεις αλλά και μαγνητοσκοπήσεις από ενδεικτικές διαδρομές τις οποίες πραγματοποίησαν βυτιοφόρα οχήματα υπό την επίβλεψη του Εργαστηρίου Οχημάτων του ΕΜΠ, προκειμένου να αποκαλυφθεί η επίδραση της οδηγικής συμπεριφοράς στα εν λόγω μετρούμενα μεγέθη και τις αντίστοιχες μετρήσεις. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η αιτιότητα μεταξύ των μετρήσεων και των χειρισμών του οδηγού αλλά και των συνθηκών τις οποίες διαμορφώνει το οδόστρωμα, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των βυτιοφόρων οχημάτων (π.χ. βάρος, φυσική κατάσταση φορτίου κ.ά.). Επιπρόσθετα, κατέστη εμφανής η διαφοροποίηση των μετρήσεων μεταξύ δυο διαφορετικών οχημάτων, με παρουσία αλλά και με έλλειψη περιεχόμενου ρευστού στη δεξαμενή τους. Η αποτύπωση αυτή αποκτήθηκε μέσω περιπτωσιολογικής μελέτης την οποία κατέστησε εφικτή η στρατηγική ποικιλότητα των πειραμάτων σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά τους.

Ακόμα, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες αξιοποίησης των μετρήσεων για τη συστηματική, χωρίς την ανάγκη παρέμβασης του ερευνητή, αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Δεδομένου ότι τα βυτιοφόρα οχήματα αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο ανατροπής με συγχρόνως αισθητά καταστροφικότερες συνέπειες, η έρευνα αρχικά επικεντρώθηκε στην εκτίμηση του κινδύνου αυτού μέσω των μετρήσεων. Επίσης, επιδιώχθηκε η αναγνώριση και αξιολόγηση των κρίσιμων για την οδική ασφάλεια περιστατικών επιτάχυνσης και πέδησης, χρησιμοποιώντας τις έννοιες του κύκλου τριβής και του τρόπου οδήγησης. Τελικά, συντέθηκε ένας αλγόριθμος βαθμολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης. Συνοπτικά, η επιθετικότητα του οδηγού μεταφράζεται σε ανάλογη πτώση της βαθμολογίας που υπολογίζει ο αλγόριθμος από τις σχετικές μετρήσεις.

Για τη διεξαγωγή της έρευνας αξιοποιήθηκε περιγραφική στατιστική, ανάλυση έκτροπων τιμών, φίλτρα και απεικονίσεις στο πεδίο του χρόνου αλλά και της συχνότητας. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί, η χάραξη των διαγραμμάτων καθώς και η υλοποίηση του αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Abstract

This Diploma Thesis deals with the analysis of measurements of dynamic physical quantities with the aim of evaluating driver behavior in the special case of tanker trucks. Thorough examination of measurements and videos of experimental trips performed by the Vehicles Laboratory of NTUA for the purpose of revealing the factors that influence the considered physical quantities and the corresponding measurements took place. Specifically, the causality between the measurements and the handling of the driver, as well as the conditions that the road imposes, were investigated. In addition, the variability of the measurements between two different vehicles, with the presence but also with the lack of fluid content in their tank, became apparent. This impression was obtained through a case study which was made possible by the strategic diversity of the experiments in terms of their characteristics.

At the same time, the possibilities of utilizing the measurements for the systematic evaluation of driving behavior without the need for researcher intervention were assessed. As tankers face an increased risk of rollover and simultaneously significantly more catastrophic consequences, the research initially focused on assessing this risk through the measurements. Furthermore, acceleration and braking incidents critical to road safety, were identified and evaluated using the concepts of friction circle and driving style. Finally, a driver behavior scoring algorithm was developed in order to automate the evaluation process. In short, the driver's aggression translates into a corresponding drop in the score calculated through the relevant measurements by the algorithm.

Descriptive statistics, outlier analysis, filters and representations in the domain of time and frequency were used to conduct the research. The necessary calculations, the drawing of the diagrams as well as the implementation of the algorithm, were performed in the MATLAB programming environment.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Abstract	iv
Περιεχόμενα	i
Κατάλογος Σχημάτων	iii
Κατάλογος Πινάκων	vii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Οδηγική Συμπεριφορά	1
1.2 Οδηγική Συμπεριφορά στην Περίπτωση των Βυτιοφόρων Οχημάτων.....	2
1.3 Περιγραφή των Διατιθέμενων Μετρήσεων.....	2
1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	11
Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Έκτροπων Τιμών	13
2.1 Κριτήρια Ανίχνευσης Έκτροπων Μετρήσεων και Περιγραφική Στατιστική.....	14
2.2 Επιρρέπεια των Μετρήσεων σε Σφάλματα και Μελέτη Περιπτώσεων	26
Κεφάλαιο 3 Θόρυβος, Παρεμβολές και Φιλτράρισμα Δεδομένων	31
3.1 Η Ανάγκη Χρήσης Φίλτρου	31
3.2 Προσδιορισμός Κατάλληλου Τύπου Φίλτρου και Διαδικασία Σχεδιασμού	33
3.3 Επιλογή Κατάλληλων Σχεδιαστικών Παραμέτρων για το Φίλτρο.....	40
3.4 Υλοποίηση του Φίλτρου	43
3.5 Φιλτράρισμα Μετρήσεων και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	44
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Μετρήσεων στο Πεδίο Συχνότητας.....	49
4.1 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier	49
4.2 Αλγόριθμος Ταχύ Μετασχηματισμού Fourier	50
4.3 Μετασχηματισμός Μετρήσεων & Έλεγχος Ορθότητας Επιλογής Φίλτρου.....	51
Κεφάλαιο 5 Συγκριτική Ανάλυση Μετρήσεων.....	63
5.1 Ανάλυση Μετρήσεων Εγκάρσιας Επιτάχυνσης.....	65
5.2 Ανάλυση Μετρήσεων Διαμήκουσ Επιτάχυνσης.....	73
5.3 Ανάλυση Μετρήσεων Ανύψωσης Αμαξώματος & Κατακόρυφης Επιτάχυνσης	78

5.4 Ανάλυση Μετρήσεων Παραμόρφωσης	81
Κεφάλαιο 6 Συστηματική Αξιολόγηση της Οδηγικής Συμπεριφοράς	83
6.1 Εκτίμηση Κινδύνου Ανατροπής και Χρησιμότητα	83
6.2 Υπολογισμός Διαμήκους Επιτάχυνσης Οχήματος και Χρησιμότητα	85
6.3 Κατασκευή Αλγορίθμου Αξιολόγησης της Οδηγικής Συμπεριφοράς.....	89
6.4 Υλοποίηση Αλγορίθμου και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	90
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα.....	95
Παράρτημα Α: Μεσοπερατό φίλτρο	97
Παράρτημα Β: Τεχνικά στοιχεία αισθητήρων	99
Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης.....	99
Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης σε έναν άξονα.....	99
Αισθητήρες μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης σε τρεις άξονες	100
Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής ταχύτητας.....	101
Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής ταχύτητας σε έναν άξονα	101
Αισθητήρας μέτρησης ύψους.....	102
HF-500C.....	103
Βιβλιογραφία	105

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Φωτογραφίες οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις δυναμικών μεγεθών για την εκτίμηση οδηγικής συμπεριφοράς (α) Τριαξονικό και (β) Τετραξονικό όχημα	4
Σχήμα 1-2. Θέσεις αισθητήρων στο τριαξονικό βυτιοφόρο όχημα.....	7
Σχήμα 1-3. Θέσεις αισθητήρων στο τετραξονικό βυτιοφόρο όχημα	10
Σχήμα 2-1: Διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας τυποποιημένης κανονικής κατανομής ($\mu = 0, \sigma = 1$)	16
Σχήμα 2-2: Μεγεθυμένο διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας τυποποιημένης κανονικής κατανομής.....	16
Σχήμα 2-3: Θηκόγραμμα τυχαίου δείγματος κανονικής κατανομής.....	18
Σχήμα 2-4: Ιστόγραμμα τυχαίου δείγματος κανονικής κατανομής και όρια κριτηρίων ανίχνευσης έκτροπων τιμών	20
Σχήμα 2-5: Ιστόγραμμα μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης στο πίσω τμήμα κελύφους βυτίου οχήματος	21
Σχήμα 2-6: Ιστόγραμμα μετρήσεων κάθετης επιτάχυνσης στο εμπρός άκρο βυτίου οχήματος..	21
Σχήμα 2-7: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας γενικευμένης κατανομής σφάλματος ($\mu=0, \sigma=1$)	23
Σχήμα 2-8: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας λοξής τυποποιημένης κανονικής κατανομής ($\mu=0, \sigma=1$)	24
Σχήμα 2-9: Η σχετική θέση της μέσης και της διαμέσου τιμής συναρτήσει του πρόσημου της λοξότητας	25
Σχήμα 2-10: Χρονοσειρά εσφαλμένης μέτρησης αισθητήρα ταχύτητας	27
Σχήμα 2-11: Χρονοσειρά εσφαλμένης μέτρησης επιμηκυνσιομέτρου	27
Σχήμα 2-12: Χρονοσειρά μέτρου επιτάχυνσης με απώλεια προσανατολισμού του τριαξονικού αισθητήρα	28
Σχήμα 2-13: Εσφαλμένη χρονοσειρά εγκάρσιας επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου	29
Σχήμα 3-1: Επίδραση τάξης φίλτρου Butterworth επί της αιχμηρότητας της καμπύλης μεγέθους απόκρισης στη μεταβατική ζώνη [35].....	36
Σχήμα 3-2: Καμπύλες μεγέθους απόκρισης των σχεδιασμένων φίλτρων για $f_{c,1} = 10\text{Hz}$ και $f_{c,2} = 6\text{Hz}$	43
Σχήμα 3-3: Διάγραμμα προηγούμενου σχήματος (Σχήμα 3-2) μεγεθυμένο στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων	44

Σχήμα 3-4: Αρχικές και φιλτραρισμένες μετρήσεις διαμήκους επιτάχυνσης με συχνότητα αποκοπής $f_c, 1 = 10\text{Hz}$	45
Σχήμα 3-5: Αρχικές και φιλτραρισμένες μετρήσεις διαμήκους επιτάχυνσης με συχνότητα αποκοπής $f_c, 2 = 6\text{Hz}$	45
Σχήμα 4-1: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους μέτρησης διαμήκους επιτάχυνσης στο οπίσθιο άκρο του βυτίου (#1)	52
Σχήμα 4-2: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους μέτρησης διαμήκους επιτάχυνσης στο οπίσθιο άκρο του βυτίου (#2)	52
Σχήμα 4-3: Χρονοσειρά μεταβολής μέτρησης διαμήκους επιτάχυνσης οπίσθιου άκρου βυτίου στο εύρος 6Hz-40Hz	54
Σχήμα 4-4: Χρονοσειρές εγκάρσιας επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου	56
Σχήμα 4-5: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου εγκάρσιας επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου ...	56
Σχήμα 4-6: Χρονοσειρές εγκάρσιας επιτάχυνσης οπίσθιου άκρου βυτίου	57
Σχήμα 4-7: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου εγκάρσιας επιτάχυνσης οπίσθιου άκρου βυτίου	57
Σχήμα 4-8: Χρονοσειρές κατακόρυφης επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου	58
Σχήμα 4-9: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου κατακόρυφης επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου	59
Σχήμα 4-10: Χρονοσειρές διαμήκους παραμόρφωσης αριστερής πλευράς της 1 ^{ης} στήριξης βυτίου	60
Σχήμα 4-11: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου διαμήκους παραμόρφωσης αριστερής πλευράς της 1 ^{ης} στήριξης βυτίου	60
Σχήμα 4-12: Χρονοσειρές ανύψωσης δεξιάς πλευράς αμαξώματος βυτιοφόρου	61
Σχήμα 4-13: Ανάλυση μετρήσεων Ανύψωσης Δεξιάς Πλευράς Αμαξώματος βυτιοφόρου	61
Σχήμα 5-1: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V1_D3_M1	67
Σχήμα 5-2: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V1_D4_M1	68
Σχήμα 5-3: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V2_D3_M1	68
Σχήμα 5-4: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V2_D4_M1	69
Σχήμα 5-5: Θηκογράμματα μετρήσεων S1 διαδρομών TESTA.....	70
Σχήμα 5-6: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V1_D3_M1	75
Σχήμα 5-7: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V1_D4_M1	75
Σχήμα 5-8: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V2_D3_M1	76
Σχήμα 5-9: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V2_D4_M1	76
Σχήμα 5-10: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V1_D2_M2.....	77
Σχήμα 5-11: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V2_D1_M2.....	77

Σχήμα 5-12: Παράδειγμα χρονοσειράς αισθητήρα S4	80
Σχήμα 6-1: Χρονοσειρές διαμήκους επιτάχυνσης του πρώτου παραδείγματος	88
Σχήμα 6-2: Διάγραμμα χρονοσειρών διαμήκους επιτάχυνσης του δεύτερου παραδείγματος ...	88
Σχήμα 6-3: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιταχύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V2_D3_M1	92
Σχήμα 6-4: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιβραδύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V2_D3_M1	92
Σχήμα 6-5: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιταχύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V1_D2_M2	93
Σχήμα 6-6: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιβραδύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V1_D2_M2	93
Σχήμα Π-1: (α) Αρχή λειτουργίας αισθητήρα μέτρησης γραμμικής ταχύτητας και (β) Αναπαράσταση φωτορεύματος	101
Σχήμα Π-2: Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα μέτρησης απόστασης / ύψους	102

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Σύνοψη χαρακτηριστικών διαφορών πειραματικών οχημάτων	3
Πίνακας 1-2: Σύνοψη χαρακτηριστικών διαφορών των δεξαμενών των πειραματικών οχημάτων	3
Πίνακας 2-1: Οριακές τιμές βαθμού z και αντίστοιχες τιμές αθροιστικής συνάρτησης κατανομής	15
Πίνακας 3-1: Σύγκριση χαρακτηριστικών μεγεθών των αρχικών και φιλτραρισμένων μετρήσεων	46
Πίνακας 5-1: Απαρίθμηση αισθητήρων με περιγραφή των μετρούμενων μεγεθών	65
Πίνακας 5-2: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης αισθητήρα S1 (g)	65
Πίνακας 5-3: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης αισθητήρα S3 (g)	72
Πίνακας 5-4: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης αισθητήρα S7 (g)	72
Πίνακας 5-5: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων διαμήκους επιτάχυνσης αισθητήρα S2 (g)	74
Πίνακας 5-6: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων ανύψωσης αμαξώματος αισθητήρα S4 (mm)	79
Πίνακας 5-7: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων κατακόρυφης επιτάχυνσης αισθητήρα S6 (g)	81
Πίνακας 5-8: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων διαμήκους παραμόρφωσης αισθητήρα S9 (μm/m)	82
Πίνακας 5-9: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας παραμόρφωσης αισθητήρα S10 (μm/m)	82
Πίνακας 6-1: Παράδειγμα στατιστικών μεγεθών φιλτραρισμένης διαμήκους ταχύτητας S5 (km/h)	87
Πίνακας 6-2: Πίνακας σχήματος βαθμολόγησης συμβάντων επιτάχυνσης	89
Πίνακας 6-3: Πίνακας σχήματος βαθμολόγησης συμβάντων επιβράδυνσης	90
Πίνακας 6-4: Βαθμολογίες επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων πειραματικών διαδρομών V1_D4_M1	90
Πίνακας 6-5: Βαθμολογίες επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων πειραματικών διαδρομών V2_D3_M1	90
Πίνακας 6-6: Βαθμολογίες επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων πειραματικών διαδρομών V1_D2_M2	91
Πίνακας Π-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα 8704B25T Kistler	100
Πίνακας Π-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα 8792A25 Kistler	100
Πίνακας Π-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα L-CE	102

Πίνακας Π-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα HF-500C103

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης αισθητήρων που διαθέτει το Εργαστήριο Οχημάτων του ΕΜΠ, προς την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς στην ιδιαίτερη περίπτωση των βυτιοφόρων οχημάτων. Για την επίτευξη του σκοπού, αναλύεται πληθώρα μετρήσεων διαφορετικών φυσικών μεγεθών οι οποίες λήφθηκαν μέσω πειραμάτων τα οποία πραγματοποίησε το Εργαστήριο στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος «Ερευνώ – Καινοτομώ – Δημιουργώ» Κ.Ε. Τ1ΕΔΚ-03459 με τίτλο «Ανάπτυξη και Χρήση Ευφυών Εφαρμογών και Καινοτόμων Συστημάτων για τη Βελτιστοποίηση της Ασφάλειας των Οδικών Μεταφορών στον Τομέα των Υγρών Καυσίμων».

1.1 Οδηγική Συμπεριφορά

Η οδηγική συμπεριφορά ή με άλλα λόγια η συμπεριφορά του οδηγού ενός οχήματος, περιλαμβάνει τις σκόπιμες και τις ακούσιες ενέργειες που αυτός εκτελεί καθώς χειρίζεται το όχημα. Επί της ουσίας, η έννοια αυτή σχετίζεται με τον κίνδυνο για την οδική ασφάλεια τον οποίον επιφέρει ο οδηγός. Τουτέστιν, η ανάλυση της οδηγικής συμπεριφοράς επιδιώκει να εκτιμήσει τις πιθανότητες του εκάστοτε ανθρώπινου οδηγού να συμμετέχει ή ακόμα και να προκαλέσει ένα οδικό ατύχημα. Πράγματι, ο παράγοντας αυτός έχει θεωρηθεί ως ο πιο κρίσιμος και ταυτόχρονα απρόβλεπτος στη μελέτη θεμάτων σχετικών με την οδική ασφάλεια [1].

Κυρίαρχο στοιχείο της οδηγικής συμπεριφοράς αποτελεί η επιθετικότητα (*aggressiveness*), καθώς διαπιστώθηκε ότι ένα μεγάλο ποσοστό ατυχημάτων οφείλεται ακριβώς στην επιθετική οδήγηση. Τυπικές ενέργειες οι οποίες συγκροτούν μια επιθετική συμπεριφορά είναι η μη τήρηση αποστάσεων ασφαλείας με το προπορευόμενο όχημα, η υπερβολική ταχύτητα, οι ακατάλληλες αλλαγές λωρίδας κ.α. Οι παράγοντες που προκαλούν την επιθετική συμπεριφορά χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, δηλαδή τους ψυχολογικούς, τους κοινωνικούς, τους χρονικούς και αυτούς του περιβάλλοντος [2]. Παράλληλα, οφείλει να αναφερθεί ότι σημαντικοί παράγοντες για την οδική ασφάλεια από την πλευρά του οδηγού αποτελούν η κόπωση, η υπνηλία, η μειωμένη προσήλωση στη διαδικασία της οδήγησης και γενικότερα η επίγνωση των συνθηκών που διαμορφώνει ο δρόμος και το περιβάλλον [3], [4].

Η ανάλυση της οδηγικής συμπεριφοράς βρίσκει άμεση εφαρμογή σε συστήματα προηγμένης υποβοήθησης της οδήγησης (ADAS), σε μοντέλα ασφάλισης οχημάτων με βάση τη χρήση τους (UBI) και στην αγωνιστική οδήγηση. Αμελώντας την τελευταία, το γενικό και πιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα αυτών των εφαρμογών, είναι η βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Ανεξάρτητα του σκοπού, τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί πληθώρα ερευνών με σκοπό την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Από τη σχετική βιβλιογραφία προκύπτει επίσης ότι έχουν χρησιμοποιηθεί άφθονοι διαφορετικοί τρόποι ανάλυσης. Συγχρόνως, δεν έχουν ορισθεί

κατευθυντήριες γραμμές για τη λήψη μετρήσεων και τη διεξαγωγή της αξιολόγησης. Παρόλα αυτά, τα κυρίως χρησιμοποιούμενα μεγέθη φαίνεται να είναι η επιτάχυνση και η ταχύτητα του οχήματος.

1.2 Οδηγική Συμπεριφορά στην Περίπτωση των Βυτιοφόρων Οχημάτων

Γενικά, ο τρόπος αξιολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς διαφέρει μεταξύ τύπων οχημάτων. Ωστόσο, στην περίπτωση των βυτιοφόρων οχημάτων ενέχεται μια στοιχειώδης διαφορά όταν το μεταφερόμενο ρευστό αποτελεί υγρό. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο του παφλασμού (*slosh*), δηλαδή την κίνηση του υγρού εντός της και την φυσικά επακόλουθη επίδραση στη δυναμική του οχήματος. Η αξιοσημείωτη επίπτωση βρίσκεται στον αυξημένο κίνδυνο ανατροπής (*rollover*) τον οποίον επιφέρει το φαινόμενο, ιδιαίτερα στην περίπτωση διέγερσης του υγρού με συχνότητα που προσεγγίζει την ιδιοσυχνότητα του φαινομένου. Μολαταύτα, οι συνέπειες των ατυχημάτων αυτού του τύπου οχημάτων συχνά τείνουν να είναι ιδιαίτερα καταστρεπτικές και ειδικά στις περιπτώσεις όπου το μεταφερόμενο ρευστό είναι επικίνδυνο. Για το λόγο αυτό, η βιβλιογραφία είναι εκτενής σε ότι αφορά το φαινόμενο του παφλασμού και τη δυναμική ευστάθεια αυτών των οχημάτων.

Η μελέτη της οδηγικής συμπεριφοράς αυτών των οχημάτων δύναται να αξιοποιηθεί από μια επιχείρηση ή οργάνωση για την παρακολούθηση του στόλου της. Ο έμφυτος αυξημένος κίνδυνος που ενέχουν αυτά τα οχήματα από μόνος του δικαιολογεί την επιδίωξη της αξιολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς με σκοπό τη διασφάλιση ότι οι εκπαιδευμένοι οδηγοί πράγματι δεν δημιουργούν επικίνδυνες για την οδική ασφάλεια καταστάσεις. Παράλληλα, η επιθετική συμπεριφορά συνεπάγεται αυξημένη φθορά εξαρτημάτων του οχήματος αλλά και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Ιδιαίτερα λοιπόν όταν ο ρόλος του οχήματος είναι κερδοσκοπικός, όπως συχνά είναι, τότε η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδηγών προκειμένου με περαιτέρω ενέργειες να μειωθεί η πιθανότητα ατυχήματος είναι ακόμα πιο επιζήτητη.

1.3 Περιγραφή των Διατιθέμενων Μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή της έρευνας, το Εργαστήριο Οχημάτων του ΕΜΠ έστησε μετρητικές διατάξεις με πολυάριθμους αισθητήρες σε δυο βυτιοφόρα οχήματα. Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραμάτων στο οδικό δίκτυο του Δήμου Περάματος αλλά και ένα πλήθος ειδικών πειραμάτων σε ιδιωτικό δρόμο, με σκοπό την απόκτηση μετρήσεων για ανάλυση. Για το εγχείρημα αυτό, διατέθηκαν συνολικά τέσσερεις διαφορετικοί οδηγοί για τους οποίους διατίθενται πληροφορίες από την εκπαίδευσή τους ως επαγγελματίες οδηγοί βυτιοφόρων οχημάτων. Όλα τα πειράματα έγιναν υπό πανομοιότυπες καιρικές συνθήκες σε συνεργασία με τους λοιπούς φορείς του Ερευνητικού Προγράμματος.

Αναφορικά στα δύο οχήματα, αυτά διαφέρουν σημαντικά ως προς το έτος κατασκευής αλλά και τις αποστάσεις τις οποίες έχουν διανύσει. Οι αξιοσημείωτες διαφορές τους αναγράφονται συνολικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-1), ενώ οι διαφορές των δεξαμενών τους συνοψίζονται στον αμέσως ακόλουθο (Πίνακας 1-2). Σημειώνεται πως παρέχεται και ο αριθμός πλαισίου του κάθε οχήματος από τον οποίον εδώ αντλήθηκε μονάχα το έτος κατασκευής των οχημάτων. Εκτός αυτών, αναφέρεται πως διατίθενται οι χωρητικότητες των διαμερισμάτων των δεξαμενών οι οποίες ωστόσο παραλείπονται από το σχετικό πίνακα.

Όχημα	Volvo FH-12 (V1)	MAN TGS (V2)
Έτος Κατασκευής	2002	2019
Ένδειξη Χιλιομετροδείκτη (km)	761,119	33,012
Πλήθος Αξόνων	3	4
Ωφέλιμο Φορτίο (kg)	26,000	32,000
Απόβαρο (kg)	11,290	12,200

Πίνακας 1-1: Σύνοψη χαρακτηριστικών διαφορών πειραματικών οχημάτων

Όχημα	Volvo FH-12 (V1)	MAN TGS (V2)
Έτος Κατασκευής	2003	2019
Υλικό	St.37	Al
Αριθμός Σελών Στήριξης	6	5
Κωδικός Δεξαμενής	LGBF	LGBF
Χωρητικότητα Δεξαμενής (kg)	21,526	28,187
Πλήθος Διαμερισμάτων	6	7

Πίνακας 1-2: Σύνοψη χαρακτηριστικών διαφορών των δεξαμενών των πειραματικών οχημάτων

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται φωτογραφίες των οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν:

(α)



(β)



Σχήμα 1-1: Φωτογραφίες οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις δυναμικών μεγεθών για την εκτίμηση οδηγικής συμπεριφοράς (α) Τριαξονικό και (β) Τετραξονικό όχημα

Σε αμφότερα τα οχήματα τοποθετήθηκαν συγκεκριμένοι αισθητήρες με τρόπο ώστε να είναι συμβατά τα μετρούμενα μεγέθη μεταξύ αντίστοιχων αισθητήρων από κάθε όχημα. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες με τους αναφερόμενους σε παρένθεση, όπου απαιτείται, προσανατολισμούς:

- Επιταχυνσιόμετρο στο εμπρόσθιο τμήμα του κελύφους του βυτίου (εγκάρσιος) / A1
- Επιταχυνσιόμετρο στο οπίσθιο τμήμα του κελύφους του βυτίου (εγκάρσιος) / A2
- Επιταχυνσιόμετρο στο οπίσθιο άκρο του βυτίου (διαμήκης) / A3

- Τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στο εμπρόσθιο άκρο του βυτίου / A4
- Αισθητήρας ανύψωσης αμαξώματος / A5
- Αισθητήρας ταχύτητας (διαμήκης) / A6

Εκτός αυτών, τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα στην πρώτη σέλα στήριξης του βυτίου του οχήματος V2, δηλαδή αυτή που βρίσκεται αμέσως πίσω από την καμπίνα. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε ένα ζεύγος στην αριστερή και ένα στη δεξιά πλευρά, έτσι ώστε να λαμβάνεται η μέτρηση της διαμήκου και της εγκάρσιας επιτάχυνσης. Αναφέρεται ότι τα επιμηκυνσιόμετρα επιλέχθηκαν προκειμένου να προσομοιάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του αλουμινίου. Όλοι οι αισθητήρες συνδέθηκαν κατάλληλα με σύστημα απόκτησης και καταγραφής δεδομένων. Η συχνότητα δειγματοληψίας των μετρήσεων τέθηκε ίση με 200Hz.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αισθητήρες στις θέσεις που τοποθετήθηκαν στο τριαξονικό όχημα.

Αισθητήρας

Θέση

A1



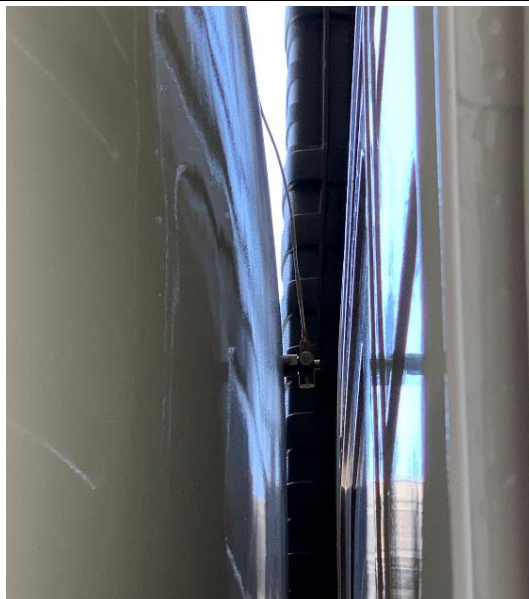
A2



A3



A4



A5



A6



Σχήμα 1-2. Θέσεις αισθητήρων στο τριαξονικό βυτιοφόρο όχημα

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αισθητήρες στις θέσεις που τοποθετήθηκαν στο τετραξονικό βυτιοφόρο όχημα.

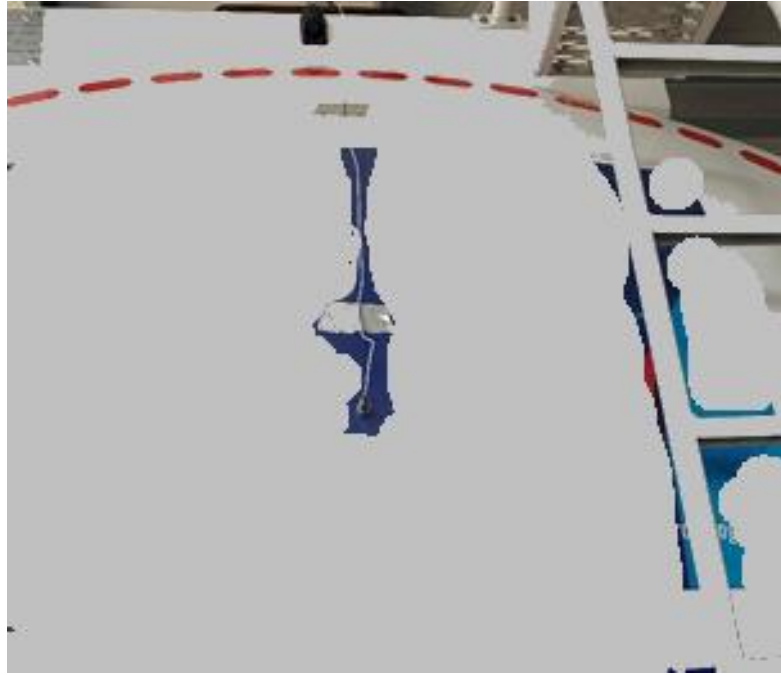
A1



A2



A3



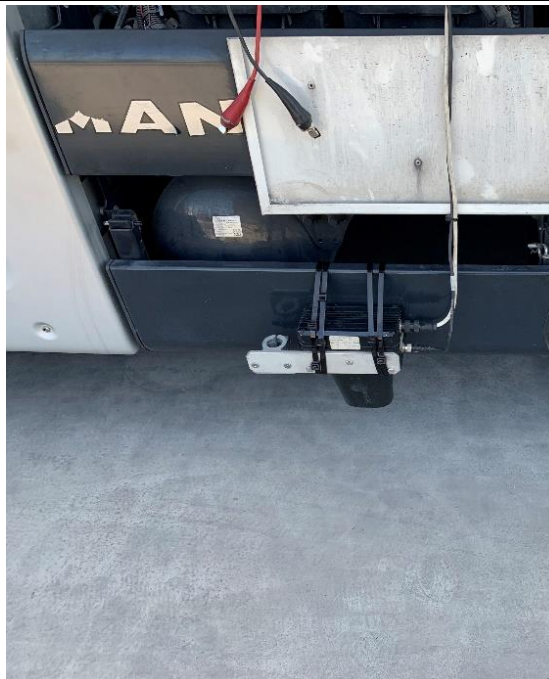
A4



A5



A6



Σχήμα 1-3. Θέσεις αισθητήρων στο τετραξονικό βυτιοφόρο όχημα

Σχετικά με τις πειράματα επί οδικού δικτύου, εκτελέσθηκαν τέσσερις σειρές από πειράματα οι οποίες συντελούνται από έξι διαφορετικές διαδρομές. Επί της ουσίας, οι πρώτες δυο σειρές πραγματοποιήθηκαν από κάθε όχημα με το δικό του αποκλειστικό οδηγό και με άδεια δεξαμενή.

Στη συνέχεια, πληρώθηκε η δεξαμενή τους κατά 20% με νερό και επαναλήφθηκαν τα πειράματα ξανά με αποκλειστικούς οδηγούς αλλά διαφορετικούς από νωρίτερα. Τα ειδικά πειράματα που έγιναν σε ιδιωτικό δρόμο αφορούν την ίδια διαδρομή η οποία επαναλήφθηκε από δυο οδηγούς για κάθε όχημα με πληρωμένη δεξαμενή και έναν για κάθε όχημα με άδεια αντίστοιχα. Οφείλει να αναφερθεί ότι το διατιθέμενο δείγμα μετρήσεων είναι μικρό προκειμένου να εφαρμοστούν μέθοδοι μηχανικής μάθησης.

Η επιλογή πλήρωσης του βυτίου με γλυκό νερό γίνεται αφενός για λόγους ασφαλείας, διότι η μεταφορά καυσίμου για την οποία προορίζονται, είναι επισφαλής για την εκτέλεση πειραμάτων. Αφετέρου, το νερό είναι πρακτικά άφθονο για τις ανάγκες της δοκιμής, ταυτόχρονα μπορεί να προμηθευτεί εύκολα με αμελητέο κόστος και παράλληλα το ξεφόρτωμα του είναι ευχερές. Η επιλογή αυτή επίσης, καθιστά την έρευνα συντηρητική αφού το νερό έχει μικρότερο ιξώδες συγκριτικά με τα συνήθως μεταφερόμενα καύσιμα για τα οποία πιστοποιείται η δεξαμενή, με εξαίρεση όμως τη βενζίνη [5], [6]. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση της βενζίνης η διαφορά του ιξώδους είναι αρκετά μικρή ώστε η επίπτωση της στην εγκυρότητα της ανάλυσης να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Επιπρόσθετα, η επιλογή μερικής πλήρωσης αιτιολογείται από το γεγονός ότι το φαινόμενο του παφλασμού ενισχύεται σε αυτήν την περίπτωση, συγκριτικά με αυτήν της πλήρους δεξαμενής [7].

1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία ξεκινά με την Εισαγωγή, μέρος της οποίας αποτελεί η παρούσα παράγραφος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, επιζητείται η ανάλυση έκτροπων τιμών προκειμένου να ερευνηθεί εάν οι μετρήσεις εμπεριέχουν μεμονωμένα σφάλματα. Εκ των προτέρων, παρατίθενται απλά αλλά αποτελεσματικά στατιστικά κριτήρια για την ανίχνευση και κατηγοριοποίηση των έκτροπων τιμών του εκάστοτε συνόλου μετρήσεων. Προκειμένου να προβλεφθεί η λειτουργία των παρουσιασμένων κριτηρίων ανίχνευσης έκτροπων τιμών στην περίπτωση των διατιθέμενων μετρήσεων, μελετάται εκτενώς η φύση των κατανομών του κάθε μετρούμενου μεγέθους. Παράλληλα, εξετάζονται τα σύνολα τιμών όπου παρουσιάζονται σημαντικά σφάλματα, προκειμένου να προσδιορισθεί και να τεθεί υπόψιν ο παράγοντας στον οποίο οφείλεται το καθένα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, για την αφαίρεση του θορύβου και των παρεμβολών από το μετρούμενο σήμα, αναζητείται ο κατάλληλος τύπος φίλτρου και αναπτύσσεται η θεωρία σχεδιασμού του. Επιλέγεται, τελικά, η χρήση χαμηλοπερατού φίλτρου τύπου Butterworth για το οποίο προσδιορίζονται οι βέλτιστες σχεδιαστικές παράμετροι. Αυτές καθορίζονται ώστε αφενός να οδηγούν στην κατά δύναμιν εξασθένιση των ανεπιθύμητων συνιστωσών του σήματος και στην ευσταθή λειτουργία του φίλτρου. Αφετέρου, επιζητούνται αυτές οι οποίες προκαλούν τη

διατήρηση των πληροφοριών που σχετίζονται με την οδηγική συμπεριφορά, δίνοντας ταυτόχρονα έμφαση στην κάλυψη του φαινομένου του παφλασμού όποτε το επιτρέπει η τοποθέτηση και η φύση του αισθητήρα. Το καθορισμένο φίλτρο υλοποιείται ψηφιακά και αξιοποιείται ώστε οι μετρήσεις να έρθουν σε μορφή κατάλληλη για την εκμετάλλευση τους στην αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο οι φιλτραρισμένες μετρήσεις και οι αρχικές αντίστοιχες εξετάζονται συνδυαστικά στο πεδίο της συχνότητας μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (*DFT*). Ο τελευταίος εκτελείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, χρησιμοποιώντας τον παρεχόμενο αλγόριθμο Ταχύ Μετασχηματισμού Fourier (*FFT*). Έτσι, επιδιώκεται να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία καθώς και επιλογή του φίλτρου, ενώ παράλληλα, να φανερωθεί η κατανομή του σήματος στο πεδίο της συχνότητας.

Εν συνεχεία, στο πέμπτο κεφάλαιο διερευνάται εάν υφίστανται στατιστικά μεγέθη τα οποία υπολογιζόμενα για σύνολα μετρήσεων συγκεκριμένων μετρούμενων μεγεθών, δύνανται να διακρίνουν τον περισσότερο επιθετικό οδηγό. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αξιοποιούνται τα πειράματα που έγιναν εντός ιδιωτικού χώρου (TESTA), καταρχήν επειδή παρέχουν τη μεγαλύτερη διαθέσιμη ποικιλία συνδυασμών οδηγών, οχημάτων και φόρτισης ταυτόχρονα. Επιπρόσθετα, η ομοιότητα των τροχιών των οχημάτων εξασφαλίζεται μέσω του περιορισμένου πλάτους του οδοστρώματος. Επιπλέον, η συμπεριφορά των οδηγών μένει ανεπηρέαστη από κυκλοφοριακές συνθήκες, σε αντίθεση με τα πειράματα επί οδικού δικτύου. Συγχρόνως, αντιπαραθέτοντας αυτά τα σύνολα μετρήσεων επιδιώκεται να αποτυπωθούν οι διαφοροποιήσεις των μετρήσεων μεταξύ οχημάτων και οδηγών, αλλά και αυτών που εισάγει η ύπαρξη μεταφερόμενου υγρού στη δεξαμενή του οχήματος.

Τελικά, στο έκτο κεφάλαιο επιχειρείται η συστηματική αξιολόγηση των διαθέσιμων συνόλων μετρήσεων ως προς την οδηγική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό, πρωτίστως εξετάζεται ο κίνδυνος ανατροπής του εκάστοτε βυτιοφόρου οχήματος αναζητώντας μια εκτίμηση της ελάχιστης τιμής εγκάρσιας επιτάχυνσης η οποία δύναται, υπό συνθήκες, να την προκαλέσει. Έπειτα, προτείνεται ένα σχήμα ανίχνευσης και βαθμολόγησης των κρίσιμων περιστατικών επιβράδυνσης και επιτάχυνσης του οχήματος. Επίσης, παρουσιάζονται συντόμως οι έννοιες του κύκλου τριβής και του διαγράμματος του στυλ οδήγησης. Οι τελευταίες αξιοποιούνται συνδυαστικά με τις έρευνες της σχετικής βιβλιογραφίας για τον υποκειμενικό καθορισμό του τρόπου βαθμολόγησης κάθε συμβάντος. Τα αποτελέσματα αξιοποιούνται με σκοπό την κατασκευή ενός αλγόριθμου ο οποίος θα καταστήσει δυνατή την συστηματική αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς.

Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Έκτροπων Τιμών

Ένα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει σε θέματα επεξεργασίας χρονοσειρών μετρήσεων είναι η ανίχνευση εσφαλμένων μετρήσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων. Το σφάλμα μπορεί να οφείλεται στο μετρητικό όργανο, στο σύστημα λήψης των μετρήσεων ή να οφείλεται σε λάθος αποθήκευσης ή και ανάκλησης. Οι τιμές των μετρήσεων αυτών συγκαταλέγονται στο γενικότερο όρο των έκτροπων τιμών (*outliers*), ενώ εκτός του τελευταίου όρου χρησιμοποιείται και ο όρος ανωμαλία μεταξύ άλλων και συχνά εναλλάσσεται με αυτόν της έκτροπης τιμής [8]. Οι τιμές ενός μετρητικού δείγματος οι οποίες κατηγοριοποιούνται ως έκτροπες είναι αυτές που διαφέρουν ιδιαιτέρως από τις υπόλοιπες του δείγματος [9]. Συνεπώς, όταν αναφερόμαστε σε μια έκτροπη τιμή, δεν πρόκειται για μια απαραίτητα εσφαλμένη τιμή αλλά για μια η οποία εξέχει από το υπόλοιπο δείγμα. Δίνεται λοιπόν ο παραπάνω ορισμός διότι υπάρχει πληθώρα μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση έκτροπων τιμών σε ένα δείγμα. Ταυτόχρονα βέβαια, το ίδιο δεν υφίσταται για τις εσφαλμένες μετρήσεις οι οποίες μελετώνται συμπεριλαμβανόμενες εντός των προηγούμενων. Άρα, για να ανιχνευθούν οι εσφαλμένες μετρήσεις πρέπει να βρεθούν οι έκτροπες τιμές και να εφαρμοστεί κάποιο κριτήριο ώστε να ελεγχθεί εάν πράγματι είναι εσφαλμένες. Στη διαδικασία αυτή είναι αναπόσπαστη η υποκειμενική αντίληψη του ερευνητή ο οποίος ανάλογα με την επιστημονική περιοχή και το αντικείμενο μελέτης πρέπει να επιλέξει το κριτήριο διαχωρισμού των εσφαλμένων τιμών αλλά και τη μέθοδο ανίχνευσης των έκτροπων τιμών.

Ανεξαρτήτως του πεδίου μελέτης, οι δράσεις που μπορούν να ληφθούν για κάθε ανιχνευμένη έκτροπη τιμή είναι [10]:

1. **Διατήρηση** και αντιμετώπιση ίδια με αυτή των υπολοίπων τιμών.
2. **Winsorization**, δηλαδή τροποποίηση της τιμής π.χ. ώστε να μην ξεπερνάει κάποιο εκατοστημόριο του δείγματος ή ανάθεση μικρότερου βάρους στην τιμή.
3. **Αφαίρεση** εξ ολοκλήρου από το δείγμα.

Οι δύο τελευταίες επιλογές είναι εξαιρετικά ριψοκίνδυνες διότι αν εφαρμοστούν σε δειγματικά σημεία τα οποία είναι πράγματι αποτέλεσμα έγκυρης μέτρησης θα καταστρέψουν ή αλλοιώσουν τις χρήσιμες πληροφορίες που εμπεριέχουν. Μπορεί να γίνει περαιτέρω εμβάθυνση στις αιτίες που καθιστούν μια τιμή έκτροπη και πιθανά εσφαλμένη, ωστόσο έχει μεγαλύτερη αξία να γίνει αυτό υπό τη σκοπιά των μεθόδων ανίχνευσης που θα μελετηθούν ώστε να ερευνηθεί το ζήτημα με καλύτερη εποπτεία.

Επομένως, στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες από αυτές τις μεθόδους οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή στο παρόν πεδίο μελέτης. Παράλληλα, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια αποκάλυψης της φύσης των κατανομών των μετρούμενων μεγεθών επιστρατεύοντας περιγραφική στατιστική,

προκειμένου να κατανοηθεί η λειτουργικότητα της εφαρμογής των αναφερόμενων μεθόδων. Μολαταύτα, οφείλει να σημειωθεί ότι οι χρονοσειρές των μελετώμενων συνόλων μετρήσεων συνιστούν μεγάλο μεγέθους δείγματα και να ληφθεί υπόψιν ό,τι αυτό συνεπάγεται.

2.1 Κριτήρια Ανίχνευσης Έκτροπων Μετρήσεων και Περιγραφική Στατιστική

Αρχικά, αναφέρεται πως η πρώτη σκέψη ήταν η εφαρμογή του στατιστικού κριτηρίου του Chauvenet το οποίο συχνά χρησιμοποιείται για διδακτικούς σκοπούς αναφορικά με την έννοια των έκτροπων τιμών, σε εφαρμογές φυσικών επιστημών και μηχανολογικού ενδιαφέροντος. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή (*Gaussian*). Η υπόθεση αυτή θα διερευνηθεί για τα δείγματα στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Η διαδικασία ελέγχου απαιτεί τον υπολογισμό της μέσης τιμής μ (*mean*) και της τυπικής απόκλισης σ (*standard deviation*) του δείγματος και στη συνέχεια σύγκριση της απόλυτης τυπικής τιμής της κάθε μέτρησης x_i με μια σταθερά η οποία λαμβάνεται από πίνακα συναρτήσεως του μεγέθους το δείγματος. Η τυπική τιμή (*z-score*) ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (2.1)$$

Όταν η απόλυτη τιμή του *z-score* ενός δειγματικού σημείου βρίσκεται να υπερβαίνει τη σταθερά που αντιστοιχεί στο μέγεθος δείγματος, τότε αυτή αφαιρείται και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία έως ότου να μην υπάρχουν πλέον έκτροπες τιμές στο δείγμα. Η αδυναμία του κριτηρίου έγκειται στη δυνατότητα αφαίρεσης μόνο μιας τιμής ανά φορά και στη χρήση πινακοποιημένων συντελεστών συναρτήσεως του μεγέθους του δείγματος οι οποίες περιορίζονται έως σύνολα μεγέθους $N = 1000$ τιμών. Μετά από έρευνα καταλήγει κανείς στο ότι η μέθοδος αυτή δεν είναι αποτελεσματική παρόλο που πολλές φορές αμφιλεγόμενα χρησιμοποιείται ή συζητείται από ερευνητές για την αφαίρεση έκτροπων τιμών από σύνολα παρατηρήσεων. Αυτό αναφέρεται και στο [11], όπου όμως ερευνάται και εφαρμόζεται η μέθοδος σε δείγματα μεγαλύτερου μεγέθους χωρίς να γίνεται αναφορά στο πώς λαμβάνονται οι συντελεστές. Ωστόσο, η χρήση εύρωστης ή ανθεκτικής στατιστικής μπορεί θεωρητικά να βελτιώσει οποιαδήποτε μέθοδο ανίχνευσης ή/και απόρριψης έκτροπων τιμών. Το τελευταίο καθίσταται φανερό και από την επιτυχή ανθεκτική αναπροσαρμογή της μεθόδου για αστρονομικές παρατηρήσεις στο [12].

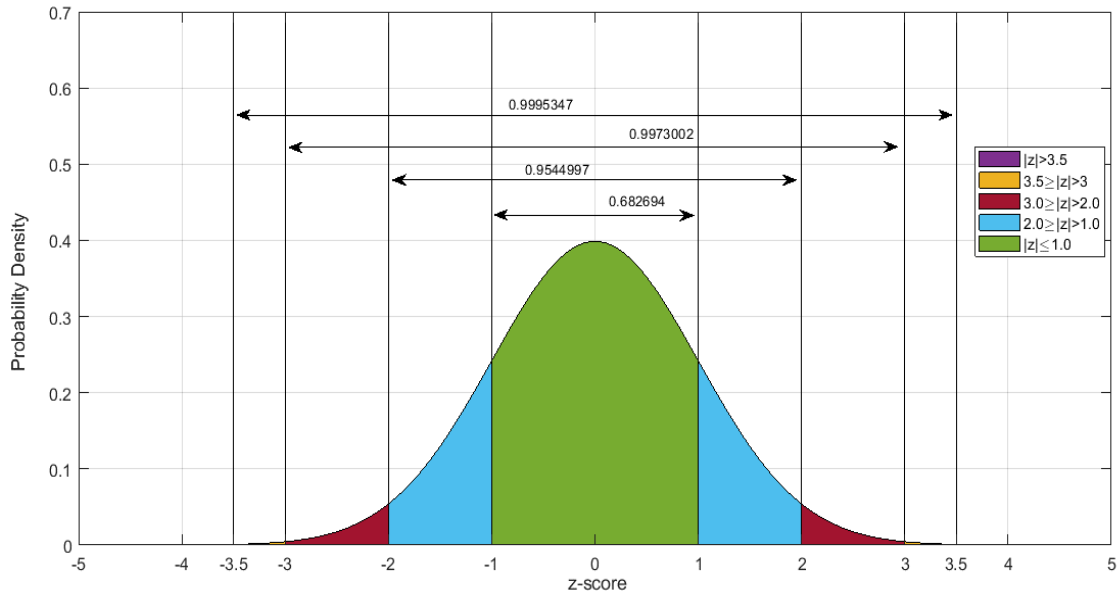
Άλλο ένα παρόμοιο κριτήριο το οποίο υποθέτει κανονική κατανομή του δείγματος είναι αυτό του Peirce. Το κριτήριο αυτό δίνει τη δυνατότητα της αφαίρεσης πλήθους έως και $M = 9$ τιμών ανά φορά ή «τρέξιμο» της μεθόδου, ωστόσο απαιτείται και πάλι η σύγκριση της απόλυτης τιμής του *z-score* με σταθερά R η οποία λαμβάνεται από πίνακα και δίνεται για δείγμα μεγέθους μέχρι $N = 60$ τιμές. Εντούτοις, σύμφωνα με προηγούμενη έρευνα σε δείγμα αντίστοιχα μικρού μεγέθους, το κριτήριο εμφανίζεται σχολαστικότερο και πιο γενικό σε σχέση με το κριτήριο Chauvenet [13]. Τα μειονεκτήματα του κριτηρίου είναι σημαντικά, λόγω όμως της απλότητας της

μεθόδου διερευνήθηκε η δυνατότητα παρεκβολής των τιμών του πίνακα σε μεγαλύτερα μεγέθη δείγματος. Επιχειρήθηκε η εφαρμογή της σχέσης που προτείνεται από το [14] χωρίς επιτυχία, πιθανά λόγω των δυσανάλογα πολυπληθέστερων δειγμάτων που αναλύονται στη συγκεκριμένη περίπτωση.

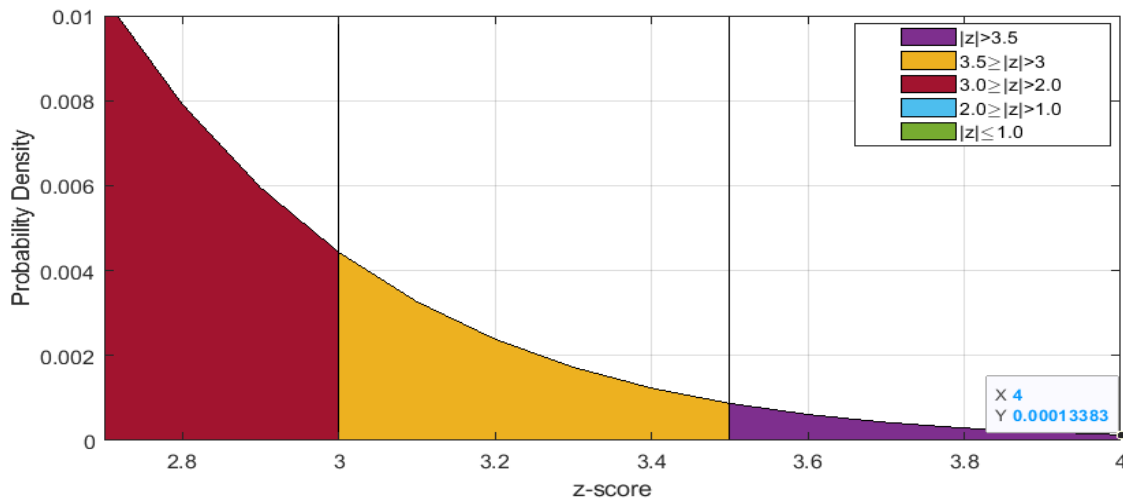
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια ευρέως διαδεδομένη απλή στατιστική μέθοδος της οποίας όμως η επιτυχία, ομοίως με τις προηγούμενες, προϋποθέτει ότι το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή. Αυτή ονομάζεται μέθοδος τυπικής τιμής ή τυπικής βαθμολογίας, στα αγγλικά *z-score* ή *standard score*, και βασίζεται στην κατηγοριοποίηση τιμών ως έκτροπων με βάση τη σύγκριση της τυπικής τιμής που λαμβάνουν με κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης [15]. Επομένως, πρόκειται για μία μεθοδολογία βασισμένη στην ανάλυση οριακών τιμών [9], όπως και οι προηγούμενες. Σε αντιδιαστολή όμως με τις τελευταίες, η τιμή που εδώ χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση δεν προκύπτει από πίνακες βασισμένους σε παρατηρήσεις και συναρτήσεϊ του μεγέθους του δείγματος, ενώ επίσης δεν περιορίζεται το πλήθος των έκτροπων τιμών που μπορούν να ανιχνευθούν ανά εφαρμογή της μεθόδου. Συχνά χρησιμοποιούμενες οριακές τιμές για το κριτήριο είναι ± 3 , ± 3.5 για τις οποίες εάν η μέτρηση πράγματι ακολουθεί κανονική κατανομή, το επίπεδο εμπιστοσύνης δίνεται μεταξύ άλλων στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-1) υπολογιζόμενο από την κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής. Η οριοθέτηση παρουσιάζεται σε διάγραμμα τυποποιημένης κανονικής κατανομής στο Σχήμα 2-1, ενώ η δεξιά ουρά της κατανομής παρουσιάζεται στο μεγεθυμένο διάγραμμα του Σχήμα 2-2 για υψηλότερη ευκρίνεια. Ο κατακόρυφος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, ενώ ο οριζόντιος στην τυπική τιμή ή *z-score*. Πρακτικά, ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση της κάθε μέτρησης από τη μέση τιμή σε μονάδες τυπικής απόκλισης. Η τυποποιημένη κανονική κατανομή αποτελεί ειδική περίπτωση της κανονικής κατανομής για $\mu = 0, \sigma = 1$, συνεπώς για αυτήν την περίπτωση η τυπική τιμή είναι η ίδια η τιμή του εξεταζόμενου δειγματικού σημείου.

Οριακή τυπική τιμή z_b	Θεωρητικό επίπεδο εμπιστοσύνης $\Phi(z \leq z_b)$
± 1.0	0.6826894
± 2.0	0.9544997
± 3.0	0.9973002
± 3.5	0.9995347

Πίνακας 2-1: Οριακές τιμές βαθμού *z* και αντίστοιχες τιμές αθροιστικής συνάρτησης κατανομής



Σχήμα 2-1: Διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας τυποποιημένης κανονικής κατανομής ($\mu = 0, \sigma = 1$)



Σχήμα 2-2: Μεγεθυμένο διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας τυποποιημένης κανονικής κατανομής

Εντούτοις, δεν υπάρχει αιτία να θεωρηθεί πως οι εν λόγω μετρήσεις ακολουθούν κανονική κατανομή λαμβάνοντας υπόψη τα μετρούμενα μεγέθη και τα χαρακτηριστικά των πειραματικών διαδρομών. Εάν, οι μετρήσεις λαμβάνονταν για σταθερή οδηγική συμπεριφορά σε δρόμο χωρίς σημαντικές ανωμαλίες τότε πράγματι θα αναμενόταν οι κατανομές των μετρήσεων να έχουν σημαντική ομοιότητα με την κανονική κατανομή. Ακριβέστερα, οι μετρήσεις αυτής της φύσης δεν αναμένεται να περιγράφονται από κάποια από τις γνωστές κατανομές πιθανότητας. Εκτός αυτού, αναφέρεται ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην εύρεση έκτροπων τιμών είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη ως προς τις ίδιες αφού συμμετέχουν στον υπολογισμό της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και άρα και της βαθμολογίας z [16]. Συνεπώς, θα ήταν αδικαιολόγητο το να

τροποποιηθούν ή και να αφαιρεθούν οι μετρήσεις χρησιμοποιώντας ευθέως το κριτήριο για οποιαδήποτε οριακή τυπική τιμή με βάση το υπολογιζόμενο επίπεδο εμπιστοσύνης. Μολαταύτα, ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση η μεθοδολογία προσφέρει ένα μέγεθος που περιγράφει με ευνόητο τρόπο την απόκλιση από τη μέση τιμή, ενώ ταυτόχρονα ο σκοπός της δεν είναι αναγκαστικά η αφαίρεση των έκτροπων τιμών από το δειγματικό σύνολο. Με άλλα λόγια, αποδίδει μια καλή εικόνα για το πόσο έκτροπη είναι μια τιμή ακόμα και αν μην είναι αυτή στατιστικά ερμηνεύσιμη [9]. Ταυτόχρονα, αποτελεί μια απλή μέθοδο η οποία μπορεί με διάθεση μικρής υπολογιστικής ισχύος να ανιχνεύσει ταχέως έκτροπες τιμές για περαιτέρω ανάλυση. Δεδομένου ότι υπό τη σκοπιά αυτής της μεθόδου, έκτροπες τιμές θεωρούνται οι ακραίες ως προς τη μέση τιμές των χρονοσειρών των μετρήσεων, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την ανίχνευση μεταβατικών καταστάσεων ή και χειρισμών του οδηγού. Πράγματι, η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με σημαντική επιτυχία σε συνεχή ροή δεδομένων από μετρητικό σύστημα εν κινήσει οχήματος, λαμβάνοντας ένα ολισθαίνον παράθυρο στις μετρήσεις σε συνδυασμό με κανόνες επεξεργασίας συμβάντων, με στόχο την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς ως προσεκτική ή ως ριψοκίνδυνη [17].

Παρόμοιο απλό στατιστικό κριτήριο είναι το λεγόμενο κριτήριο του διατεταρτημοριακού διαστήματος (*interquartile range*) ή μέθοδος θηκογράμματος (*box plot*). Η λογική εδώ είναι ίδια με την προηγούμενη μέθοδο μόνο που εδώ δε χρειάζεται η θεώρηση πως η κατανομή του δείγματος ομοιάζει της κανονικής. Αρχικά, υπολογίζονται το 25^ο εκατοστημόριο Q_1 και το 75^ο αντίστοιχο Q_3 της κατανομής του δείγματος, δηλαδή το 1^ο και το 3^ο τεταρτημόριο (*quartile*). Το κ-οστό εκατοστημόριο ενός συνόλου δεδομένων είναι η τιμή, μικρότερης της οποίας βρίσκεται το κ ποσοστό του συνόλου παρατηρήσεων. Επίσης, χρειάζεται ο ορισμός του μεγέθους στο οποίο οφείλει την ονομασία της η μέθοδος, του διατεταρτημοριακού διαστήματος, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ Q_3 και Q_1 :

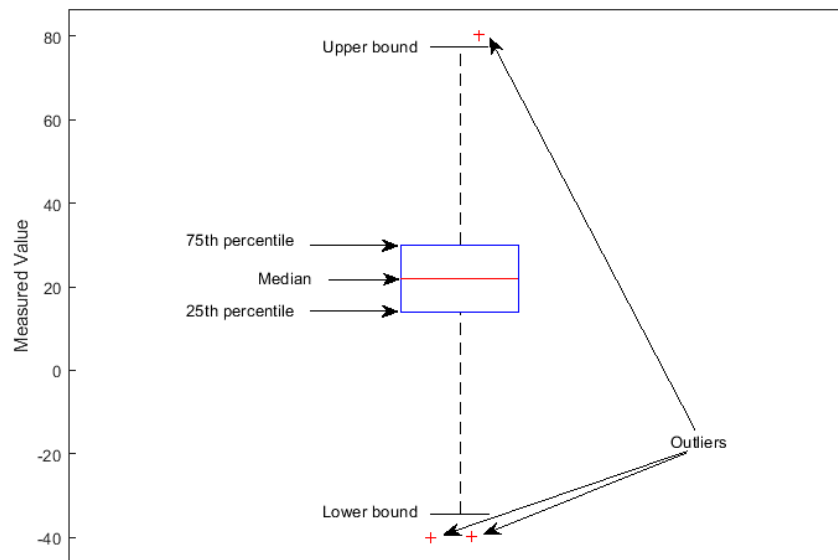
$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (2.2)$$

Με βάση τα μεγέθη αυτά και μια παράμετρο κλίμακας p , ορίζεται ένα κάτω και ένα άνω φράγμα για το κριτήριο, έστω το LB και UB αντίστοιχα, εκτός της οποίας οι τιμές κατηγοριοποιούνται ως έκτροπες. Τα προαναφερθέντα όρια δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} LB &= Q_1 - p \cdot IQR \\ UB &= Q_3 + p \cdot IQR \end{aligned} \quad (2.3)$$

Συνήθως και ευρέως χρησιμοποιούμενη τιμή της παραμέτρου κλίμακας είναι η $p = 1.5$, ενώ ακριβέστερα στις περισσότερες αναφορές τις μεθόδου δεν διερευνάται η δυνατότητα και η ισχύς της χρήσης διαφορετικής τιμής. Εδώ, η χρήση των εκατοστημορίων για το προσδιορισμό των ορίων καθιστά θεωρητικά ανθεκτικότερη τη μέθοδο σε σχέση με αυτή της τυπικής βαθμολογίας, εφόσον αυτά είναι ανθεκτικά μέτρα διασποράς, ενώ η τυπική απόκλιση και η μέση τιμή δεν είναι.

Τα τελευταία επηρεάζονται άμεσα από τις τιμές των έκτροπων μετρήσεων του δείγματος που αναλύεται. Ταυτόχρονα, τα όρια είναι συμμετρικά ως προς τη διάμεσο τιμή (*median*, 2^ο στατιστικό τεταρτημόριο) η οποία είναι επίσης ανθεκτικό μέτρο κεντρικής τάσης, αφού δεν επηρεάζεται από τις τιμές των έκτροπων μετρήσεων σε αντιδιαστολή με τη μέση τιμή. Μολαταύτα, όμοια με προηγούμενα, το κριτήριο δεν μπορεί να ξεχωρίσει αν μια έκτροπη τιμή οφείλεται σε εσφαλμένη μέτρηση ή αν πρόκειται πράγματι για μια ακραία τιμή. Παράλληλα, αναφέρεται πως στόχος του εφευρέτη της μεθόδου ήταν η προσέλκυση της προσοχής του ερευνητή για περαιτέρω διερεύνηση και όχι η κατηγοριοποίηση τιμών ως έκτροπων με ότι επιφέρει αυτό [18]. Παρόλα αυτά, η μέθοδος προσφέρει έναν ιδιαίτερο τρόπο γραφικής αναπαράστασης του συνόλου των μετρήσεων και των χαρακτηριστικών μεγεθών μέσω του θηκογράμματος. Πρόσθετα, η μέθοδος αυτή έχει επιτυχώς εφαρμοσθεί στο [17] με αποτελεσματικότητα και ακρίβεια παρόμοια αυτής της μεθόδου *z-score*. Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται το θηκόγραμμα τυχαίου συνόλου τιμών που προέρχεται από κανονική κατανομή, η επιλογή της παραμέτρου κλίμακας είναι $p = 3$. Επί του θηκογράμματος απεικονίζονται όλα τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μεγέθη, ενώ απεικονίζονται με σημεία εκτός ορίων όλες οι κατηγοριοποιούμενες ως έκτροπες μετρήσεις.



Σχήμα 2-3: Θηκόγραμμα τυχαίου δείγματος κανονικής κατανομής

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της μεθόδου αυτής με την αντίστοιχη της τυπικής βαθμολογίας σε περίπτωση μελέτης συνόλου δεδομένων που ακολουθεί κανονική κατανομή. Έστω q η τιμή της αντίστροφης πυκνότητας πιθανότητας του 75^{ου} εκατοστημόριου του δείγματος για τυπική κανονική κατανομή ($\mu = 0, \sigma = 1$), τότε για οποιαδήποτε κανονική κατανομή τα δύο χαρακτηριστικά εκατοστημόρια της μεθόδου δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} Q_1 &= -q \cdot \sigma + \mu \\ Q_3 &= q \cdot \sigma + \mu \end{aligned} \quad (2.4)$$

Σύμφωνα με την παρατήρηση αυτή, τα άνω και κάτω όρια του θηκογράμματος υπολογίζονται ως:

$$\begin{aligned} LB &= (-q \cdot \sigma + \mu) \cdot (1 + 2p) \\ UB &= (q \cdot \sigma + \mu) \cdot (1 + 2p) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Θεωρούνται τα όρια αυτά ως το γινόμενο του παράγοντα της πρώτης παρένθεσης στο δεξί μέλος των (2.5) και μιας αυθαίρετης σταθεράς κ με το κατάλληλο φυσικά πρόσημο, τότε είναι:

$$\begin{aligned} LB &= -\kappa \cdot q \cdot \sigma + \mu \\ UB &= \kappa \cdot q \cdot \sigma + \mu \end{aligned} \quad (2.6)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.5) - (2.6), λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της παραμέτρου κλίμακας:

$$p = \frac{\kappa - 1}{2} \quad (2.7)$$

Όμως, εκφράζοντας τις εξισώσεις (2.5) ως βαθμολογίες z , προκύπτει:

$$LB_z = \frac{-\kappa \cdot q \cdot \sigma + \mu - \mu}{\sigma} = -\kappa \cdot q \quad (2.8)$$

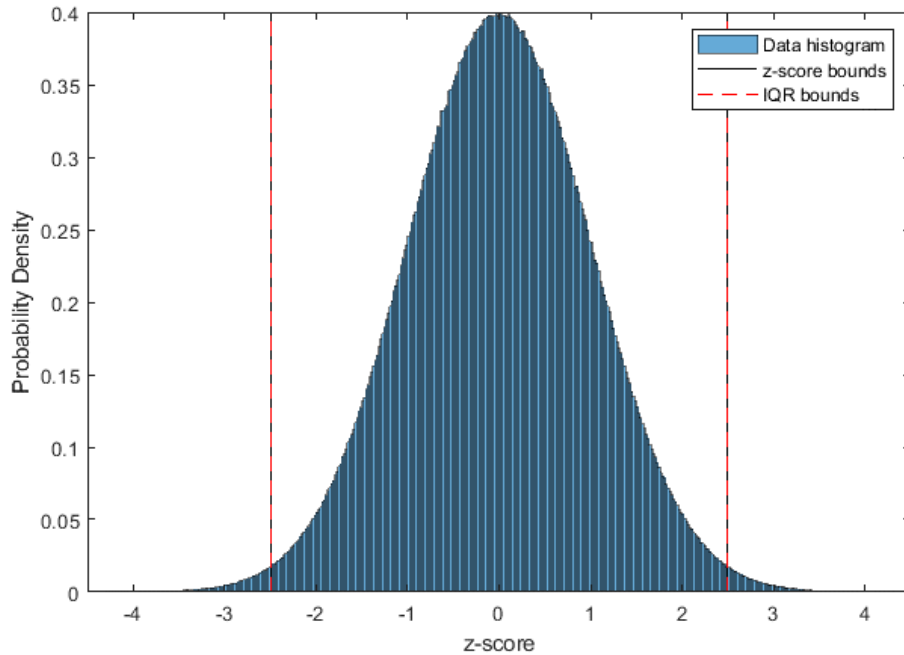
$$UB_z = \frac{\kappa \cdot q \cdot \sigma + \mu - \mu}{\sigma} = \kappa \cdot q \quad (2.9)$$

Εν ολίγοις, η Σχέση (2.7) ορίζει την παράμετρο κλίμακας για την οποία τα όρια εκφρασμένα ως βαθμοί z προκύπτουν ίσα με αυτά που δίνονται από τις Σχέσεις (2.8), (2.9). Δηλαδή, αν το σύνολο των μετρήσεων που μελετώνται ακολουθεί πράγματι κανονική κατανομή, τότε η μέθοδος z -score με όρια αυτά των (2.8), (2.9) και η μέθοδος IQR με παράμετρο κλίμακας που προκύπτει από την (2.7) για την προεπιλεγθείσα παράμετρο κ , ορίζουν τα ίδια όρια και επομένως παράγουν τα ίδια αποτελέσματα. Φυσικά, υπάρχει η δυνατότητα αναδιάταξης των σχέσεων ώστε να ορίζεται αυθαίρετα το οριακό z -score από τον χρήστη της μεθοδολογίας και η παράμετρος κλίμακας p προκύπτει απευθείας συναρτήσει αυτού:

$$p = \frac{UB_z - q}{2q} \quad \text{ή} \quad p = \frac{-LB_z - q}{2q} \quad (2.10)$$

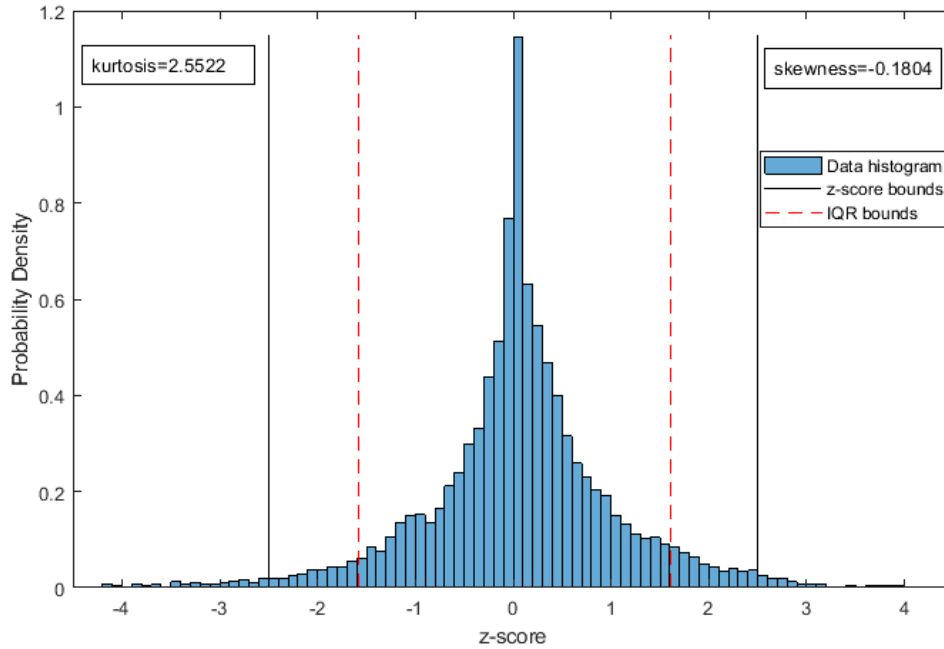
Εντούτοις, έτσι μπορεί να παραχθεί μια ένδειξη για το αν το υπό μελέτη σύνολο προέρχεται από κανονική κατανομή και να ληφθεί μια τραχεία ποσοτικοποίηση για το μέγεθος της απόκλισης αντιπαραθέτοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων. Στην πράξη, όμως, εισάγονται ανακρίβειες, κυρίως από τον αλγόριθμο υπολογισμού των δυο τεταρτημόριων που χρειάζονται στη μέθοδο θηκογράμματος. Εφαρμόζοντας πειραματικά τις δυο μεθόδους για τυχαία δείγματα

προερχόμενα από κανονικές κατανομές διαφορετικών παραμέτρων, παρατηρήθηκε πως η απόλυτη διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων ορίων των δυο μεθόδων δεν υπερβαίνει την τιμή του $5 \cdot 10^{-3}$ σε μονάδες z-score για το πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Σημειώνεται ότι τα πειράματα έγιναν λαμβάνοντας μεγάλα πλήθη δείγματος προκειμένου να αντισταθμιστεί η επίπτωση της τυχαίας λήψης τιμών από την κανονική κατανομή. Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται τα όρια που ορίζονται από την εφαρμογή των δυο κριτηρίων για οριακό απόλυτο z-score ίσο με 2.5 και παράμετρο κλίμακας που ικανοποιεί την Σχέση (2.10).

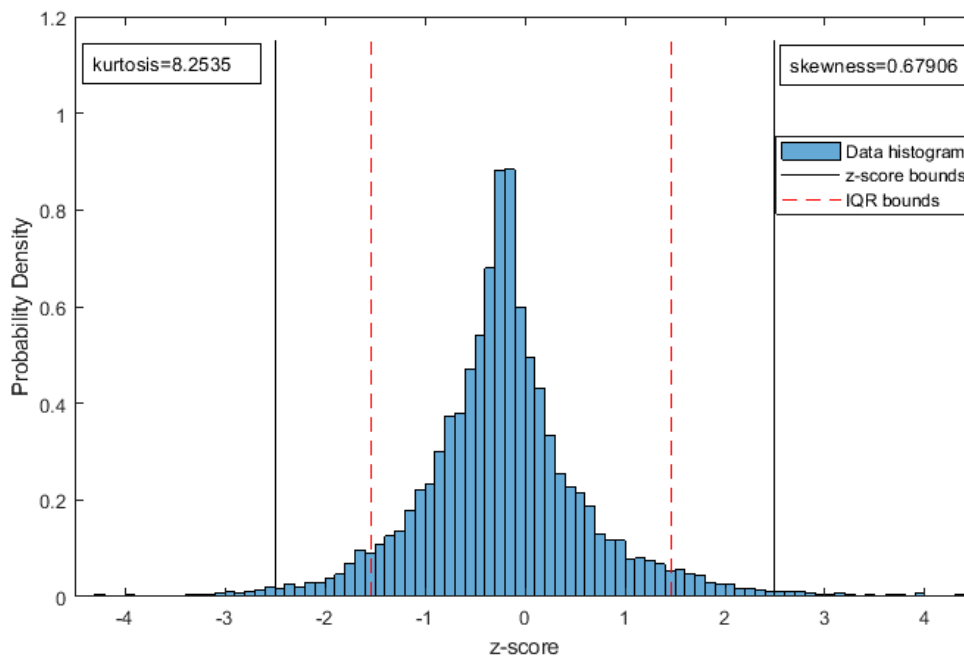


Σχήμα 2-4: Ιστογράμμο τυχαίου δείγματος κανονικής κατανομής και όρια κριτηρίων ανίχνευσης έκτροπων τιμών

Παράλληλα, στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 2-5, Σχήμα 2-6) παρουσιάζονται παραδείγματα χάριν τα ιστογράμματα κάποιων συνόλων μετρήσεων και τα αντίστοιχα όρια που ορίζουν αμφότερα τα κριτήρια εφαρμοζόμενα όπως ανωτέρω, προκειμένου να επιδειχθεί η μη κανονικότητα των κατανομών των μετρήσεων που μελετώνται.



Σχήμα 2-5: Ιστόγραμμα μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης στο πίσω τμήμα κελύφους βυτίου οχήματος



Σχήμα 2-6: Ιστόγραμμα μετρήσεων κάθετης επιτάχυνσης στο εμπρός άκρο βυτίου οχήματος

Σχετικά με την ομοιότητα της πιθανοτικής κατανομής των μετρήσεων ως προς την γκαουσιανή κατανομή, υπάρχουν δυο μεγέθη τα οποία μπορούν να την ποσοτικοποιήσουν, η κύρτωση (*kurtosis*) και η λοξότητα (*skewness*) της κατανομής [19]. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διαφορετικοί τρόποι εκτίμησης των δύο αυτών μεγεθών οι οποίοι οδηγούν σε διαφορετικές

ερμηνείες τους. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οι δείκτες λοξότητας γ_1 και κύρτωσης γ_2 όπως προτείνονται στο [20]:

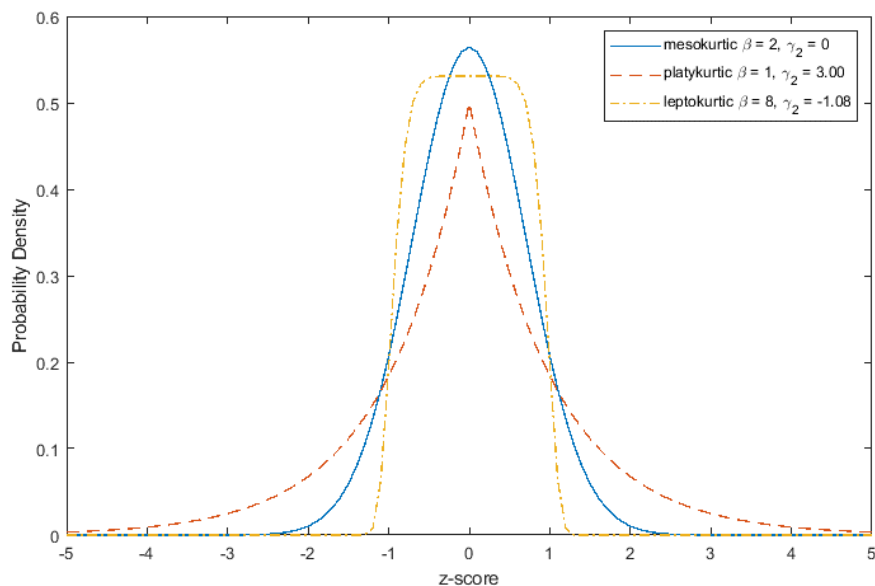
$$\gamma_1 = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \right)^3} \quad (2.11)$$

$$\gamma_2 = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \right)^2} - 3.0 \quad (2.12)$$

Αν αμεληθεί ο αφαιρετέος όρος στη σχέση (2.12), τότε οι παραπάνω δείκτες αποτελούν την τρίτη και την τέταρτη κανονικοποιημένη στατιστική ροπή, αντίστοιχα. Για δεδομένης μεταβλητότητας, μονοπαραμετρική και συμμετρική κατανομή, μεγαλύτερες τιμές της κύρτωσης υποδηλώνουν περισσότερες τιμές να βρίσκονται στις ουρές στα άκρα της κατανομής, ενώ μικρότερες το αντίθετο. Αντίστοιχα, η λοξότητα αποτελεί ένα μέγεθος που εκφράζει την συμμετρικότητα της κατανομής, θετικές τιμές της συνεπάγονται περισσότερες τιμές του δείγματος να βρίσκονται αριστερά του μέσου δηλαδή να έχουν μικρότερη από αυτό τιμή, αντιθέτως όταν λαμβάνονται αρνητικές. Με βάση αυτόν τον ορισμό των δεικτών η κανονική κατανομή έχει μηδενική κύρτωση και μηδενική λοξότητα. Ωστόσο, προς αποφυγή σύγχυσης αναφέρεται ότι στη βιβλιογραφία συχνά ο δείκτης κύρτωσης παρατίθεται χωρίς τον αφαιρετέο όρο στο δεξί μέλος της (2.12) με αποτέλεσμα η τιμή του για κανονική κατανομή να λαμβάνεται ίση με $\gamma_2 = 3.0$. Λόγω του παραπάνω, ο δείκτης κύρτωσης που ορίστηκε ονομάζεται και περίσσεια κύρτωσης, αφού αποτελεί τη διαφορά μεταξύ της υπολογιζόμενης κύρτωσης του δείγματος και αυτής της κανονικής κατανομής [21]. Είναι άξιο αναφοράς το ότι ιστορικά η κύρτωση συχνά λογίζοταν ως μέτρο της αιχμηρότητας της κατανομής κάτι που ευθέως καταρρίπτεται από το [22].

Εντούτοις, πράγματι υπολογίζοντας τους δείκτες κύρτωσης και λοξότητας μέσω των δοσμένων εξισώσεων λαμβάνεται ένα μέτρο της ομοιότητας της υπό μελέτη κατανομής ως προς την κανονική. Συνεπώς, εκτός της διαφοράς μεταξύ των ορίων που θέτουν οι μέθοδοι *IQR* και *z-score*, ελήφθησαν δυο επιπλέον μεγέθη για το χαρακτηρισμό της κανονικότητας της κατανομής που ακολουθούν οι εν λόγω μετρήσεις. Ωστόσο, λαμβάνεται μέσω των τελευταίων μεγεθών και μια γενική εικόνα για τη φύση της κατανομής των μετρήσεων, ενώ παράλληλα γίνεται φανερό η επίδραση των μεγεθών αυτών επί της λειτουργικότητας αμφοτέρων των κριτηρίων ανίχνευσης όταν αυτά εφαρμόζονται με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο σύνολο των μετρήσεων. Πρωτίστως, ενδιαφέρει να αποκτηθεί εκ των προτέρων μια έστω και χονδρική εικόνα για τη συμπεριφορά των κριτηρίων εφαρμοζόμενων επί χρονοσειρών με λοξότητα και περίσσεια κύρτωσης.

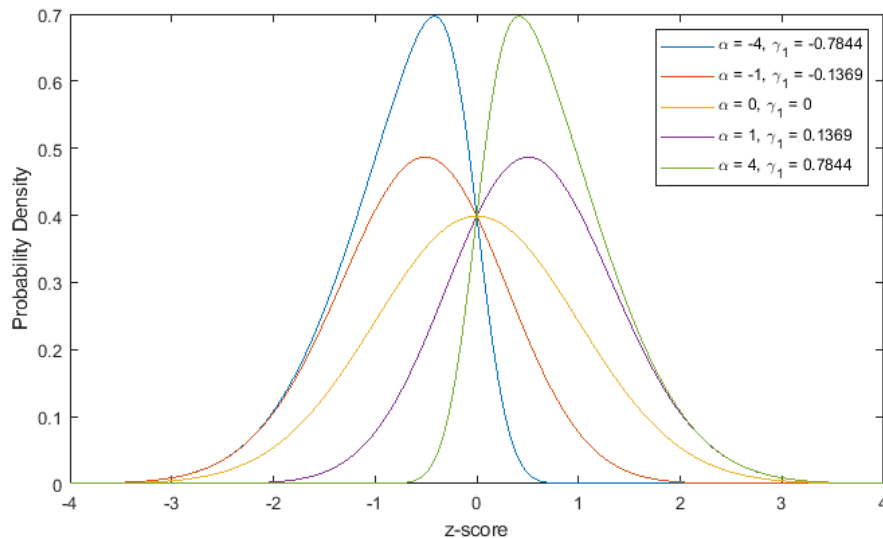
Εμβαθύνοντας, θετική περίσσεια κύρτωσης συνεπάγεται το χαρακτηρισμό της κατανομής ως λεπτόκυρτη (π.χ. Σχήμα 2-5 και Σχήμα 2-6), ενώ αρνητική την χαρακτηρίζει ως πλατύκυρτη αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε, στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν περισσότερες τιμές στα άκρα ή ουρές της κατανομής, δηλαδή σε μεγαλύτερα μέτρα του *z-score*, και λιγότερες κοντά στη μέση τιμή. Αυτό συνεπάγεται για μια τέτοια κατανομή, η πιθανότητα να βρίσκεται μια μέτρηση εκτός των ορίων ελέγχου που τίθενται για το κριτήριο τυπικής βαθμολογίας, να είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται για κανονική (μεσόκυρτη) κατανομή ίδιας μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης. Αντίθετα, για μια πλατύκυρτη κατανομή μετρήσεων λαμβάνονται μικρότερες οι αντίστοιχες πιθανότητες. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2-7 απεικονίζονται μέσω της πρώτης έκδοσης της γενικευμένης κανονικής κατανομής [23], καμπύλες πυκνότητας πιθανότητας για διαφορετικά μεγέθη κύρτωσης αλλά για ίδιες παραμέτρους της κατανομής. Η γενικευμένη αυτή κατανομή επιτρέπει μέσω μιας παραμέτρου μορφής β να επιδειχθούν διαφορετικές περιπτώσεις κύρτωσης, ενώ ο δείκτης κύρτωσης βρίσκεται συναρτήσει αυτής. Σημειώνεται πως για $\beta = 2$ λαμβάνεται η κανονική κατανομή, ενώ περιλαμβάνεται και η κατανομή *Laplace* για $\beta = 1$. Εν ολίγοις, μέσω της ύπαρξης περίσσειας κύρτωσης στα δεδομένα, επηρεάζεται άμεσα το πώς ορίζεται μέσω του κριτηρίου μια τιμή μέτρησης ως έκτροπη. Η λειτουργικότητα του κριτηρίου διατεταρτημοριακού διαστήματος δεν αναμένεται να επηρεαστεί σημαντικά από την ύπαρξη περίσσειας κύρτωσης, αφού το ομώνυμο του κριτηρίου μέγεθος αποτελεί ανθεκτικό μέτρο στατιστικής διασποράς όπως προκύπτει από τα προηγουμένως αναφερθέντα.



Σχήμα 2-7: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας γενικευμένης κατανομής σφάλματος ($\mu=0, \sigma=1$)

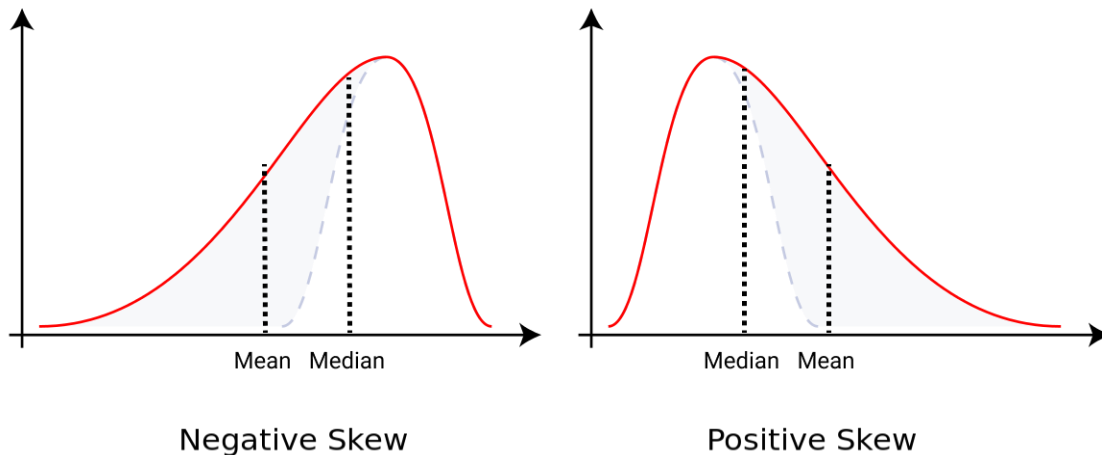
Όσον αφορά στη λοξότητα της κατανομής, αναφέρθηκε πως αυτή χαρακτηρίζει την συμμετρία ή την έλλειψη αυτής για μια πιθανοτική κατανομή. Ακριβέστερα, αν πρόκειται για λοξή κανονική

κατανομή, η κορυφή της βρίσκεται αριστερά ή δεξιά της μέσης τιμής όταν ο δείκτης της λοξότητας λαμβάνει θετικό ή αρνητικό πρόσημο αντιστοίχως. Επιπρόσθετα, θετική λοξότητα συνεπάγεται ότι η ουρά της κατανομής απλώνεται περισσότερο προς τα δεξιά της μέσης τιμής, ενώ αρνητική λοξότητα το αντίθετο. Τα παραπάνω γίνονται περισσότερο φανερά μέσω της λοξής κανονικής κατανομής όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας λοξής τυποποιημένης κανονικής κατανομής ($\mu=0, \sigma=1$)

Η τελευταία αποτελεί γενίκευση της κανονικής κατανομής η οποία επιτρέπει την εισαγωγή λοξότητας μέσω μιας παραμέτρου μορφής α , όπου όταν μηδενίζεται η παράμετρος αυτή λαμβάνεται η κανονική κατανομή [24]. Ο δείκτης λοξότητας υπολογίζεται, έχοντας καθορίσει την παράμετρο μορφής, με τη μέθοδο των ροπών. Το σχήμα προϋποθέτει για το ότι η εφαρμογή της μεθόδου τυπικής τιμής θα πρέπει να γίνει με διαφορετικά όρια βαθμού z για αρνητικές τιμές και διαφορετικά για θετικές πέραν από κάποια τιμή του απόλυτου δείκτη λοξότητας. Αυτόματως προκύπτουν τα ερωτήματα για το πέραν ποιας τιμής λοξότητας επηρεάζεται σημαντικά η λειτουργικότητα του κριτηρίου και για το πώς θα πρέπει να τροποποιήσουμε τα όρια εκατέρωθεν της μέσης τιμής ώστε να λάβουμε τις επιπτώσεις υπόψιν. Τα ερωτήματα αυτά υφίστανται και για την κύρωση μιας κατανομής μετρήσεων. Ταυτόχρονα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της λοξότητας επί του κριτηρίου διατεταρτημοριακού διαστήματος, οφείλεται να εστιασθεί η προσοχή στη συμπεριφορά της διάμεσης τιμής, αφού τα χαρακτηριστικά εκατοστημόρια αποτελούν εύρωστα μέτρα στατιστικής διασποράς. Είναι όμως γνωστό ότι η διάμεσος αποτελεί στιβαρό (ανθεκτικό) μέτρο κεντρικής τάσης, επομένως συνολικά δεν αναμένεται η λειτουργικότητα του κριτηρίου να παρουσιάσει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με την αναμενόμενη για μηδενική λοξότητα. Από το Σχήμα 2-9 γίνεται εμφανές πως η μετακίνηση της διάμεσου συναρτήσει της λοξότητας είναι πράγματι ευνοϊκή για την αποτελεσματικότητα του κριτηρίου.



Σχήμα 2-9: Η σχετική θέση της μέσης και της διαμέσου τιμής συναρτήσει του πρόσημου της λοξότητας

Από την προηγηθείσα συζήτηση αναμένεται η μέθοδος τυπικής τιμής να παρουσιάσει σοβαρές δυσχέρειες εφαρμοζόμενη επί συνόλων μετρήσεων με μη αμελητέα λοξότητα ή/και κύρτωση, ενώ το κριτήριο *IQR* αναμένεται να συμπεριφερθεί εύρωστα. Η μέθοδος του τροποποιημένου *z-score* στοχεύει στην αντιμετώπιση των δυσκολιών που εισάγει η χρήση της τυπικής τιμής. Για τον ορισμό του τροποποιημένου *z-score* αντικαθίσταται το μέγεθος της μέσης τιμής με τη διάμεσο τιμή \tilde{x} και την τυπική απόκλιση με τη διάμεσο των απόλυτων αποκλίσεων *MAD* (*Median Absolute Deviation*), τα οποία είναι ανθεκτικοί εκτιμητές [25]. Οι ορισμοί της τροποποιημένης τυπικής τιμής και του μεγέθους *MAD* δίνονται από τις σχέσεις:

$$z_m = \frac{0.67449 \cdot (x - \tilde{x})}{MAD} \quad (2.13)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n (|x_i - \tilde{x}|)}{n} \quad (2.14)$$

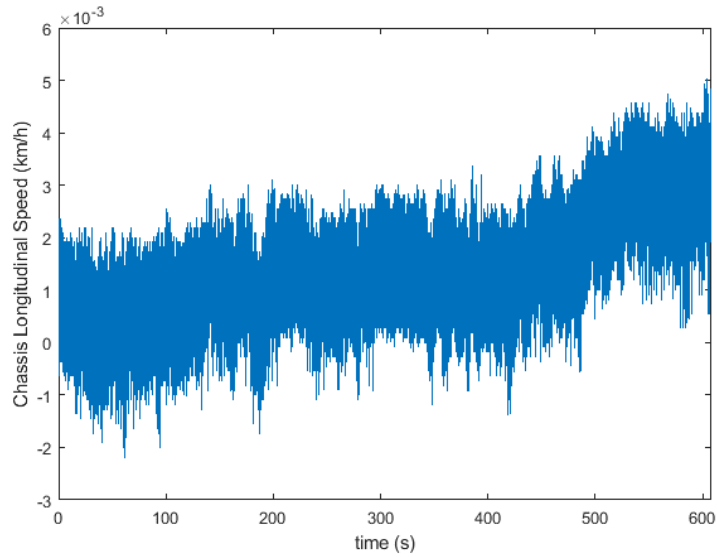
Όπου η σταθερά στον αριθμητή της (2.13) οφείλεται, σύμφωνα με την αρχική πρόταση της μεθόδου [26], στην παρατήρηση πως για κανονικά κατανομημένα δεδομένα η τιμή του εκτιμητή *MAD* προκύπτει:

$$E(MAD) = \Phi^{-1}(0.75) \cdot \sigma \approx 0.67449 \cdot \sigma \quad (2.15)$$

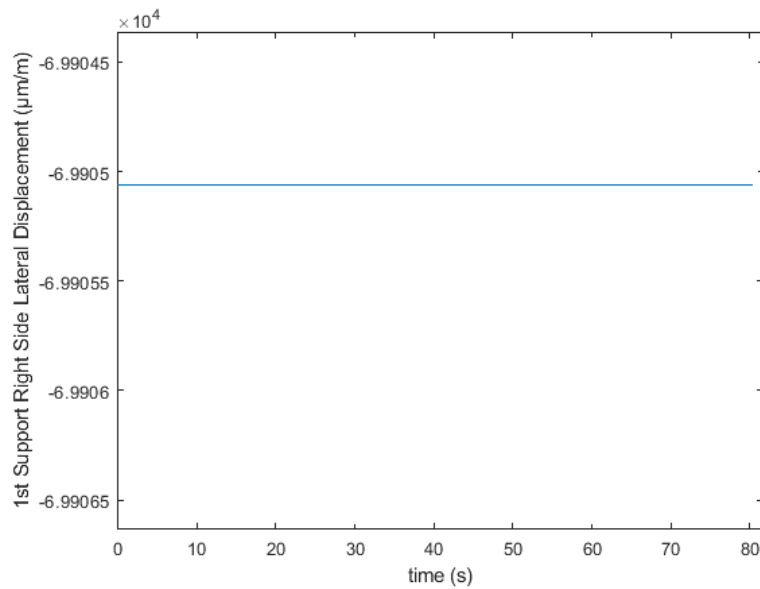
Η παρατήρηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι ο παραπάνω εκτιμητής καλύπτει το 50% της κανονικής συνάρτησης αθροιστικής κατανομής, από το 1^ο έως το 3^ο τεταρτημόριο, ωστόσο φαίνεται πως δεν είναι κατάλληλη για όλα τα πιθανά μεγέθη δείγματος [25]. Συνολικά, το τροποποιημένο *z-score* καθίσταται ανθεκτικό ως προς τις έκτροπες τιμές αξιοποιώντας στον ορισμό του εύρωστους εκτιμητές. Παράλληλα, η μέθοδος δεν απαιτεί κανονικότητα από την κατανομή του συνόλου των δεδομένων επί του οποίου εφαρμόζεται, ενώ ισχύουν προφανώς οι ίδιες παρατηρήσεις περί στατιστικής ερμηνείας όπως και για το απλό *z-score*.

2.2 Επιρρέπεια των Μετρήσεων σε Σφάλματα και Μελέτη Περιπτώσεων

Σκοπός στη συνέχεια είναι η δοκιμή των παραπάνω κριτηρίων επί των συνόλων μετρήσεων που διατίθενται, η εκτενής μελέτη της λειτουργικότητας τους και επικείμενα η διερεύνηση της φύσης των μετρήσεων που κατηγοριοποιήθηκαν ως έκτροπες. Μολαταύτα, εδώ η σκέψη αξιοποίησης των έκτροπων τιμών προς ανίχνευση μετρητικών σφαλμάτων μετουσιώνεται στην ιδέα αξιοποίησης τους ως μετρήσεις οι οποίες πιθανά περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την αναγνώριση ελιγμών και την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Εξάλλου, δεδομένων των ευρών στα οποία δύναται να λάβουν μετρήσεις με ακρίβεια οι αισθητήρες, των ευρών εντός των οποίων δύναται να κυμανθούν τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη αλλά και της καλής ποιότητας κατασκευής των μετρητικών οργάνων, εικάζεται πως η εκδήλωση άκυρων μετρήσεων μπορεί να οφείλεται μονάχα σε σφάλμα τοποθέτησης ή πρόσδεσης αλλά και σύνδεσης. Το πλήθος των αισθητήρων καθώς και η επιρρέπεια σε σφάλματα της διαδικασίας τοποθέτησης και σύνδεσης τους με την καταγραφική μονάδα καθιστά την πιθανότητα εκδήλωσης τέτοιων σφαλμάτων αρκετά μεγάλη. Ταυτόχρονα, τα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών των μετρητικών οργάνων παρέχουν τα όρια ευαισθησίας τους σύμφωνα με τα οποία υπάρχει εκτεταμένο περιθώριο για την υπέρβαση της ευαισθησίας τους. Φυσικά, το τελευταίο διαπιστώνεται αφού συλλογιστεί κανείς τις τιμές τις οποίες μπορούν να λάβουν τα μετρούμενα φυσικά μεγέθη για ένα βυτιοφόρο όχημα σε μια οποιαδήποτε διαδρομή εντός του οδικού δικτύου. Με άλλα λόγια, αναμένεται η εκδήλωση μετρητικών σφαλμάτων σε ένα σύνολο μετρήσεων να έχει διαχρονικό χαρακτήρα εντός αυτού και να μη λαμβάνει τη μορφή διακριτών μετρητικών στιγμάτων οι οποίες θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν ως έκτροπες με βάση τα προηγούμενα κριτήρια. Για παράδειγμα, στα πειραματικά δεδομένα εντοπίστηκε μια περίπτωση εσφαλμένου στησίματος μετρητικού οργάνου. Στην πρώτη περίπτωση, εντοπίζεται σφάλμα σύνδεσης του αισθητήρα ταχύτητας, η μέτρηση του διακυμαίνεται έντονα ενώ το μέτρο της μέτρησης είναι μόνιμα ελάχιστο και μάλιστα μικρότερο της ευαισθησίας του οργάνου ($0.5km/h$), όπως γίνεται φανερό από το Σχήμα 2-10. Στη δεύτερη περίπτωση παρουσιάζεται σφάλμα σύνδεσης ενός επιμηκυνσιομέτρου σε κάποιες από τις πειραματικές διαδρομές που έγιναν με το όχημα V2, το μετρούμενο σήμα λαμβάνει υπερφυσικά μεγάλο μέτρο και είναι πρακτικά αμετάβλητο κατά το πείραμα, όπως απεικονίζεται αυτά στο Σχήμα 2-11. Πρακτικά, το σήμα είναι πανομοιότυπο με την περίπτωση όπου το ελεγχόμενο κανάλι του καταγραφικού δε βρίσκεται συνδεδεμένο με κάποιο όργανο, όπως γίνεται με την περίπτωση των αναξιοποίητων καναλιών του οχήματος V1. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται σύνολα τιμών με μέση τιμή και διακύμανση σημαντικά μικρότερες των αναμενόμενων, δεδομένων των μετρούμενων μεγεθών. Η προηγούμενη διαπίστωση, πιθανά σε συνδυασμό με άλλα κριτήρια, θα μπορούσε να ενσωματωθεί ως έλεγχος για την απόρριψη τέτοιων εσφαλμένων μετρητικών δειγμάτων σε έναν αλγόριθμο κατηγοριοποίησης της οδηγικής συμπεριφοράς.



Σχήμα 2-10: Χρονοσειρά εσφαλμένης μέτρησης αισθητήρα ταχύτητας



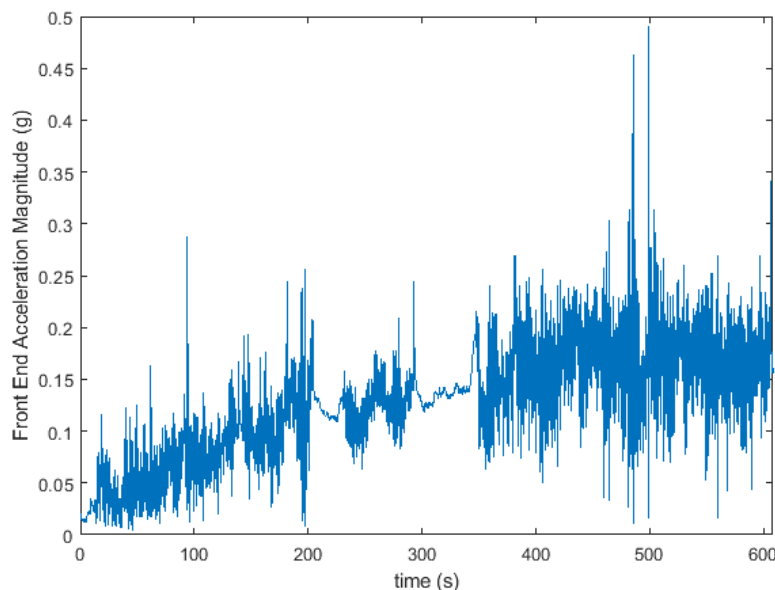
Σχήμα 2-11: Χρονοσειρά εσφαλμένης μέτρησης επιμηκυνσιομέτρου

Όσον αφορά στα πιθανά σφάλματα τοποθέτησης των αισθητήρων, αυτά ανάγονται σε απόκλιση της διεύθυνσης μέτρησης του οργάνου ως προς την αντίστοιχη επιθυμητή. Στη δεδομένη μετρητική διάταξη, το τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο κρίνεται ως το περισσότερο ευπαθές. Κατά την τοποθέτηση του τελευταίου ο κατακόρυφος άξονας πρέπει να βρίσκεται παράλληλος με το διάνυσμα της βαρύτητας, ενώ οι υπόλοιποι αντίστοιχα ως προς την εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση του οχήματος. Φυσικά, πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε κατά την τοποθέτηση το όχημα να βρίσκεται σε κατά το δυνατόν επίπεδο έδαφος. Μολαταύτα, οι αισθητήρες βαθμονομούνται προ της έναρξης κάθε πειράματος. Ο κατακόρυφος άξονας

βαθμονομείται λαμβάνοντας, κατά τη διαδικασία, μετρήσεις στον άξονα αυτό και στη συνέχεια προσθέτοντας την μετρούμενη επιτάχυνση αυτή στις επικείμενες. Η μετρούμενη αυτή επιτάχυνση σε περίπτωση επίπεδου εδάφους είναι η ίδια η βαρυτική επιτάχυνση, ενώ διαφορετικά είναι μικρότερη (κατά μέτρο) και η υπόλοιπη βαρύτητα εμφανίζεται ως συνιστώσα στις μετρήσεις του εγκάρσιου ή/και διαμήκους άξονα με πρόσημο ανάλογο πάντοτε της κατεύθυνσης. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα ασθενούς πρόσδεσης και μεταβολής του προσανατολισμού του αισθητήρα λόγω κραδασμών και κρουστικών φορτίων. Ως παράδειγμα, παρουσιάζεται ένα σύνολο μετρήσεων όπου η βαθμονόμηση έγινε υπό παρουσία ελαφράς κλίσης και υπερύψωσης του οδοστρώματος, ενώ κατά την πορεία ο αισθητήρας σταδιακά περιστρεφόταν προς μια κατεύθυνση. Βρέθηκε πως το μέτρο των επιταχύνσεων του τριαξονικού αισθητήρα, το οποίο δίνεται από τη Σχέση (2.16) ακολούθως, αποτελεί αποκαλυπτικό του συμβάντος μέγεθος.

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2.16)$$

Αναφέρεται παράλληλα πως κατά τη διαδρομή αυτή, σύμφωνα και με το οπτικό υλικό, δεν παρουσιάζονται σημαντικές αυξομειώσεις της κλίσης και της υπερύψωσης του οδοστρώματος. Η χρονοσειρά του μέτρου των φιλτραρισμένων πλέον μετρήσεων απεικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα 2-12. Από αυτό καθίσταται φανερή η σταδιακή αύξηση του μέτρου και κατά συνέπεια του συστηματικού σφάλματος που εισάγεται στις μετρήσεις.

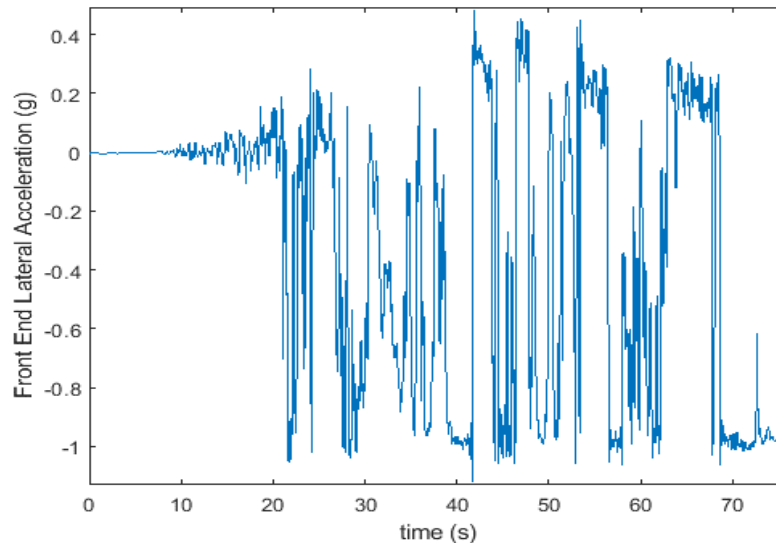


Σχήμα 2-12: Χρονοσειρά μέτρου επιτάχυνσης με απώλεια προσανατολισμού του τριαξονικού αισθητήρα

Εντούτοις, θεωρώντας το συστηματικό σφάλμα σταθερό κατά τους κρίσιμους χειρισμούς του οχήματος, η μορφή (*pattern*) του σήματος που περιγράφει τους χειρισμούς αυτούς είναι η ίδια με αυτή που λαμβάνεται χωρίς πρόκληση συστηματικού σφάλματος. Επομένως, η μελέτη των

τιμών των μετρήσεων θα οδηγούσε στα ίδια αποτελέσματα εάν γινόταν γύρω από την τιμή του συστηματικού σφάλματος έναντι του μηδενός. Πιθανά το παραπάνω μέγεθος δύναται να προσεγγισθεί, λαμβάνοντας κατάλληλα χρονικά παράθυρα στο δείγμα, από ένα στατιστικό μέγεθος όπως η διάμεσος τιμή ή κάποιο άλλο εκατοστημόριο. Η θεωρία αυτή θα εξετασθεί σε επόμενη ενότητα εφαρμόζοντας για διάφορα παράθυρα τα κριτήρια *IQR* και τροποποιημένης τυπικής τιμής σε διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων.

Τελευταία, παρουσιάζεται σφάλμα σε μετρήσεις εγκάρσιας επιτάχυνσης από το εμπρόσθιο άκρο το οποίο πιθανά οφείλεται σε αποτυχία της πρόσδεσης του επιταχυνσιόμετρου και εκδηλώνεται ως αυξημένη ευαισθησία μέτρησης προς την αρνητική κατεύθυνση. Η αντίστοιχη χρονοσειρά παρουσιάζεται στο .. όπου γίνεται εμφανής η παραπάνω παρατήρηση. Το στατιστικό μέγεθος που βρίσκεται ικανό να διαχωρίσει σφάλματα αυτής της φύσης είναι η λοξότητα του συνόλου μετρήσεων καθώς σε μια τέτοια περίπτωση λαμβάνει υπέρμετρη τιμή.



Σχήμα 2-13: Εσφαλμένη χρονοσειρά εγκάρσιας επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου

Κεφάλαιο 3 Θόρυβος, Παρεμβολές και Φιλτράρισμα Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναγνωρίζονται οι παράγοντες που καθιστούν δυσχερή την αξιοποίηση των μετρήσεων για την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Ταυτόχρονα, ερευνώνται και παρουσιάζονται οι δυνατότητες αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων με τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την εφαρμογή κατάλληλου ψηφιακού φίλτρου επί των μετρήσεων. Συγχρόνως, αναζητούνται και σχολιάζονται, όπου φυσικά εντοπίζονται, πιθανοί τρόποι εκμετάλλευσης των μετρήσεων για την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς.

3.1 Η Ανάγκη Χρήσης Φίλτρου

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων από τις μετρήσεις των διαφόρων αισθητήρων, πρέπει αυτές να διαμορφωθούν ώστε να αφαιρεθεί ο θόρυβος που υπερτίθεται στο μετρούμενο σήμα. Ο θόρυβος αποτελεί ανεπιθύμητη τυχαία διακύμανση της τιμής του μετρητικού σήματος [27],[28] και στην περίπτωση της δεδομένης μετρητικής διάταξης αναμένεται να συναποτελείται από τις παρακάτω κατηγορίες:

- **Ηλεκτρομαγνητικός και ηλεκτροστατικός (ηλεκτρικός) θόρυβος** από την έκθεση των αγωγών ηλεκτρικού σήματος σε μαγνητικά και ηλεκτρικά χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία από διάφορες πηγές (π.χ. δυναμό, άλλοι αγωγοί).
- **Θερμομηχανικός θόρυβος** από τυχαία φαινόμενα που οφείλονται στην ύπαρξη θερμότητας.
- **Ηλεκτρονικός οφειλόμενος στο σφάλμα κβαντισμού του συστήματος** απόκτησης δεδομένων το οποίο υπερτίθεται στο σήμα.

Από τις κατηγορίες αυτές ο θερμομηχανικός και ιδιαιτέρως ο ηλεκτρικός θόρυβος αναμένεται να έχουν την ισχυρότερη επίδραση. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό δύναται να λυθεί εφαρμόζοντας ένα ψηφιακό χαμηλοπερατό (*Low-pass*) φίλτρο στις ληφθείσες μετρήσεις [29] λόγω του ότι ο θόρυβος χαρακτηρίζεται από υψηλές συχνότητες. Φιλτράροντας το σύνολο των μετρήσεων καθίσταται δυνατή η διατήρηση της πληροφορίας του σήματος η οποία σχετίζεται με το εύρος συχνότητας που ενδιαφέρει και η αποκοπή της υπόλοιπης.

Ωστόσο, εκτός αυτών των δυσχερειών στην ερμηνεία των χρονοσειρών των μετρήσεων, προκύπτει και το ερώτημα για το εάν τα μετρούμενα μεγέθη εν τέλει αποδίδουν την ευκρίνεια που απαιτείται από την ανάλυση. Συγκεκριμένα, έχοντας ως αρχικό στόχο την ανίχνευση και την κατηγοριοποίηση ελιγμών και χειρισμών του οδηγού, ενδιαφέρει η εκτίμηση της ταχύτητας του οχήματος για το προσδιορισμό της τροχιάς του. Εστιάζοντας στη διαμήκη δυναμική, επιδιώκεται

η ανίχνευση φάσεων επιτάχυνσης και πέδησης μέσω μέτρησης και ανάλυσης της διαμήκου επιτάχυνσης. Η μέτρηση αυτή θα ήταν ιδανική εάν περιλάμβανε μόνο πληροφορίες που σχετίζονται με την τροχιά του οχήματος επί του οδικού δικτύου. Με διαφορετικά λόγια, η επιτάχυνση που είναι προτιμητέο να μετρηθεί για την ανίχνευση ελιγμών, είναι αυτή της οποίας η διπλή ολοκλήρωση θα απέδιδε με ακρίβεια την τροχιά του οχήματος. Τοποθετώντας το επιταχυνσιόμετρο επί του οχήματος μετρείται μεν η επιθυμητή επιτάχυνση αλλά δε επιταχύνσεις που οφείλονται σε άλλα αίτια παρεμβάλλονται και υπερτίθενται στο μετρούμενο σήμα. Αναγκαστικά, η μέτρηση του επιταχυνσιόμετρου θα δέχεται παρεμβολές από τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ανάρτησης και των υπολοίπων συστημάτων που απαρτίζουν το όχημα. Για παράδειγμα, ένα φρενάρισμα μέχρι ακινησίας γίνεται αντιληπτό από το επιταχυνσιόμετρο στο εμπρόσθιο μέρος ως αρχικά ένα αρνητικό σήμα, τελικά αν ο δρόμος είναι τελείως επίπεδος ως μηδενικό, αλλά ενδιάμεσα παρουσιάζεται μια θετική αιχμή. Πράγματι, η επιβράδυνση οδηγεί στη μετατόπιση του κέντρου βάρους προς τα εμπρός προκαλώντας μια στιγμιαία βύθιση στο εμπρόσθιο μέρος και εν συνεχεία την επαναφορά του. Εκτός αυτού, οι ατέλειες του οδοστρώματος σε συνδυασμό με την κλίση αλλά και την υπερύψωσή του, επίσης συμβάλλουν στη διαμόρφωση του σήματος. Επιμένοντας στο διαμήκες παράδειγμα, όταν το όχημα βρίσκεται υπό κλίση διαφορετική αυτής για την οποία έγινε η βαθμονόμηση του διαμήκου επιταχυνσιόμετρου, τότε υπερτίθεται στο μετρούμενο σήμα και ένας παράγοντας που αντιστοιχεί στην επιτάχυνση της βαρύτητας. Εκ πρώτης όψεως αυτό δεν φαίνεται να εισάγει δυσκολίες, ωστόσο όταν το όχημα βρίσκεται σταθμευμένο υπό κλίση η αντίστοιχη μέτρηση επιτάχυνσης βρίσκεται μη μηδενική προβάλλοντας την ψευδή εικόνα πως το όχημα κινείται. Προφανώς, τότε η ολοκλήρωση του σήματος δε θα απέδιδε μηδενική εκτίμηση της ταχύτητας κατά τη διάρκεια της στάσης ακόμα και για επιταχύνσεις με ελάχιστα μέτρα [29]. Ταυτόχρονα, η ύπαρξη φρεατίων, διαβαθμίσεων, ρωγμών και άλλων ατελειών επί του δρόμου οδηγεί σε δονήσεις στα δομικά μέρη του οχήματος οι οποίες εκφράζονται από επιταχύνσεις που υπερτίθενται στα μετρούμενα σήματα επιτάχυνσης. Επί της ουσίας όμως, εάν ενδιαφέρει ο καθορισμός της τροχιάς, οι ανομοιομορφίες αυτές αλλοιώνουν την πληροφορία που επιζητείται από το μετρούμενο σήμα. Τα παραπάνω προβλήματα υφίστανται και στην περίπτωση της εγκάρσιας δυναμικής όπου η υπερύψωση αντικαθιστά τον ρόλο της κλίσης. Αναφέρεται επίσης πως ανάλογα με τη θέση του επιταχυνσιόμετρου μπορεί η μέτρηση να επηρεάζεται από περιστρεφόμενα εξαρτήματα και παρελκόμενα αλλά και από ταλαντώσεις δομικών μερών. Ωστόσο, λόγω της περιοδικότητας των προκαλούμενων επιταχύνσεων, αυτές αναμένεται να μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν από το σήμα όπως και ο θόρυβος. Εκτός των παραπάνω, άλλοι πρόσθετοι παράγοντες είναι ο άνεμος και οι ριπές του αλλά και η εκτόπιση αέρα από διερχόμενα οχήματα. Παράλληλα, η αλλαγή της θερμοκρασίας λειτουργίας σε σχέση με αυτή της βαθμονόμησης εισάγει παρέκκλιση στο μετρούμενο σήμα. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί πως στα επιμηκυνσιόμετρα η θερμική απόκλιση μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω της σύνδεσης τους

σε διάταξη γέφυρας Wheatstone [30]. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη περίπτωση το γεγονός ότι τα χρησιμοποιούμενα επιμηκυνσιόμετρα προσομοιάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού της σέλας στήριξης είναι ικανό για να θεωρηθεί αμελητέο το φαινόμενο. Τελικά, παρεμβολή θα γινόταν επίσης να προκληθεί από την ύπαρξη πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος σε σύνδεση με το μετρητικό σύστημα, υπερθέτοντας στην τιμή της μέτρησης ένα ημιτονοειδές κύμα.

Εν ολίγοις, λόγω των αναφερθέντων η αναγνώριση των διάφορων χαρακτηριστικών της οδηγικής συμπεριφοράς περιστατικών των πειραματικών διαδρομών μέσω απλής ολοκλήρωσης των μετρούμενων επιταχύνσεων θα είναι ατελής. Μολαταύτα, η διαδικασία αξιολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς δεν προϋποθέτει αναγκαστικά την επισήμανση των χαρακτηριστικών χειρισμών και φάσεων του κάθε πειράματος. Σχετικά με τα υπόλοιπα είδη μετρητικών οργάνων που διατίθενται για το πείραμα, το μετρούμενο από αυτά σήμα αναμένεται να αντιπροσωπεύει το φυσικό μέγεθος που επιδιώκεται να μετρηθεί, πλην θορύβου. Αρχικά λοιπόν, σχεδιάζεται ένα ψηφιακό φίλτρο ικανό για την αφαίρεση του θορύβου από τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων. Τα προβλήματα των επιταχυνσιομέτρων επανεξετάζονται στο επόμενο κεφάλαιο αφότου πλέον φιλτραριστούν κατάλληλα οι αντίστοιχες μετρήσεις.

3.2 Προσδιορισμός Κατάλληλου Τύπου Φίλτρου και Διαδικασία Σχεδιασμού

Προαναφέρθηκε ότι ο θόρυβος αναμένεται να είναι υψίσυχνος σε σχέση με το σήμα που ενδιαφέρει, για τον λόγο αυτό στη συνέχεια καταστρώνεται ο σχεδιασμός ενός χαμηλοπερατού φίλτρου ικανού για την αποκοπή των συνιστωσών του σήματος που σχετίζονται με υψηλές συχνότητες. Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί το είδος της κρουστικής απόκρισης του φίλτρου ανάμεσα σε πεπερασμένη και άπειρη, στα αγγλικά *finite impulse response (FIR)* και *infinite impulse response (IIR)*. Σύμφωνα με τον ορισμό του [30] ένα φίλτρο άπειρης κρουστικής απόκρισης *IIR*, έχει απόκριση άπειρης χρονικής διάρκειας σε μοναδιαία κρουστική συνάρτηση, ενώ ένα φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης έχει αντίστοιχη απόκριση πεπερασμένου μήκους. Τα φίλτρα αυτής της κατηγορίας ονομάζονται και αναδρομικά υπό την έννοια ότι για τον υπολογισμό της εξόδου τους, αξιοποιείται και το σήμα εισόδου αλλά και προηγούμενες τιμές του σήματος εξόδου [31]. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των δύο, ενώ ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται να εμβαθύνει περαιτέρω στους παραπάνω όρους παραπέμπεται στα [30], [32], [28]. Συγκρίσιμα φίλτρα των δυο ειδών, δηλαδή φίλτρα παρόμοιας λειτουργίας, ενέχουν μια σημαντική διαφορά μεταξύ τους η οποία εδώ κρίνεται ως ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή. Η διαφορά έγκειται στο ότι σχεδιάζοντας τα δύο φίλτρα ώστε να παράγουν παρόμοια αποτελέσματα, το *FIR* φίλτρο προκύπτει αισθητά υψηλότερης τάξης και παράλληλα επιτυγχάνει ταχύτητα φιλτραρίσματος περίπου μια τάξη μεγέθους μικρότερη από το αντίστοιχο *IIR* φίλτρο [28]. Καθώς το φίλτρο επεξεργάζεται το σήμα

με πεπερασμένη ταχύτητα, η ταχύτητα αυτή διαδραματίζει ριζικό ρόλο σε περίπτωση που επιδιώκεται η άμεση καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων. Παραδείγματος χάριν, στα πλαίσια ενός ασφαλιστικού μοντέλου *MHYD* επιδιώκεται η ταχέα ανίχνευση ριψοκίνδυνης οδήγησης και η προορατική ενημέρωση του οδηγού προκειμένου να προσαρμόσει σε πραγματικό χρόνο την οδηγική συμπεριφορά του [33]. Άλλο ένα παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής αποτελούν τα συστήματα προηγμένης υποβοήθησης οδήγησης. Συνηθέστερα, σχεδιάζονται αναλογικά φίλτρα αυτής της απόκρισης και η λειτουργία τους χαρτογραφείται σε ένα ψηφιακό φίλτρο, διότι η διαδικασία σχεδιασμού των πρότερων είναι σημαντικά τεχνολογικά προχωρημένη [32]. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ο διγραμμικός μετασχηματισμός (*bilinear transformation*) της συνάρτησης μεταφοράς του αναλογικού φίλτρου μετατρέποντας την από συνάρτηση συνεχούς χρονικού φάσματος σε διακριτού με αποτέλεσμα να ληφθεί το ψηφιακό φίλτρο [34]. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει θεωρητικά και την άμεση φυσική (αναλογική) υλοποίηση του ψηφιακά ελεγμένου φίλτρου μέσω της οποίας θα γίνονταν δυνατό το φιλτράρισμα του μετρούμενου σήματος προτού αυτό ψηφιοποιηθεί. Η χρήση αναλογικού φίλτρου θα δικαιολογούταν σε συστήματα όπως εκείνα των προηγούμενων παραδειγμάτων όπου απαιτείται ταχύτατη αξιολόγηση του σήματος, λόγω του ότι ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του έναντι του αντίστοιχου ψηφιακού είναι και η αισθητά μεγαλύτερη ταχύτητα [28].

Με βάσει τα ειπωμένα, επιλέγεται ο σχεδιασμός ενός ψηφιακού *IIR* φίλτρου με πρότυπο κάποιο τεχνολογικά ανεπτυγμένο αναλογικό φίλτρο που θα προσδιοριστεί στη συνέχεια. Το φίλτρο θα χαρακτηρίζεται κυρίως από δυο συχνότητες αποκοπής οι οποίες θα οριοθετούν τη ζώνη διέλευσης (*passband*) και τη ζώνη αποκοπής (*stopband*) αντίστοιχα. Ιδανικά, το σχεδιασμένο φίλτρο θα απέκοπτε πλήρως τις συνιστώσες του σήματος με συχνότητα που εμπίπτει στη ζώνη αποκοπής. Ταυτόχρονα, το τμήμα της πληροφορίας που σχετίζεται με τις συχνότητες εντός της ζώνης διέλευσης απαιτείται να παραμείνει αναλλοίωτο, ώστε η αξιολόγηση του συνολικού μέτρου του φιλτραρισμένου σήματος να οδηγήσει σε ορθά συμπεράσματα. Αναδιατυπώνοντας, επιθυμείται σταθερό κέρδος εντός της ζώνης διέλευσης με τιμές όσο γίνεται πλησιέστερες της μονάδας και ικανή μείωση ισχύος εντός της ζώνης αποκοπής ώστε να απαλειφθούν οι αντίστοιχες συνιστώσες του σήματος από αυτό. Δεδομένων αυτών των περιορισμών και των γνωστών τεχνολογικά αναπτυχθέντων αναλογικών φίλτρων, επιλέγεται να σχεδιαστεί ένα αναλογικό φίλτρο της κατηγορίας Butterworth [30]. Η προσέγγιση αυτή στο σχεδιασμό χαρακτηρίζεται από μέγιστα επίπεδη απόκριση μεγέθους (*magnitude response*) στη ζώνη διέλευσης και αποκοπής, δηλαδή από έλλειψη κυματισμού (*ripple*) εντός αυτών [34]. Επίσης, μέσω των παραπάνω επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή κλίση της καμπύλης απόκρισης μεγέθους κατά τη μετάβαση από την ζώνη διέλευσης στην αντίστοιχη αποκοπής, χωρίς την πρόκληση κορυφώσεων [31]. Ωστόσο, εξαιτίας των αναφερθέντων, η μεταβατική ζώνη που βρίσκεται ανάμεσα σε αμφότερες, καθίσταται ευρεία.

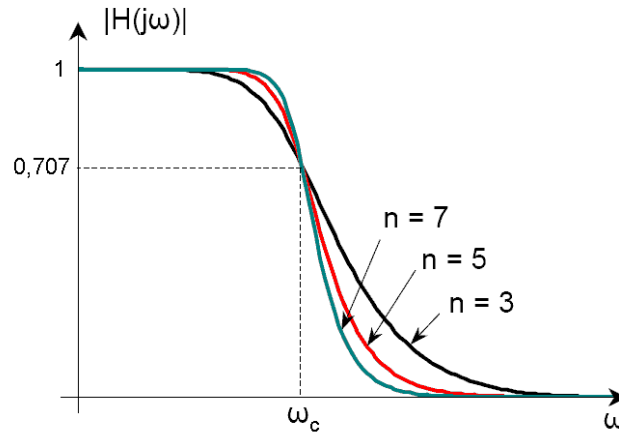
Εμβαθύνοντας, το τετραγωνικό μέγεθος της απόκρισης δίνεται στο συνεχές χρονικό φάσμα ή s -επίπεδο (αναλογικό) για χαμηλοπερατά τύπου Butterworth φίλτρα, από την σχέση:

$$|H(s)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{j\omega_c}\right)^{2n}} \quad (3.1)$$

Από τους παραπάνω όρους, j είναι η φανταστική μονάδα, n η τάξη του φίλτρου, $s = j\omega$ η παράμετρος Laplace, ω η συχνότητα και ω_c η συχνότητα αποκοπής. Επίσης, σημειώνεται ότι με ω συμβολίζεται γενικά η κανονικοποιημένη κυκλική συχνότητα, δηλαδή η συχνότητα f σε Hz διαιρεμένη δια τη συχνότητα δειγματοληψίας f_s και πολλαπλασιασμένη με 2π όπως δηλώνει η παρακάτω σχέση:

$$\omega = \frac{2\pi f}{f_s} \quad (3.2)$$

Στη συνέχεια, η κανονικοποιημένη κυκλική συχνότητα αναφέρεται ως συχνότητα για λιτότητα του λόγου. Στη Σχέση (3.1) η συχνότητα αποκοπής ω_c αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο και οριοθετεί τη ζώνη διέλευσης όπου στην περίπτωση αυτή ορίζεται ως αυτή για την οποία επιτυγχάνεται κέρδος -3dB ή ισοδύναμα, με άλλα λόγια οι συνιστώσες του σήματος που χαρακτηρίζονται από αυτή, υφίστανται μείωση της ισχύος τους κατά το ήμισυ. Παρατηρείται πως με αυτό τον τρόπο σχεδιασμού, η ζώνη διέλευσης δε χαρακτηρίζεται από απόλυτα σταθερό μέγεθος απόκρισης, αντιθέτως υφίσταται ομαλή μετάβαση από $|H(0)| = 1$ σε $|H(j\omega_c)| = 0.707$ [27]. Από τη Σχέση (3.1) γίνεται φανερό πως η κλίση της καμπύλης μεγέθους απόκρισης στη μεταβατική ζώνη εξαρτάται από την τάξη του φίλτρου. Εντούτοις, από την τελευταία θα εξαρτηθεί και η συχνότητα αποκοπής ω_{cs} η οποία οριοθετεί τη ζώνη αποκοπής προς τα κάτω και για την οποία επιτυγχάνεται η προδιαγραφή μείωσης ισχύος που τίθεται για τη ζώνη. Επί της ουσίας, υψηλότερη τάξη συνεπάγεται μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης, το γεγονός αυτό αποτυπώνεται στο διάγραμμα απόκρισης στο Σχήμα 3-1. Από το σχήμα καθίσταται φανερό και η επίδραση της τάξης επί της απόκρισης εντός της ζώνης διέλευσης και της θέσης της ζώνης αποκοπής που σχολιάστηκε νωρίτερα. Συμπεραίνεται άμεσα πως μικρότερη τάξη ενέχει μεγαλύτερη εξασθένιση του σήματος στη ζώνη διέλευσης, όσο φυσικά απαρτίζεται από συνιστώσες συχνοτήτων που βρίσκονται εντός της ζώνης και κοντά στη συχνότητα ήμισυς ισχύος με μη αμελητέο μέτρο. Παράλληλα, αφού η ζώνη αποκοπής ορίζεται με βάση τη μείωση ισχύος που πρέπει να επιτυγχάνεται ώστε να θεωρηθεί πλήρης η εξάλειψη των συνιστωσών του σήματος με τις αντίστοιχες συχνότητες, η μεταβατική ζώνη αποτελεί επίσης πρόβλημα. Με άλλα λόγια, οι συνιστώσες του σήματος που εμπίπτουν σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων, δεν αποσβένονται ικανά και συνεχίζουν να υφίστανται στο φιλτραρισμένο σήμα αλλά με μικρότερο μέτρο το οποίο ανάλογα και με το μέτρο του σήματος ενδιαφέροντος μπορεί να είναι σημαντικό μέγεθος.



Σχήμα 3-1: Επίδραση τάξης φίλτρου Butterworth επί της αιχμηρότητας της καμπύλης μεγέθους απόκρισης στη μεταβατική ζώνη [35]

Επιπρόσθετα, κατά το σχεδιασμό, καθορίζεται η μείωση της ισχύος ή το κέρδος που είναι επιθυμητό για την ζώνη αποκοπής και η συχνότητα αποκοπής της ζώνης ω_s που την οριοθετεί προς τα κάτω και για την οποία επιτυγχάνεται αυτή η μείωση ισχύος. Η τάξη λοιπόν του φίλτρου προσδιορίζεται από την απαραίτητη για επίτευξη απόσβεσης A_{cs} στη συχνότητα αποκοπής ω_s της ζώνης αποκοπής, δεδομένης της συχνότητα ήμισυς ισχύος ω_c . Σημειώνεται επίσης ότι για συχνότητες μεγαλύτερες τις ω_{cs} , δηλαδή εντός της ζώνης αποκοπής, απαιτείται το κέρδος του φίλτρου να είναι ίσο ή μικρότερο από $-A_{cs}$. Έπειτα, διατυπώνεται μαθηματικά η παραπάνω απαίτηση, προκειμένου τελικά να ευρεθεί η σχέση υπολογισμού της απαραίτητης τάξης του φίλτρου:

$$A(s) = 20 \log |H(s)| \leq -A_{cs} \quad , \quad \omega \geq \omega_{cs}$$

από όπου προκύπτει:

$$|H(j\omega_{cs})| = 10^{\frac{-A_{cs}}{20}}$$

Η παραπάνω σχέση μαζί με την (3.1), δίνει:

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_{cs}}{\omega_c}\right)^{2n}} = 10^{\frac{-A_{cs}}{10}}$$

και τελικά λαμβάνεται:

$$n = \frac{1}{2} \cdot \frac{\log \left(10^{\frac{A_{cs}}{10}} - 1 \right)}{\log \left(\omega_{cs} / \omega_c \right)} \quad (3.3)$$

Κατά συνέπεια, δύναται να υπολογιστεί η τάξη του φίλτρου συναρτήσει των υπόλοιπων απαιτήσεων που τίθενται κατά το σχεδιασμό.

Παρόλα αυτά, πρέπει προτού επιλεγθεί η τάξη του φίλτρου σύμφωνα με τη Σχέση (3.3), να επικυρωθεί η δυνατότητα εύρωστου σχεδιασμού και η αποτελεσματικότητα του διγραμμικού μετασχηματισμού ελέγχοντας αν το προκύπτων ψηφιακό φίλτρο παράγει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η τάξη του αναλογικού φίλτρου Butterworth είναι επί της ουσίας το πλήθος των πόλων της συνάρτησης μεταφοράς του μιας και απουσιάζουν μηδενιστές από αυτή [36]. Η συνήθης πρακτική στον σχεδιασμό φίλτρων του παραπάνω τύπου βασίζεται στην παρατήρηση ότι η σχέση του τετραγώνου του μεγέθους απόκρισης (3.1) μπορεί να γραφτεί και ως [30], [34], [36]:

$$H(s) \cdot H(-s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{j\omega_c} \right)^{2n}} \quad (3.4)$$

Οι πόλοι της εν λόγω συνάρτησης, δηλαδή οι ρίζες του παρονομαστή της, λαμβάνονται στις θέσεις:

$$s_p = j\omega_c \cdot (-1)^{\frac{1}{2n}} \quad (3.5)$$

Από τη σχέση αυτή γίνεται φανερό πως οι πόλοι πλήθους $2n$ διατάσσονται, με σταθερή γωνιακή απόσταση μεταξύ τους, στην περιφέρεια κύκλου ακτίνας ω_c ή αλλιώς του κύκλου Butterworth. Οι πόλοι της (3.4) λαμβάνονται σε ζεύγη συμμετρικά ως προς τον φανταστικό άξονα στο s -επίπεδο έτσι ώστε εάν ληφθεί ένας στο σημείο $s = s_p$, τότε να τοποθετείται άλλος ένας αντιστοίχως στο $s = -s_p$ [37]. Έτσι, δομώντας τη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου $H(s)$ από την αντίστοιχη του τετραγώνου της απόκρισης, διαλέγεται ένας πόλος από κάθε τέτοιο ζεύγος. Όμως, προκειμένου το φίλτρο να είναι ευσταθές, πρέπει οι πόλοι του να βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο του κύκλου Butterworth, δηλαδή να έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος. Η Σχέση (3.5) προειδοποιεί για τις δυσμενείς επιπτώσεις που θα επιφέρει η επιλογή μικρής ω_c σε συνδυασμό με μεγάλη τάξη n . Συγκεκριμένα, λόγω του ότι σε αυτή την περίπτωση οι πόλοι λαμβάνουν συντεταγμένες με πολύ μικρές τιμές, η αποθήκευση τους σε Η/Υ γίνεται ευαίσθητη ως προς την ακρίβεια ή των αριθμό των bits που θεσπίζεται για την αναπαράσταση τους υπό την αριθμητική κινητής υποδιαστολής. Με άλλα λόγια, υπάρχει πιθανότητα οι εν λόγω τιμές να είναι τόσο κοντά στο μηδέν που να μην επαρκεί η θεσπιζόμενη ακρίβεια για την αναπαράστασή τους. Ουσιαστικά,

ο εκθέτης της αναπαράστασης κινητής υποδιαστολής δύναται να ξεπεράσει την μέγιστη τιμή του, η οποία καθορίζεται από τη διατιθέμενη για την αποθήκευση του μνήμη. Το πρόβλημα συνιστά περίπτωση αριθμητικής υποχείλισης, ενώ οι αριθμοί που συζητήθηκαν ονομάζονται «υπό-κανονικοί» (*subnormal*) [38].

Προχωρώντας με τη μελέτη του διγραμμικού μετασχηματισμού, τη βάση αυτού συνιστά η ακόλουθη αλλαγή μεταβλητής:

$$s = 2f_s \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (3.6)$$

Άρα, ο μετασχηματισμός ορίζει τη συνάρτηση μεταφοράς του ψηφιακού φίλτρου ως εξής:

$$H_d(z) = H\left(2f_s \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}\right) \quad (3.7)$$

Με άλλα λόγια, η συνάρτηση μεταφοράς του αναλογικού φίλτρου απεικονίζεται από το s -επίπεδο στο λεγόμενο z -επίπεδο σχηματίζοντας το αντίστοιχο ψηφιακό, κατά συνέπεια ο μετασχηματισμός αυτός καλείται και ως z -μετασχηματισμός. Μέσω αυτού, η μεταβλητή $s = j\omega$ απεικονίζεται στον μοναδιαίο κύκλο του z -επιπέδου [36]. Αναφέρεται πως η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Butterworth στο μιγαδικό z -επίπεδο έχει έναν μηδενιστή τάξης n στο $z = -1$, ενώ οι πόλοι του διατάσσονται στην περιφέρεια κύκλου με κέντρο επί του πραγματικού άξονα. Ο κύκλος των πόλων τέμνει το παραπάνω άξονα στα σημεία με τετμημένες:

$$z_l = \frac{f_s - \omega_c}{f_s + \omega_c} \quad (3.8)$$

$$z_r = \frac{f_s + \omega_c}{f_s - \omega_c} \quad (3.9)$$

Η Σχέση (3.8) δίνει το σημείο τομής αριστερά του κέντρου, ενώ η (3.9) το αντίστοιχο στα δεξιά. Ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται να εμβαθύνει περαιτέρω στα αναφερθέντα παραπέμπεται στο [34]. Παράλληλα, σύμφωνα με τις τελευταίες σχέσεις η ακτίνα του υπό μελέτη κύκλου προκύπτει μετά από αφαίρεση της Σχέσης (3.8) από την (3.9) και διαίρεση του αποτελέσματος δια το 2, ίση με:

$$R_b = \frac{2\omega_c f_s}{f_s^2 - \omega_c^2} \quad (3.10)$$

Λόγω της προηγούμενης επιλογής τοποθέτησης των πόλων στο αριστερό ημιεπίπεδο του s -επιπέδου, οι ευσταθείς αυτοί πόλοι στο z -επίπεδο βρίσκονται επί του συζητούμενου κύκλου και ταυτόχρονα εντός του μοναδιαίου κύκλου με κέντρο την αρχή των αξόνων, όπου το τελευταίο συνεπάγεται και την ευστάθειά τους. Επομένως, ο χώρος που διατίθεται για την τοποθέτηση των πόλων εξαρτάται άμεσα από τις σχέσεις (3.8) - (3.10). Για παράδειγμα, παρατηρώντας τη Σχέση

(3.10), συμπεραίνεται πως για συχνότητα δειγματοληψίας του συνόλου των μετρήσεων πολύ μεγαλύτερη της κανονικοποιημένης κυκλικής συχνότητας αποκοπής η ακτίνα του κύκλου των πόλων γίνεται πολύ μικρή. Εν ολίγοις, στην περίπτωση αυτή, ο χώρος που διατίθεται για την τοποθέτηση των πόλων περιορίζεται σημαντικά, καθιστώντας έτσι τη λειτουργικότητα του φίλτρου επιρρεπή σε αριθμητικό θόρυβο που υπερτίθεται στις θέσεις των πόλων κατά τις απαραίτητες για τον υπολογισμό τους πράξεις. Όμως, η θέση του κύκλου των πόλων ως προς το μοναδιαίο μπορεί παρομοίως να δυσχεραίνει περαιτέρω την κατάσταση. Ταυτόχρονα, ο κβαντισμός των συντελεστών της συνάρτησης μεταφοράς του ψηφιακού φίλτρου οδηγεί σε σφάλματα εισάγοντας περαιτέρω αριθμητικό θόρυβο [30]. Επίσης, μικροί συντελεστές στη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου μπορούν, πολλαπλασιαζόμενοι με μικρές τιμές, να προκαλέσουν αριθμητική υποχείλιση. Συνεπώς, μπορεί να προκληθεί απόκλιση στην πραγματική απόκριση του φίλτρου σε σχέση με την επιθυμητή αλλά και πιθανή αστάθεια στη λειτουργία του. Οπότε, προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τον σχεδιασμό ώστε να μην προκληθεί αστάθεια ή σημαντική απόκλιση στη λειτουργία του φίλτρου, ιδιαίτερα για μεγάλες τάξεις αυτού και μικρή διαφορά ανάμεσα σε συχνότητα δειγματοληψίας και ήμισυς ισχύος. Δεδομένης της πολυπλοκότητας μιας γενικής ανάλυσης ευαισθησίας αλλά και της δυνατότητας προσομοίωσης που προσφέρει το MATLAB, επιλέγεται να ελεγχθεί τελικά η λειτουργικότητα του σχεδιασμένου φίλτρου μέσω πειράματος.

Παρά τα όσα αναφέρθηκαν, δε συζητήθηκε η καθυστέρηση φάσης που προκαλεί το φίλτρο επί των συνιστωσών διαφόρων συχνοτήτων του σήματος. Στην περίπτωση ενός φίλτρου *IR* λύση βρίσκεται φιλτράροντας το σήμα και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το φίλτρο χρονικά προς τα πίσω επί του φιλτραρισμένου σήματος [39], λαμβάνοντας ως έξοδο το πλέον επιθυμητό σήμα. Με αυτόν τον τρόπο εισάγονται δύο ίσες κατά μέτρο καθυστερήσεις φάσης αλλά με αντίθετα πρόσημα, οδηγώντας τελικά σε μηδενική καθυστέρηση φάσης [40]. Το αποτέλεσμα είναι να παραμείνει χρονικά απaráλλαχτο το σήμα. Το σύστημα στην περίπτωση αυτή ονομάζεται αιτιατό (*causal*), διότι οι μελλοντικές εισοδοί δεν επιδρούν επί της εξόδου του [28]. Ταυτόχρονα, το φίλτρο που προκύπτει συνολικά από την παραπάνω διαδικασία έχει δυο φορές μεγαλύτερη κλίση καμπύλης απόκρισης μεγέθους από το αντίστοιχο μεμονωμένο προς τα εμπρός και άρα, επί του πρακτέου, συμπεριφέρεται ως διπλάσιας τάξης από το τελευταίο [40]. Κατά συνέπεια, η τάξη n_b που απαιτείται από το προς σχεδιασμό φίλτρο σε μια τέτοια εφαρμογή, προκύπτει η μισή από αυτή που δίνεται μέσω της Σχέσης (3.3):

$$n_b = \frac{n}{2} \quad (3.11)$$

Σύμφωνα με το περίφημο θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon, η ακριβής αναπαράσταση των συνιστωσών του σήματος είναι δυνατή στο εύρος συχνοτήτων που έχει ως άνω όριο τη συχνότητα $f_{max} = f_s/2$ η οποία ονομάζεται και συχνότητα Nyquist [28],[30]. Ωστόσο,

προϋποτίθεται η χρήση ικανού αναλογικού φίλτρου αντί-αλλοίωσης (*anti-aliasing*) προ της ψηφιοποίησης του λαμβανόμενου από τους αισθητήρες σήματος [34], επί της ουσίας ενός χαμηλοπερατού φίλτρου ιδανικού με βάση τη νωρίτερα δοσμένη περιγραφή. Σε διαφορετική περίπτωση, οι φασματικές συνιστώσες του σήματος με συχνότητες μεγαλύτερες της f_{max} εμφανίζονται ως συνιστώσες με συχνότητα μικρότερη της τελευταίας. Επαναδιατυπώνοντας, η λειτουργία του ιδανικού χαμηλοπερατού φίλτρου συνοψίζεται από τη Σχέση (3.12):

$$H(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \leq \omega_c \\ 0, & \omega \geq \omega_c \end{cases} \quad (3.12)$$

Με άλλα λόγια, επιθυμείται η άμεση μετάβαση από τη ζώνη διέλευσης στην ζώνη αποκοπής, δηλαδή η καμπύλη απόκρισης μεγέθους να καθίσταται κάθετη στη συχνότητα αποκοπής («*brick-wall*») [30]. Εκτός όμως από το ότι τέτοια λειτουργία μπορεί μόνο να προσεγγισθεί, όπως θα δειχθεί παρακάτω, η αύξηση της ακρίβειας αυτής της προσέγγισης οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση του κόστους του φίλτρου αλλά και της δυσκολίας υλοποίησης. Προκειμένου να χαλαρωθούν οι απαιτήσεις που τίθενται για το αναλογικό φίλτρο, επιστρατεύεται η τεχνική της υπερδειγματοληψίας (*oversampling*), δηλαδή δειγματοληψία με συχνότητα μεγαλύτερη κατά ένα περιθώριο, του διπλάσιου του εύρους ζώνης συχνοτήτων που επιδιώκεται να αναπαρασταθεί μέσω της μέτρησης [41]. Λόγω της μη αμελητέας απόσβεσης σε ένα τμήμα της ζώνης διέλευσης, υφίσταται παραφθορά των συνιστωσών του σήματος με συχνότητα που εμπίπτει στο τμήμα αυτό και επί της ουσίας μείωση της συχνότητας Nyquist, αφού το τμήμα αυτό της πληροφορίας δεν αναπαρίσταται με ακρίβεια. Ταυτόχρονα, η ύπαρξη μεταβατικής ζώνης στην απόκριση του φίλτρου, συνεπάγεται αλλοίωση των τυχόντων συνιστωσών και συνεπώς την εμφάνιση τους σε συχνότητες μικρότερες της Nyquist διαφθείροντας το σήμα. Επομένως, μέσω της υπερδειγματοληψίας δύναται να μετακινηθεί η παραφθορά σε ένα τμήμα της πληροφορίας του σήματος που δεν ενδιαφέρει και το οποίο στη συνέχεια μπορεί να εξαλειφθεί με τη βοήθεια ενός ψηφιακού φίλτρου. Παράλληλα, εάν η συχνότητα δειγματοληψίας τεθεί μεγαλύτερη της μέγιστης που εκφράζει μια αμελητέα συνιστώσα του μετρούμενου σήματος, τότε αποφεύγεται η πρόκληση αλλοίωσης. Ο γενικός κανόνας που δίνεται στο [30], είναι η χρήση 5-10 φορές μεγαλύτερης συχνότητας δειγματοληψίας από το επιθυμητό εύρος ζώνης αναπαράστασης και εφαρμογή φίλτρου αντι-αλλοίωσης όπου έχουν σημασία η πληροφορίες σχετικές με το φάσμα συχνοτήτων.

3.3 Επιλογή Κατάλληλων Σχεδιαστικών Παραμέτρων για το Φίλτρο

Στη συνέχεια, η σχεδιαστική ανάλυση επικεντρώνεται στον στόχο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, τα εδώ μελετώμενα σύνολα μετρήσεων περιέχουν πληροφορίες στο κλειστό εύρος συχνοτήτων από 0 έως 100Hz, ενώ το φίλτρο μπορεί να σχεδιαστεί για συχνότητα αποκοπής ω_c ίση με θεωρητικά

οποιαδήποτε τιμή που να εμπίπτει στο ανοιχτό διάστημα που έχει ως όρια τα παραπάνω. Το φιλτράρισμα μέσω ενός ιδανικού φίλτρου θα είχε ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της περιεχόμενης πληροφορίας στο διάστημα από 0 έως f_c . Εάν ωστόσο αμεληθεί το γεγονός ότι το μέγεθος του δείγματος παραμένει ίδιο, τότε το αποτέλεσμα αυτό θα ισοδυναμεί με δειγματοληψία σε συχνότητα που σύμφωνα με το θεώρημα Shannon ισούται με το διπλάσιο της συχνότητας αποκοπής. Προκειμένου να προσδιοριστεί η συχνότητα αποκοπής που θα προσφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα, αναζητήθηκαν στη σχετική βιβλιογραφία πληροφορίες για την επιλογή συχνότητας δειγματοληψίας σε περίπτωση που επιχειρείται η μελέτη της οδηγικής συμπεριφοράς. Η προσοχή εστιάζεται στις μετρήσεις ταχύτητας και επιτάχυνσης που αποτελούν το κοινό στοιχείο με πολλές έρευνες, κυρίως όμως στις μετρήσεις επιτάχυνσης που αναμένεται να περιέχουν πληροφορίες σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Αναφέρεται ότι οι συχνότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν τους χειρισμούς του ανθρώπινου οδηγού είναι μικρές και κατά κόρον δεν ξεπερνούν τα $2Hz$ [42]. Εξαιρείται το λεγόμενο υπόλειμμα του οδηγού (*driver remnant*) που σχετίζεται με την έλλειψη απόλυτα γραμμικής σχέσης μεταξύ χειρισμών οδηγού και συστήματος διεύθυνσης, το οποίο όμως σε περίπτωση οχήματος ικανών χαρακτηριστικών βρίσκεται μικρό και μπορεί να αμεληθεί [43]. Ωστόσο, στο [44] αξιοποιώντας, μεταξύ άλλων, μετρήσεις επιτάχυνσης με συχνότητα δειγματοληψίας $100Hz$, θεωρήθηκε με επιτυχία πως τα κρίσιμα για την οδηγική ασφάλεια περιστατικά με βάση την επιτάχυνση, οφείλονται σε χειρισμούς του οδηγού σε συχνότητες πέραν των $3Hz$. Στο [45] γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης του ποσοστού απώλειας πληροφορίας σχετικής με την οδηγική συμπεριφορά που επιφέρει η χρήση μικρότερης συχνότητας δειγματοληψίας, με βάση την ταχύτητα το μέγεθος της απώλειας δε βρέθηκε να ξεπερνά το 1% για μείωση από $20Hz$ έως $4Hz$. Σε άλλες μελέτες οδηγικής συμπεριφοράς όπου χρησιμοποιήθηκε σύστημα απόκτησης δεδομένων προοριζόμενο για έρευνα, λαμβάνονται συχνότητες δειγματοληψίας που ξεκινούν από $1Hz$ και συχνά ξεπερνούν τα $10Hz$ [46]. Παρόλα αυτά, αναζητούνται πληροφορίες σε μελέτες οδηγικής συμπεριφοράς διαφόρων τύπων οχημάτων όπου χρησιμοποιήθηκαν και άλλα μέσα απόκτησης μετρήσεων, όπως για παράδειγμα ευφυή κινητά (*smartphones*) αλλά και διαφορετικές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση ή κατηγοριοποίηση της οδηγικής συμπεριφορά, ακολούθως παρατίθενται μερικά παραδείγματα ερευνών από τις οποίες απουσιάζουν αναφορές σε φιλτράρισμα. Αναφέρεται πως στο [47] χρησιμοποιήθηκε συχνότητα δειγματοληψίας $1Hz$, στο [48] λήφθηκαν ίσες με $5Hz$, στα [49], [50] με $10Hz$ και στο [51] $20Hz$ αντίστοιχα. Πρόσθετα, παραδείγματα μελετών με χρήση χαμηλοπερατού φίλτρου είναι το [52] με χρήση συχνότητας δειγματοληψίας $5Hz$, τα [53], [54] με $10Hz$, τα [55], [56] με $20Hz$, το [57] με $100Hz$ και το [17] με $140Hz$ αντίστοιχα. Όμως, η συχνότητα δειγματοληψίας γενικά σε τέτοιες έρευνες μπορεί να περιοριστεί από τη διαθέσιμη μνήμη, υπολογιστική ισχύ αλλά και την ταχύτητα εκτέλεσης που σε περιπτώσεις απαιτείται από τον αλγόριθμο επεξεργασίας των μετρήσεων. Ταυτόχρονα, σε περιπτώσεις όπου επιδιώκεται η άμεση ή πραγματικού χρόνου (*real-time*) επεξεργασία των

μετρήσεων σε μέσο που βρίσκεται εκτός οχήματος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταβίβαση των μετρήσεων αλλά και το κόστος που αυτή επιφέρει [17]. Ανεξαρτήτως, τα τεράστια μεγέθη δεδομένων που συνεπάγεται η χρήση μεγάλης συχνότητας δειγματοληψίας σε τέτοιες έρευνες, απαιτούν σημαντικό χρόνο και πόρους για την μεταφορά και επεξεργασία τους. Το παραπάνω τονίζεται και λαμβάνεται υπόψιν κατά την ερμηνεία των επιλογών συχνοτήτων δειγματοληψίας και φιλτραρίσματος των διάφορων σχετικών εργασιών στη βιβλιογραφία.

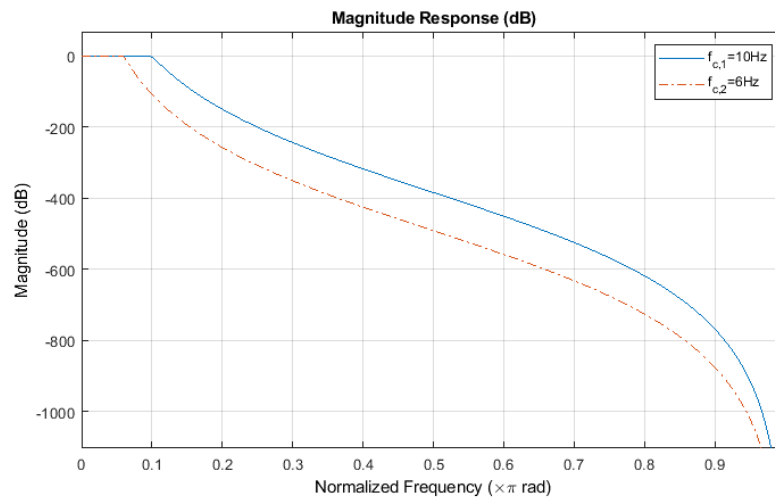
Μολαταύτα, δεδομένης της συσχέτισης του παφλασμού του μεταφερόμενου υγρού επί των τοιχωμάτων του βυτίου με την οδηγική ασφάλεια, οφείλεται να εξασφαλισθεί πως οι μετρήσεις των επιταχυνσιομέτρων και επιμηκυνσιομέτρων στην περιφέρεια της δεξαμενής θα καλύπτουν το εύρος συχνοτήτων εντός του οποίου κυρίως εκδηλώνεται το φαινόμενο. Το προηγούμενο, γίνεται εντονότερο όποτε οι συχνότητες των διεγέρσεων βρίσκονται πλησιέστερα στις φυσικές συχνότητες παφλασμού για το συγκεκριμένο ρευστό αλλά και τη μορφή και διάταξη της δεξαμενής [7]. Ωστόσο, σύμφωνα με έρευνα που έγινε σε τετραγωνικά βυτία [58], η σημαντικότερη είναι η πρώτη από τη σειρά των φυσικών συχνοτήτων διότι στις επόμενες, το φαινόμενο είναι ασθενέστερο. Εν ολίγοις, συνήθως θεωρείται ως συχνότητα παφλασμού η συχνότητα διέγερσης για την οποία γίνεται εντονότερο το φαινόμενο [59]. Στο [60] υπολογίσθηκαν οι συχνότητες παφλασμού, για διαφορετικές μορφές και επίπεδα πλήρωσης με νερό, δεξαμενών βυτιοφόρων οχημάτων και η μέγιστη που υπολογίσθηκε δε ξεπέρασε τα $6Hz$, ενώ για 20% πλήρωση δεν ξεπέρασε τα $4Hz$. Επομένως, δεδομένου ότι η παρατήρηση αυτή βρίσκεται σύμφωνη με τη σχετική βιβλιογραφία, θεωρήθηκε πως η θέσπιση μιας συχνότητας δειγματοληψίας τουλάχιστον ίσης με $6Hz$, είναι ικανή για την αποκόμιση πληροφοριών σχετικά με το παφλασμό.

Με βάση λοιπόν τα προηγούμενα σχεδιάζεται το καθορισμένο φίλτρο για δυο διαφορετικές συχνότητες αποκοπής ίσες με $10Hz$ και $6Hz$ αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψιν τις δυσχέρειες στην υλοποίηση ενός ευσταθούς και αιτιατού φίλτρου με υψηλή τάξη, τίθενται λογικές απαιτήσεις για τις άλλες δυο σχεδιαστικές παραμέτρους που μέσω της σχέσης μ καθορίζουν την τάξη αυτή. Επιλέγονται συχνότητες ζώνης αποκοπής ίσες με $10.5Hz$ και $6.3Hz$ αντίστοιχα, ενώ κοινά απαιτείται να επιτυγχάνεται σε αυτές απόσβεση ίση με $-20dB$ η οποία ισοδυναμεί με μείωση ισχύος κατά 99%. Επειδή όμως ο αριθμός των πόλων πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός, η τιμή της απαιτούμενης τάξης στρογγυλοποιείται αναγκαία προς τα πάνω και προκύπτει ίση με $n = 24$. Σημειώνεται πως η παραπάνω πράξη οδηγεί πρακτικά σε υπερεπίτευξη των στόχων του σχεδιασμού, αφού το σημείο έναρξης της ζώνης διακοπής μετατοπίζεται προς τη συχνότητα ήμισυς ισχύος. Εντούτοις, η απόκριση μεγέθους ή αλλιώς συνάρτηση μεταφοράς του πρότυπου φίλτρου, κατασκευάζεται συναρτήσει των πόλων του οι οποίοι με προκύπτουν ως οι τιμές που δίνει η Σχέση (3.5) με αρνητικό πραγματικό μέρος, ως εξής:

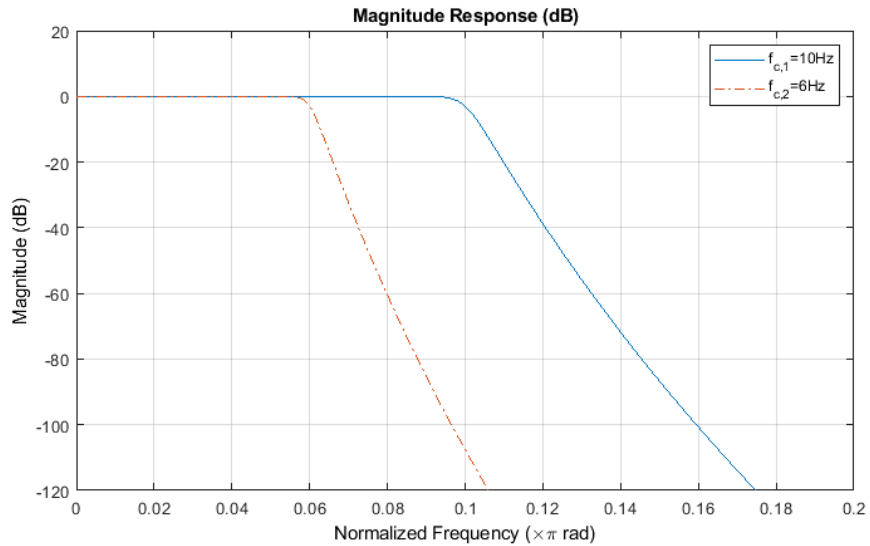
$$H(s) = \sum_{i=1}^n (s - s_{p,i})^{-1} \quad (3.13)$$

3.4 Υλοποίηση του Φίλτρου

Ακολούθως, εκτελείται ο διγραμμικός μετασχηματισμός της συνάρτησης που προκύπτει από τη Σχέση (3.13) για τις δυο διαφορετικές συχνότητες αποκοπής. Οι υπολογισμοί γίνονται μέσω του MATLAB και οι καμπύλες κέρδους των σχεδιασμένων ψηφιακών φίλτρων απεικονίζονται στο Σχήμα 3-2 συναρτήσει της κανονικοποιημένης κυκλικής συχνότητας. Οι καμπύλες που λαμβάνονται, πράγματι έχουν την αναμενόμενη μορφή, για ευκρίνεια παρουσιάζεται μεγεθυμένο το διάγραμμα επί της περιοχής ενδιαφέροντος, στο Σχήμα 3-3. Υπενθυμίζεται πως για την εκπλήρωση της προδιαγραφής απόσβεσης που τέθηκε κατά τον σχεδιασμό, λαμβάνεται υπόψιν το γεγονός πως η μέθοδος χρήσης του φίλτρου που επιδιώκεται ώστε να μην εισαχθεί στο σήμα καθυστέρηση φάσης, οδηγεί σε διπλάσια κλίση της καμπύλης μεγέθους απόκρισης.



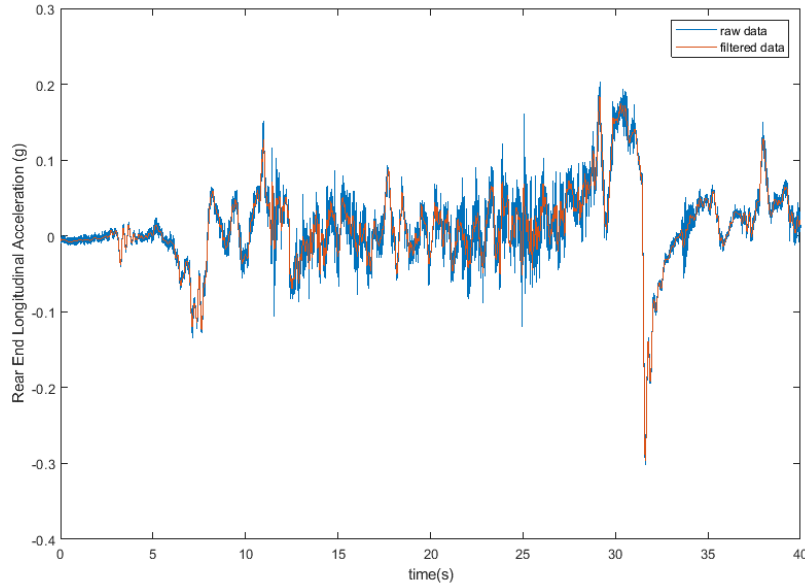
Σχήμα 3-2: Καμπύλες μεγέθους απόκρισης των σχεδιασμένων φίλτρων για $f_{c,1} = 10\text{Hz}$ και $f_{c,2} = 6\text{Hz}$



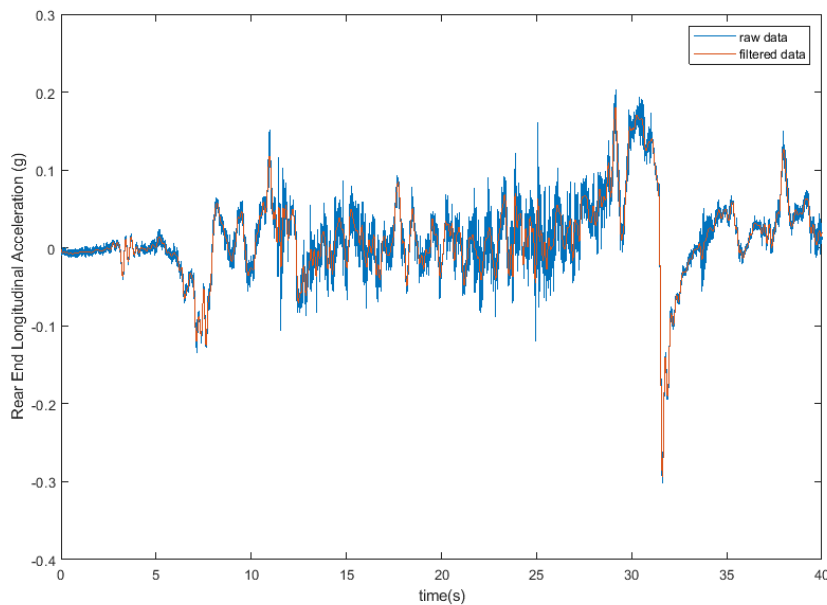
Σχήμα 3-3: Διάγραμμα προηγούμενου σχήματος (Σχήμα 3-2) μεγεθυμένο στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων

3.5 Φιλτράρισμα Μετρήσεων και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Έχοντας πλέον σχεδιάσει και υλοποιήσει τα φίλτρα, ελέγχεται η ευστάθεια και αιτιότητα τους δοκιμάζοντας τα σε ένα δείγμα μετρήσεων επιτάχυνσης από το διαθέσιμο σύνολο. Συγκεκριμένα, επιδέχεται φιλτράρισμα ένα σύνολο μετρήσεων διαμήκους επιτάχυνσης από το οπίσθιο άκρο της δεξαμενής του οχήματος και στη συνέχεια συγκρίνεται το αποτέλεσμα με την αρχική χρονοσειρά προκειμένου να αξιολογηθεί η διαδικασία. Αναφέρεται, επίσης, πως το δείγμα μετρήσεων λαμβάνεται από μια μεν σύντομη αλλά περιεκτική δε σε χειρισμούς διαδρομή, έστω η #1, με το όχημα V2 υπό ύπαρξη φορτίου στη δεξαμενή. Οι έξοδοι αμφότερων των φίλτρων και οι αρχικές μετρήσεις, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-4 και Σχήμα 3-5 αντίστοιχα, τα διαγράμματα περιορίζονται σε ένα χρονικό διάστημα 40sec από την αρχή της μέτρησης ώστε να παρουσιαστούν με ευκρίνεια.



Σχήμα 3-4: Αρχικές και φιλτραρισμένες μετρήσεις διαμήκουσ επιτάχυνσης με συχνότητα αποκοπής $f_{c,1} = 10\text{Hz}$



Σχήμα 3-5: Αρχικές και φιλτραρισμένες μετρήσεις διαμήκουσ επιτάχυνσης με συχνότητα αποκοπής $f_{c,2} = 6\text{Hz}$

Στο αρχικό τμήμα της χρονοσειράς, όπου το όχημα βρίσκεται ακίνητο, παρατηρείται η ύπαρξη θορύβου στο μετρούμενο σήμα με μορφή ταλαντώσεων μικρών περιόδων ή ισοδύναμα υψηλών συχνοτήτων. Επομένως, με απλή παρατήρηση των χρονοσειρών γίνεται φανερό πως ο θόρυβος είναι πράγματι υψίσυχνος όπως αναμενόταν, γεγονός που επιβεβαιώνει η επιτυχημένη αφαίρεση του μέσω της εφαρμοζόμενης διαδικασίας φιλτραρίσματος. Η τελευταία οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία είναι λογικά ερμηνεύσιμα και προσδοκώμενα με απουσία ανωμαλιών και επιβεβαιωμένη εξουδετέρωση της εισαγόμενης καθυστέρησης φάσης μέσω της νωρίτερα

περιγραφείσας διαδικασίας αντιστάθμισης. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των φιλτραρισμένων χρονοσειρών εμφανίζεται ελάχιστη, ενώ οπτικά φαίνεται πως η καμπύλη αντιστοιχούσα στη χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής παρουσιάζει μεγαλύτερη λειότητα. Ταυτόχρονα, παρατηρώντας σχολαστικά τις τελικές χρονοσειρές σε συνδυασμό με το διαθέσιμο οπτικό υλικό της διαδρομής, συμπεραίνεται πως δεν χάνεται σημαντικό ποσοστό της πληροφορίας που σχετίζεται με τους χειρισμούς του οδηγού. Τα περιστατικά επιτάχυνσης και πέδησης της διαδρομής πράγματι αποτυπώνονται από τις χρονοσειρές. Για παράδειγμα, λίγο μετά τα 30 δευτερόλεπτα από την έναρξη της μέτρησης, εκτελείται σχετικά απότομη πέδηση μέχρι ακινητοποίησης της οποίας η αντίστοιχη κορυφή του μετρητικού σήματος παραμένει σχεδόν अपαράλλαχτη. Οι ακραίες τιμές επιβράδυνσης που μετρήθηκαν κατά την εξέλιξη του συμβάντος εμφανώς παραμένουν ύστερα από το φιλτράρισμα και παράλληλα βρίσκονται αντιπροσωπευτικές των συνεπειών που επέφερε επί της δυναμικής απόκρισης του οχήματος ο χειρισμός του οδηγού. Ταυτόχρονα, ακριβώς πριν την πέδηση υπήρξε φάση επιτάχυνσης για την οποία επεκτείνονται με αντίστοιχο τρόπο τα προηγούμενα συμπεράσματα. Επομένως, οι φιλτραρισμένες μετρήσεις κρίνονται κατάλληλες για την παραμετρική αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς που εκδηλώνει ο ανθρώπινος χειριστής κατά τα χαρακτηριστικά της οδήγησης περιστατικά αυτά. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-1) παρουσιάζονται χαρακτηριστικά μεγέθη των δειγμάτων, συγκεκριμένα η μέγιστη και ελάχιστη τιμή, η μέση τιμή, η μέση τετραγωνική ρίζα (*RMS*) καθώς και η διακύμανση (*variance*) του αρχικού αλλά και των δυο τροποποιημένων συνόλων μετρήσεων.

Χαρακτηριστικό Μέγεθος	Αρχικό Δείγμα	Φιλτραρισμένο $f_{c,1} = 10\text{Hz}$	Φιλτραρισμένο $f_{c,2} = 6\text{Hz}$
Μέγιστη τιμή [g]	0.2029	0.1845	0.1805
Ελάχιστη τιμή [g]	-0.3014	-0.2957	-0.2941
Μέση τιμή [g]	-7.7127e-04	-7.7093e-04	-7.6801e-04
RMS [g RMS]	5.0071e-02	4.7330e-02	4.7101e-02
Διακύμανση [g²]	2.5067e-03	2.2397e-03	2.2181e-03

Πίνακας 3-1: Σύγκριση χαρακτηριστικών μεγεθών των αρχικών και φιλτραρισμένων μετρήσεων

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα που αποδίδουν τα δύο σχεδιασμένα φίλτρα είναι οριακά πανομοιότυπα, ωστόσο η μικρότερη συχνότητα αποκοπής φαίνεται να οδηγεί σε χρονοσειρά περισσότερη ευνοϊκή προς ανάγνωση από τον ερευνητή. Επιπρόσθετα, δεδομένων και των συχνοτήτων που προηγούμενα κρίθηκαν ως ριζικές για τη μελέτη της οδηγικής συμπεριφοράς, η

επιλογή συχνότητας αποκοπής ίσης με $6Hz$ βρίσκεται ικανοποιητική για την επικείμενη ανάλυση. Μάλιστα, η επιλογή αυτή κρίνεται αρκετά συντηρητική αφήνοντας ένα σημαντικό περιθώριο στο εύρος ζώνης ανάλυσης αφού το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε χαμηλότερες των $5Hz$ συχνότητες. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση λοιπόν, η συχνότητα αποκοπής αυτή κρίνεται καταλληλότερη από την άλλη δοκιμασθείσα και επομένως θεσπίζεται η χρήση της στη συνέχεια. Παρόλα αυτά, η επιτυχής έκβαση της διαδικασίας για το σύνολο μετρήσεων της συγκεκριμένης διαδρομής και αισθητήρα δεν εγγυάται την επέκταση των αποτελεσμάτων στα υπόλοιπα πειραματικά δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές διαδρομές ή/και αισθητήρες. Ταυτόχρονα, πάρα τα λεγόμενα, εκτός του θορύβου δεν αποκλείεται να αφαιρέθηκαν από το σήμα συνιστώσες με σημαντικές πληροφορίες. Εξ αυτού το ενδιαφέρον στρέφεται γύρω από τη διερεύνηση της δυνατότητας απομόνωσης και απεικόνισης των συνιστωσών του μετρούμενου σήματος που βρίσκονται σε ένα καθορισμένο εύρος συχνοτήτων, προκειμένου να αποπειραθεί ο προσδιορισμός του παράγοντα ο οποίος ευθύνεται για την εμφάνιση τους και να δικαιολογηθεί η αφαίρεση τους. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσεται η μεθοδολογία σχεδιασμού μεσοπερατών (*bandpass*) *IIR* φίλτρων τύπου Butterworth, όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Μολαταύτα, η σάρωση όλου του εύρους συχνοτήτων και η απομόνωση τμημάτων με οποιαδήποτε μεθοδολογία θα απόβαινε χαοτική και επομένως πρέπει πρώτα να ευρεθούν οι περιοχές συχνοτήτων στις οποίες το σήμα παρουσιάζει αισθητή συγκέντρωση ισχύος, ώστε να εφαρμοστεί η διαδικασία επί αυτών. Προκειμένου λοιπόν να ευρεθούν οι συχνότητες όπου το σήμα παρουσιάζει σημαντικές αιχμές, στην επόμενη ενότητα θα επιχειρηθεί η αναπαράσταση των μετρήσεων στο πεδίο συχνοτήτων με τη μεθοδολογία που εκεί θα παρουσιασθεί.

Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Μετρήσεων στο Πεδίο Συχνότητας

Στο κεφάλαιο αυτό αναζητείται ένας τρόπος αναπαράστασης των μετρήσεων στο πεδίο της συχνότητας. Οι τελευταίες αποτελούνται κατά κόρον από μη επαναλαμβανόμενα σήματα με μεταβατικό χαρακτήρα. Δεδομένης αυτής της πληροφορίας, η βιβλιογραφία υποδεικνύει τον λεγόμενο μετασχηματισμό Fourier (*Fourier Transform*) ως κατάλληλο για την αναπαράσταση. Με τον όρο αυτό αναφέρεται η διαδικασία του μετασχηματισμού αλλά και η ίδια η αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας. Λαμβάνοντας υπόψιν τη διακριτή φύση των μετρήσεων, επιλέγεται τελικά να χρησιμοποιηθεί ο διακριτός μετασχηματισμός που παρουσιάζεται ακολούθως.

4.1 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier

Προκειμένου να αναπαρασταθούν οι χρονοσειρές των μετρήσεων στο πεδίο της συχνότητας εκτελείται ο λεγόμενος διακριτός μετασχηματισμός Fourier (*DFT*) του σήματος τους [27]. Μέσω του τελευταίου δύναται να απεικονισθεί μια πεπερασμένη ακολουθία μετρήσεων ενός δείγματος από μια μιγαδική σειρά ίσου πλήθους όρων με το μήκος N της ακολουθίας. Η σειρά αυτή, ονομαζόμενη διακριτή σειρά Fourier, επί της ουσίας αποτελεί το άθροισμα N αρμονικά σχετισμένων μιγαδικών εκθετικών ακολουθιών, ή υπό διαφορετική διατύπωση εκθετικών όρων με συχνότητες μεταβολής ακέραια πολλαπλάσιες της αντίστοιχης θεμελιώδους $2\pi/N$ [34]. Πάντως, το σύνολο των επεξεργαζόμενων μετρήσεων απεικονίζεται μέσω της παραπάνω σειράς όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}km} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}km\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N}km\right) \right] \quad (4.1)$$

Όπου οι συντελεστές της παραπάνω σχέσης υπολογίζονται ως εξής:

$$X_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}km} \quad (4.2)$$

Στην τελευταία ισότητα της Σχέσης (4.1) έγινε η αντικατάσταση του τύπου του Euler, έτσι λοιπόν καθίσταται φανερό πως οι συντελεστές (4.2) της διακριτής σειράς Fourier είναι γενικά μιγαδικοί αριθμοί. Παρόλα αυτά, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier αποτελεί περίπλοκο αντικείμενο του πεδίου των μαθηματικών και στο παρόν θα συζητηθούν μόνο λεπτομέρειες που αφορούν στην αποτελεσματική εφαρμογή του. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στο [61] για περισσότερες πληροφορίες περί αυτού.

4.2 Αλγόριθμος Ταχύ Μετασχηματισμού Fourier

Στο σύνολο της σχετικής βιβλιογραφίας έχει αναπτυχθεί και προταθεί πληθώρα διαφορετικών αλγορίθμων υπολογισμού του *DFT* ενός σήματος. Μια αποδοτική κατηγορία αλγορίθμων για τον υπολογισμό του τελευταίου συνιστά η οικογένεια των αλγορίθμων ταχέων μετασχηματισμών Fourier (*FFT*) [34]. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό από την ονομασία, οι αλγόριθμοι αυτοί εκτελούν το μετασχηματισμό *DFT* ταχέως μειώνοντας δραματικά των χρόνο υπολογισμού που απαιτείται [28]. Παρακάτω, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος *FFTW* που υιοθετείται από το MATLAB και ο οποίος βασίζεται στον περίφημο αλγόριθμο των Cooley-Tukey [62]. Κατά συνέπεια, η επικείμενη ανάλυση θα επικεντρωθεί στις ιδιαιτερότητες του αλγορίθμου αυτού. Επί τούτου, το ελάχιστο απαιτούμενο από το μετασχηματισμό πλήθος όρων ή σημείων είναι ίσο με το πλήθος του δείγματος, αφού αν επιλεγθεί μικρότερο απορρίπτεται το πλεονάζον τμήμα του σήματος. Ωστόσο, για να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός με περισσότερα σημεία από το μέγεθος του δείγματος, το τελευταίο αυξάνεται με την πρόσθεση ισόποσων με τη διαφορά μηδενικών στο τέλος της χρονοσειράς (*zero-padding*). Παρά όμως τη δυνατότητα λειτουργίας για σχεδόν οποιοδήποτε πλήθος σημείων που προσφέρει ο εδώ χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος, η ταχύτητα εκτέλεσης του διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την επιλογή αυτή. Συνοπτικά αναφέρεται πως η αρχιτεκτονική του αλγορίθμου τον καθιστά να ευνοείται από τη χρήση πλήθους σημείων ίσου με μια δύναμη του 2, μειώνοντας με αυτή την επιλογή σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης του. Το γεγονός αυτό έγκειται στη δυνατότητα του αλγορίθμου [63] να διαχωρίσει τον μετασχηματισμό σε δύο τμήματα, ένα για τους περιττούς δείκτες και ένα για του άρτιους, ουσιαστικά μειώνοντας τους απαιτούμενος υπολογισμούς. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο [64]. Σε αυτή την περίπτωση, η πολυπλοκότητα των υπολογισμών μειώνεται από $O(N^2)$ σε $O(N \log_2 N)$ με τον αλγόριθμο FFT να εφαρμόζει διαίρεση στο χρόνο (*decimation-in-time*) τύπου RADIX-2 [61]. Φυσικά, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μεθοδολογίες και προγραμματιστικά «κόλπα» για την ταχύτερη εκτέλεση του μετασχηματισμού, ωστόσο η ανάλυση αυτή ξεφεύγει από τα πλαίσια του παρόντος. Εξάλλου, η αναπαράσταση στο πεδίο συχνότητας επιδιώκεται μονάχα για την εξακρίβωση της ορθής έκβασης του φιλτραρίσματος και για την εξοικείωση με τη φύση των μετρήσεων. Επομένως, αποκλείεται στο παρόν η χρήση του μετασχηματισμού στα πλαίσια κάποιου σχήματος άμεσης κατηγοριοποίησης της οδηγικής συμπεριφοράς όπου ο χρόνος εκτέλεσης θα ήταν ριζικής σημασίας.

Μολαταύτα, ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται για πλήθος σημείων ίσο με την αμέσως μεγαλύτερη από το μήκος του δείγματος δύναμη του 2, ώστε η ροή της ανάλυσης να μην επιβαρύνεται σημαντικά από την ταχύτητα υπολογισμού και ουσιαστικά από το μέγεθος του δείγματος. Η ευκρίνεια ή ανάλυση που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος *FFT* εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα δειγματοληψίας με την οποία προέκυψε το δείγμα αλλά και το μέγεθος του όπως γίνεται φανερό από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{ra} = \frac{f_s}{N} \quad (4.3)$$

Η τεχνική *zero-padding* δεν οδηγεί σε ουσιαστική βελτίωση της ανάλυσης, αλλά προκαλεί την ψευδαίσθηση ότι βελτιώνεται η ανάλυση, αφού εν τέλει αυξάνονται τα σημεία που απεικονίζουν τις μετρήσεις στο πεδίο της συχνότητας [30]. Η φαινόμενη ευκρίνεια δίνεται από τη Σχέση (4.4) παρακάτω, όπου N_F Ο αριθμός σημείων DFT:

$$f_{rp} = \frac{f_s}{N_F} \quad (4.4)$$

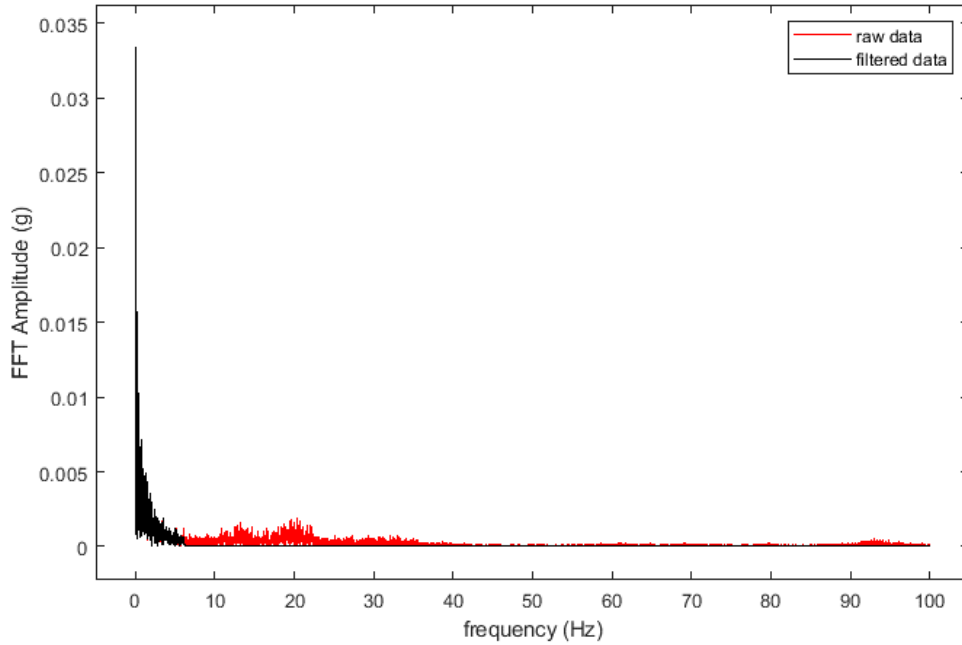
Από τη Σχέση (4.3) γίνεται αντιληπτό πως η πραγματική ευκρίνεια της αναπαράστασης αυξάνεται με το πλήθος του δείγματος και άρα η ανάλυση μεγαλύτερων συνόλων μετρήσεων καθιστά την αναπαράσταση περισσότερο αντιπροσωπευτική. Δεδομένων των αναφερθέντων, ο αλγόριθμος *FFT* κρίνεται εύλογο να εφαρμοστεί για ολόκληρα τα διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή φασματική ευκρίνεια.

Εντούτοις, ο αλγόριθμος *FFT* έχει ως έξοδο τους συντελεστές που αντιστοιχούν στις συχνότητες από $-f_s$ έως f_s βάσει πάντα της διακριτοποίησης, επομένως δύναται άμεσα να υπολογιστεί το μέτρο τους, δηλαδή το δίπλευρο φάσμα πλάτους του μετασχηματισμένου σήματος. Για να ληφθεί το μονόπλευρο φάσμα πλάτους, δηλαδή από 0 έως f_s , ακολουθούνται οι οδηγίες του [65]. Τελικά, με αυτήν τη διαδικασία λαμβάνονται για το σχεδιασμό του διαγράμματος $N_F/2 + 1$ σημεία διατεταγμένα ομοιόμορφα κατά απόσταση ίση με f_{rp} όπου N_F ο αριθμός των σημείων του μετασχηματισμού. Το κάθε σημείο στο φάσμα πλάτους έχει τετμημένη την προκύπτουσα από τη διακριτοποίηση συχνότητα. Ταυτόχρονα, η τεταγμένη του κάθε σημείου αποτελεί το μέτρο των μεταβολών που διεξάγονται σε ένα εύρος ζώνης f_{rp} με κεντρική συχνότητα την τετμημένη. Συγκεκριμένα, το πρώτο σημείο έχει τετμημένη ίση με 0 και τεταγμένη ίση με το μέτρο των μεταβολών στο εύρος συχνοτήτων από 0 έως $f_{rp}/2$, το δεύτερο έχει αντίστοιχα το f_s/N_F περιέχοντας πληροφορίες για το διάστημα από $f_{rp}/2$ έως $3f_{rp}/2$ και ούτω καθεξής. Επίσης, μέσω αυτής της αναπαράστασης γίνεται φανερή η κατανομή του σήματος στο εύρος συχνοτήτων. Ωστόσο, για μεγάλη φασματική ευκρίνεια το μέτρο των μεταβολών κατανέμεται σε πολλά σημεία (συχνότητες) με αποτέλεσμα να μη λαμβάνεται άμεσα ερμηνεύσιμη εικόνα για το ίδιο το μέγεθος αυτό. Τοιουτοτρόπως, παρέχονται οι απαραίτητες βάσεις για την ανάγνωση του διαγράμματος και την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων.

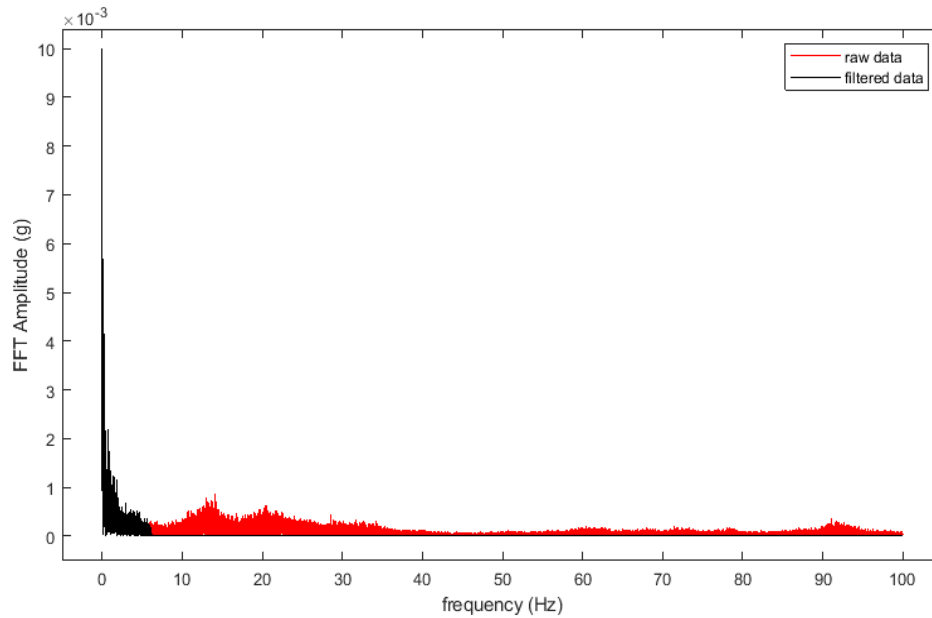
4.3 Μετασχηματισμός Μετρήσεων & Έλεγχος Ορθότητας Επιλογής Φίλτρου

Στη συνέχεια, εκτελείται ο αλγόριθμος για τη λήψη του φάσματος πλάτους των μετρήσεων επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και ενός δείγματος σημαντικά μεγαλύτερου μήκους που προέκυψε για την ίδια πειραματική διάταξη σε μία διαδρομή η οποία

για ευκολία αναφοράς καλείται #2. Τα φάσματα τους σχεδιάζονται και τελικά απεικονίζονται στο Σχήμα 4-1 και στο Σχήμα 4-2 αντίστοιχα. Αναφέρεται, επίσης, πως η χρονική διάρκεια λήψης μετρήσεων για την πειραματική διαδρομή #1 ισούται με περίπου 80 sec, ενώ της διαδρομής #2 με 650 sec αντίστοιχα.



Σχήμα 4-1: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους μέτρησης διαμήκους επιτάχυνσης στο οπίσθιο άκρο του βυτίου (#1)

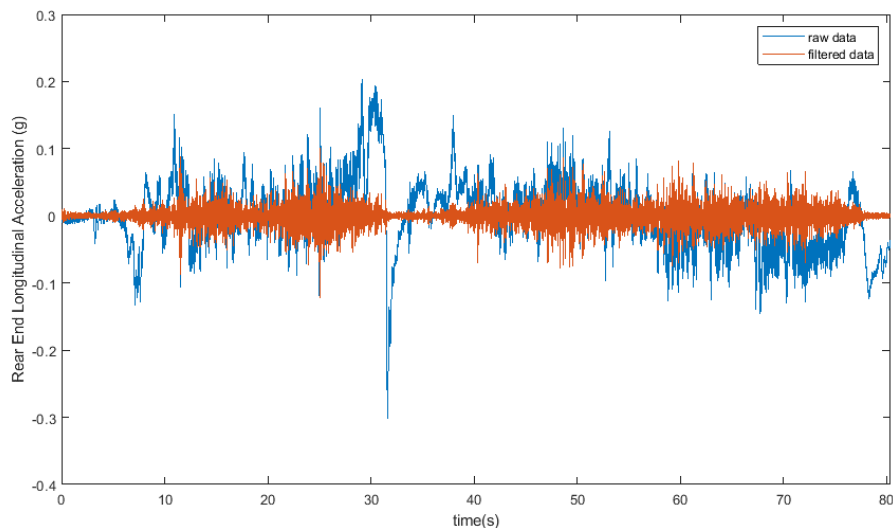


Σχήμα 4-2: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους μέτρησης διαμήκους επιτάχυνσης στο οπίσθιο άκρο του βυτίου (#2)

Από τα προηγούμενα σχήματα, διαπιστώνεται καταρχήν πως το μεγαλύτερο ποσοστό της μεταβολής που υφίσταται το μέτρο του σήματος, διαδραματίζεται σε πολύ χαμηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του συνόλου της διαδρομής #1 το 78.75% του μέτρου μεταβολής εντοπίζεται σε συχνότητες μικρότερες των 3Hz, ενώ στην περίπτωση της #2 το 77.25%, αντίστοιχα. Ωστόσο, για μακρύτερο δείγμα το σχεδιαζόμενο φάσμα λαμβάνεται περισσότερο ευανάγνωστο, ιδιαίτερα σε ότι αφορά τις συχνότητες εκτός του παραπάνω εύρους. Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση περισσότερων σημείων για τον *DFT* και επομένως για τον υπολογισμό του φάσματος, προκαλεί την κατανομή του μέτρου σε περισσότερες συχνότητες ή καλύτερα κλάσεις συχνοτήτων. Κατά συνέπεια, επηρεάζεται σημαντικά η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων όπου η συγκέντρωση είναι εξαιρετικά πυκνή. Εν τέλει, το αποτέλεσμα είναι να αναδεικνύονται καλύτερα οι μεταβολές που γίνονται σε υψηλές συχνότητες. Εξ αυτών, επιλέγεται να μελετηθούν παρακάτω τα μετρούμενα μεγέθη μέσω μετασχηματισμού των μεγαλύτερων διαθέσιμων δειγμάτων μετρήσεων ώστε να μεγιστοποιηθεί η φασματική ευκρίνεια και να διευκολυνθεί η εξαγωγή συμπερασμάτων. Ανεξαρτήτως, παρατηρώντας τα αμφότερα τα σχήματα εξακριβώνεται η ορθή λειτουργία του χαμηλοπερατού φίλτρου που σχεδιάστηκε νωρίτερα. Γίνεται φανερό πως οι συνιστώσες του σήματος που μεταβάλλονται με συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας αποκοπής της ζώνης αποκοπής, η οποία υπενθυμίζεται πως τέθηκε ίση με 6.3Hz, πράγματι καθίστανται αμελητέες μέσω του φιλτραρίσματος. Ταυτόχρονα, όσον αφορά το συνολικό μέτρο των συνιστωσών που αντιστοιχούν σε συχνότητες μικρότερες αυτής της αποκοπής ή ήμισυς ισχύος (6Hz), αυτό διατηρείται κατόπιν του φιλτραρίσματος και στις δυο περιπτώσεις σε ποσοστό μεγαλύτερο του 99.999%. Συνεπώς, η εξασθένιση του σήματος που προκαλεί το φίλτρο σε συχνότητες μικρότερες της αποκοπής, βρίσκεται αμελητέα όπως εξάλλου απαιτήθηκε κατά το σχεδιασμό του τελευταίου. Βάσει λοιπόν των προηγούμενων παρατηρήσεων, το χαμηλοπερατό φίλτρο που σχεδιάστηκε διαπιστώνεται πως εκπληρώνει τις απαιτήσεις που τέθηκαν και άρα κρίνεται ως κατάλληλο για χρήση στην επικείμενη ανάλυση.

Όσον αφορά το φασματικό περιεχόμενο του μετρούμενου σήματος, παρατηρείται ότι στο αρχικό σήμα υπάρχει σημαντική συγκέντρωση ισχύος σε συχνότητες ενδιάμεσα στην αποκοπή 6Hz και στα 40Hz χονδρικά, η οποία εν τέλει εξαλείφεται μέσω του φιλτραρίσματος. Παρόλα αυτά, αξίζει να διερευνηθεί η φύση της μεταβολής του σήματος σε αυτό το εύρος συχνοτήτων προκειμένου να δικαιολογηθεί η αφαίρεση αυτής της πληροφορίας από τις μετρήσεις. Για τον σκοπό αυτό, στο υπό μελέτη δείγμα απομονώνεται το τμήμα του σήματος που εμπίπτει στην προηγούμενη ζώνη με τη χρήση μεσοπερατού φίλτρου. Το φίλτρο σχεδιάζεται μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα και κυρίως στο τέλος της. Μολαταύτα, η φιλτραρισμένη χρονοσειρά απεικονίζεται στο Σχήμα 4-3 σε αντιπαράθεση με την αρχική αντίστοιχη. Από την πρώτη καμπύλη καθίσταται φανερό ότι οι μεταβολές στο μελετώμενο εύρος εκδηλώνονται συνολικά ως ταλαντώσεις του σήματος με μέση τιμή ίση ή οριακά ίση με μηδέν. Παρατηρώντας το διάγραμμα σε συνδυασμό με τη μαγνητοσκόπηση της

διαδρομής, γίνεται αντιληπτό ότι οι ταλαντώσεις αυτές είναι κατά κόρον σταθερές και διαφοροποιούνται όταν το όχημα βρίσκεται εν κίνηση, ιδιαίτερα όποτε το διασχιζόμενο οδόστρωμα προκαλεί κραδασμούς. Σε έρευνες κραδασμών φορτηγών μεταφοράς εμπορευμάτων στην Ινδία και στη Νότια Κορέα, το εύρος συχνοτήτων 15Hz έως 20Hz βρέθηκε να αντιστοιχεί στην απόκριση των ελαστικών και το εύρος από 40Hz έως 55Hz στην απόκριση της κατασκευής (δομική) του οχήματος [19]. Ταυτόχρονα, τα παραπάνω συμπεράσματα παρεκτείνονται στο διάστημα έως τη συχνότητα των 95Hz , επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία με το κατάλληλο φίλτρο. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ένα υψιπερατό φίλτρο οδηγώντας στα ίδια αποτελέσματα. Επίσης, η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων των δύο οχημάτων κυμαίνεται κατά τα πειράματα από 600RPM (10Hz) στο ρελαντί, έως το πολύ 2000RPM ($\approx 33\text{Hz}$). Άρα, είναι πιθανό στο παραπάνω εύρος συχνοτήτων των μετρήσεων επιτάχυνσης να παρεμβάλλεται η λειτουργία του κινητήρα, ίσως και στο αντίστοιχο με όρια τα μισά των προηγούμενων δεδομένου ότι ο εκκεντροφόρος άξονας εργάζεται στις μισές από τις παραπάνω στροφές, δηλαδή του στροφαλοφόρου

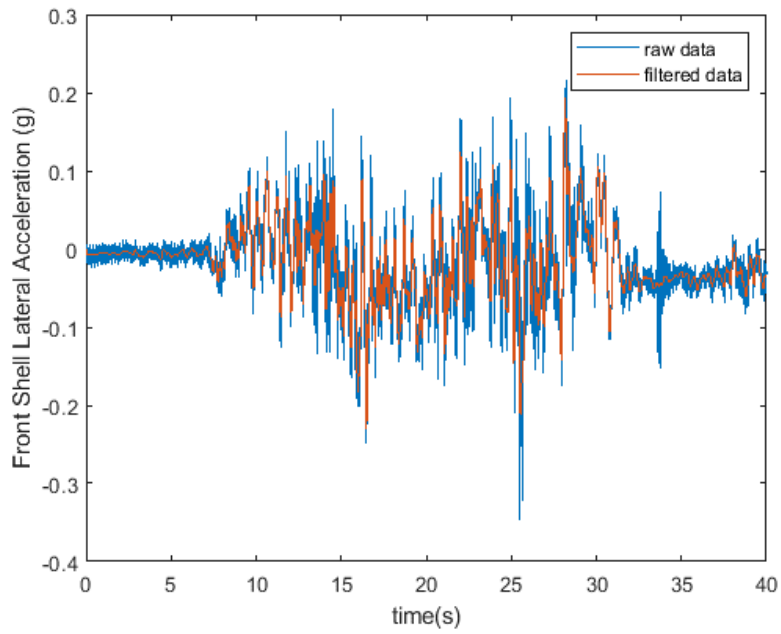


Σχήμα 4-3: Χρονοσειρά μεταβολής μέτρησης διαμήκου επιτάχυνσης οπίσθιου άκρου βυτίου στο εύρος 6Hz - 40Hz

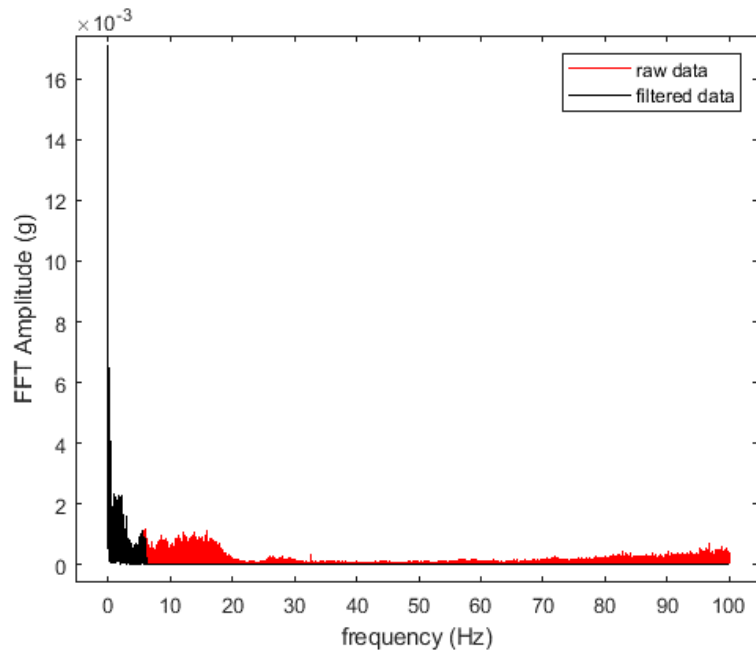
Από τα προηγούμενα γίνεται αντιληπτό πως οι μεταβολές οι οποίες διαδραματίζονται σε συχνότητες υψηλότερες των 6Hz δε σχετίζονται άμεσα με την συμπεριφορά του οδηγού, αλλά έμμεσα μέσω της αλληλεπίδρασης βυτιοφόρου και οδοστρώματος. Μολαταύτα, η παρατεταμένη πρόκληση σοβαρών κραδασμών επί του οχήματος, επιταχύνει τη φθορά του και ελαττώνει την αξιοπιστία του σε βάθος χρόνου. Παράλληλα, η διαβίβαση δονήσεων στο μεταφερόμενο εμπόρευμα, μπορεί ανάλογα με την κλάση αυτού να θέσει σε κίνδυνο τον οδηγό του οχήματος, τους υπόλοιπους χρήστες του οδικού δικτύου και το περιβάλλον. Επομένως, παρά το ότι η ποιότητα του δρόμου δεν αποτελεί παράγοντα ελέγχιμο από τον οδηγό, αυτός οφείλει να την

λαμβάνει υπόψιν ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη με κατά το δυνατόν ελαχιστοποιημένο κίνδυνο μεταφορά του εμπορεύματος. Μεν λοιπόν αφαιρείται από τις μετρήσεις ο θόρυβος, δε όμως χάνεται ένα τμήμα του σήματος που εμπεριέχει σχετικές με την οδηγική συμπεριφορά πληροφορίες. Ωστόσο, στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η ποιότητα του οδικού δικτύου δεν αποτελεί ελεγχόμενη παράμετρο, αλλά μονάχα λαμβάνεται υπόψιν για την κατανόηση των μετρήσεων. Εντούτοις, οι δυσμενέστερες δυναμικές διεγέρσεις διενεργούνται στη συχνότητα παφλασμού, η οποία αναμένεται να εντοπίζεται κάτω των $4Hz$ και επομένως με σχετικά μεγάλα περιθώρια ασφαλείας να βρίσκεται εντός της ζώνης διέλευσης του χρησιμοποιούμενου χαμηλοπερατού φίλτρου. Ταυτοχρόνως, σύμφωνα και με τις μετρήσεις, το πλείστο (κατά το μέτρο) των προκαλούμενων επιταχύνσεων ή διεγέρσεων μεταβάλλεται στις χαμηλές συχνότητες. Κατά συνέπεια, συνάγεται ότι καλύπτονται οι συχνότητες στις οποίες δύναται να μεταβληθεί επισφαλώς το μετρούμενο φυσικό μέγεθος.

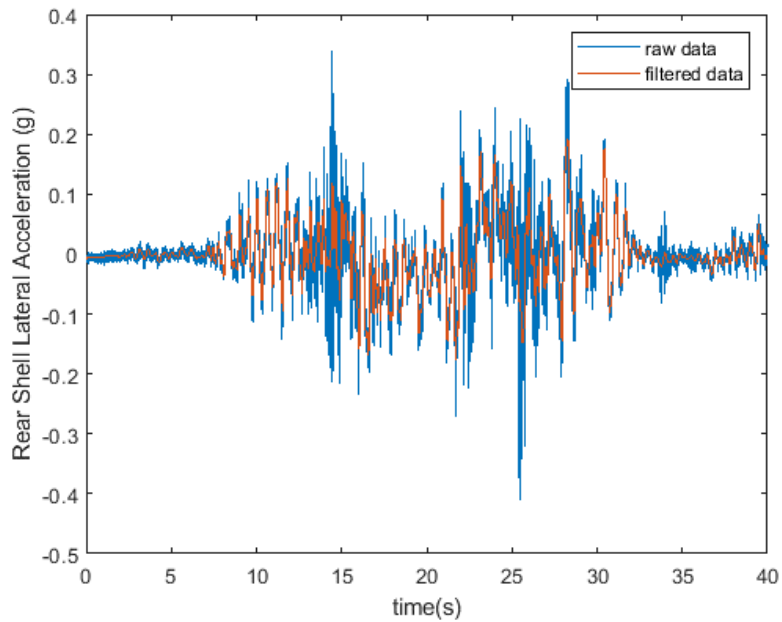
Στη συνέχεια, επιδιώκεται η επαλήθευση της ορθότητας επιλογής φίλτρου για τα υπόλοιπα μετρούμενα κατά τα πειράματα φυσικά μεγέθη αλλά και η εξοικείωση με τη φύση των τελευταίων μέσω της διαδικασίας. Επιζητείται λοιπόν η αντιπροσωπευτική αναπαράσταση των κατανομών των υπόλοιπων μετρούμενων μεγεθών στο πεδίο της συχνότητας σε συνδυασμό με ένα αντίστοιχο παράδειγμα εφαρμογής του φίλτρου. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος *FFT* για τα μεγαλύτερα διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων του κάθε αισθητήρα, δηλαδή αυτά της διαδρομής #2 και χαράσσεται η φιλτραρισμένη χρονοσειρά της #1 σε ένα περιορισμένο εύρος προκειμένου να ληφθεί ένα περιεκτικό όμως ευανάγνωστο διάγραμμα. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρούμενων μεγεθών και όπου θεωρείται αξιόλογο, παρατίθενται οι μετρήσεις του ίδιου μεγέθους από διαφορετικούς αισθητήρες και θέσεις.



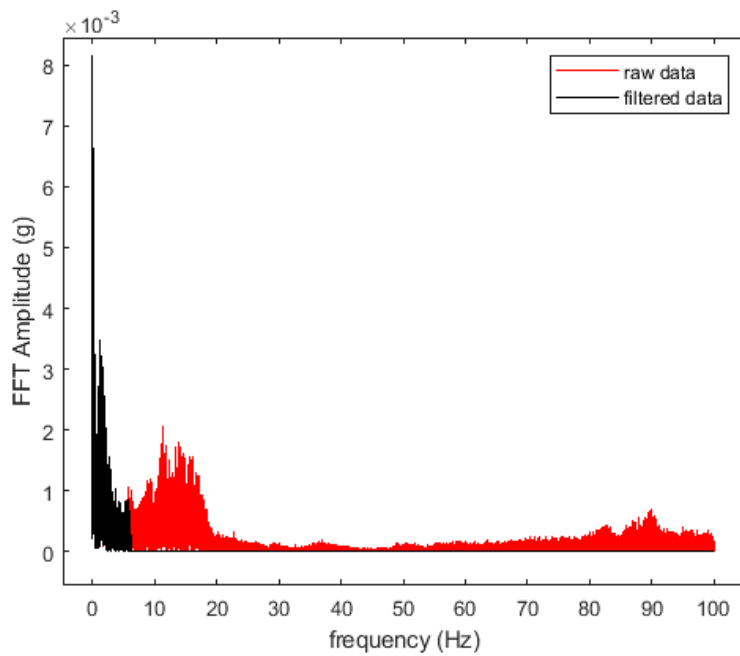
Σχήμα 4-4: Χρονοσειρές εγκάρσιας επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου



Σχήμα 4-5: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου εγκάρσιας επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου



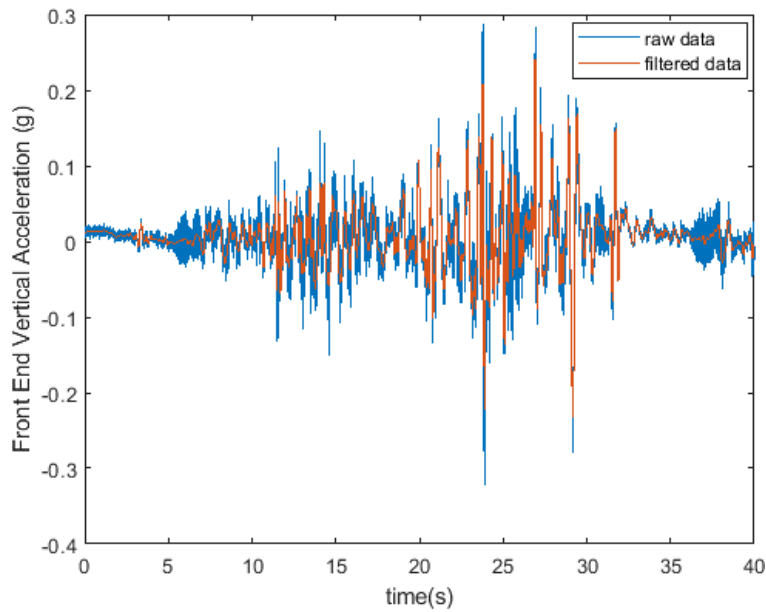
Σχήμα 4-6: Χρονοσειρές εγκάρσιας επιτάχυνσης οπίσθιου άκρου βυτίου



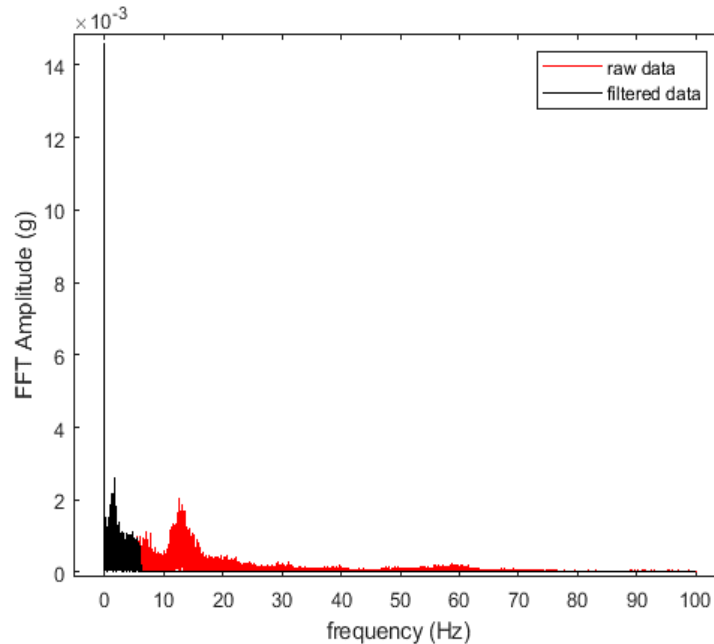
Σχήμα 4-7: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου εγκάρσιας επιτάχυνσης οπίσθιου άκρου βυτίου

Με βάση τα προηγούμενα σχήματα (Σχήμα 4-4 - Σχήμα 4-7), στο οπίσθιο άκρο της δεξαμενής σημειώνονται πιο έντονες μεταβολές της μετρούμενης επιτάχυνσης σε συχνότητες μεγαλύτερες της αποκοπής. Το γεγονός αυτό πιθανά οφείλεται στη μειωμένη πλήρωση του βυτίου σε συνδυασμό με την σχετικά μεγάλη απόσταση του σημείου μέτρησης από το κέντρο βάρους τα οποία οδηγούν σε μείωση της μάζας που στηρίζει η πίσω ανάρτηση. Ακόλουθα θεωρείται το

κέρδος της δύναμης που ασκείται στα ελαστικά από την μορφολογία του οδοστρώματος και κατά επέκταση το αντίστοιχο κέρδος των επιταχύνσεων στην αναρτημένη μάζα. Η μείωση της αναρτημένης μάζας προκαλεί μείωση του κέρδους αυτού σε χαμηλές συχνότητες μικρότερες των 2Hz και αντίστοιχα αύξηση του στο εύρος συχνοτήτων από 2Hz έως 10Hz [66]. Ταυτόχρονα, σύμφωνα με το [67] στο εύρος συχνοτήτων από 13Hz έως 20Hz , εντοπίζεται η φυσική συχνότητα ενός τροχοφορείου (bogie) διπλού άξονα όπως αυτού που φέρει στο οπίσθιο άκρο του το βυτιοφόρο. Συνεπώς, οι ασκούμενες δυναμικές διεγέρσεις σε αυτό το εύρος δύνανται να θεωρηθούν ενισχυόμενες λόγω της ταλάντωσης του προηγούμενου εξαρτήματος. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η ανάλυση των μετρήσεων κατακόρυφης επιτάχυνσης.

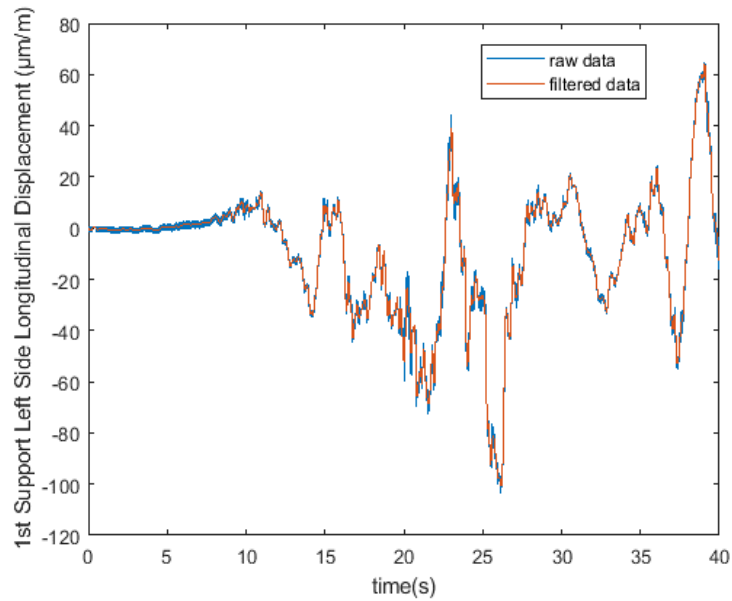


Σχήμα 4-8: Χρονοσειρές κατακόρυφης επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου

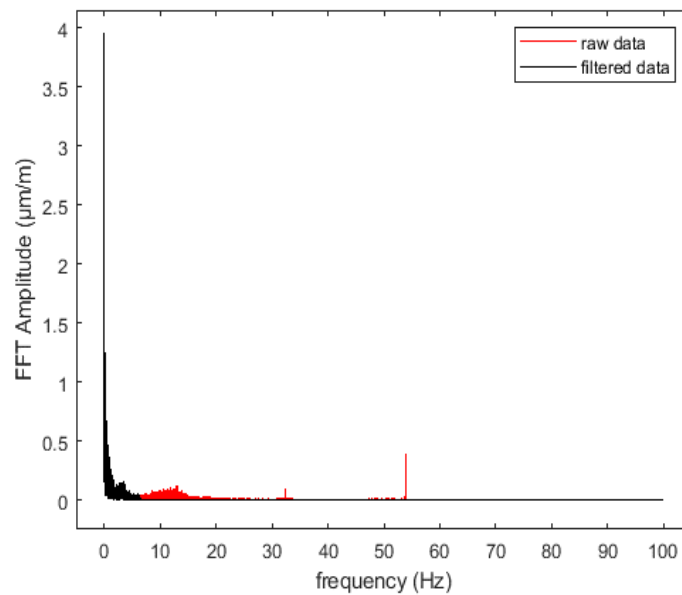


Σχήμα 4-9: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου κατακόρυφης επιτάχυνσης εμπρόσθιου άκρου βυτίου

Λόγω παράλειψης των επιμηκυνσιομέτρων από τη μετρητική διάταξη του οχήματος V1, αναλύονται δυο σύνολα μετρήσεων που προέκυψαν από πανομοιότυπες των προηγούμενων διαδρομές αλλά με το όχημα V2, έστω οι #1' και #2'. Αναφέρεται μάλιστα πως η #1' εκτελέστηκε από τον ίδιο οδηγό με την αντίστοιχη #1. Στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 4-10, Σχήμα 4-11) παρουσιάζεται η ανάλυση της διαμήκουσ παραμόρφωσης στην πρώτη στήριξη (σέλα) της δεξαμενής από την αριστερή πλευρά. Από το σχήμα αυτό αλλά και τις υπόλοιπες μετρήσεις παραμόρφωσης, παρατηρείται ότι και οι παραμορφώσεις μεταβάλλονται με χαμηλές συχνότητες, εντός του εύρους της ζώνης διέλευσης. Επίσης, παρατηρείται μια κορυφή του φάσματος κοντά στη συχνότητα των 50Hz η οποία πιθανά οφείλεται σε ηλεκτρικό θόρυβο δεδομένου ότι το κύκλωμα του οχήματος τροφοδοτείται με συχνότητα περίπου ίση με αυτή.



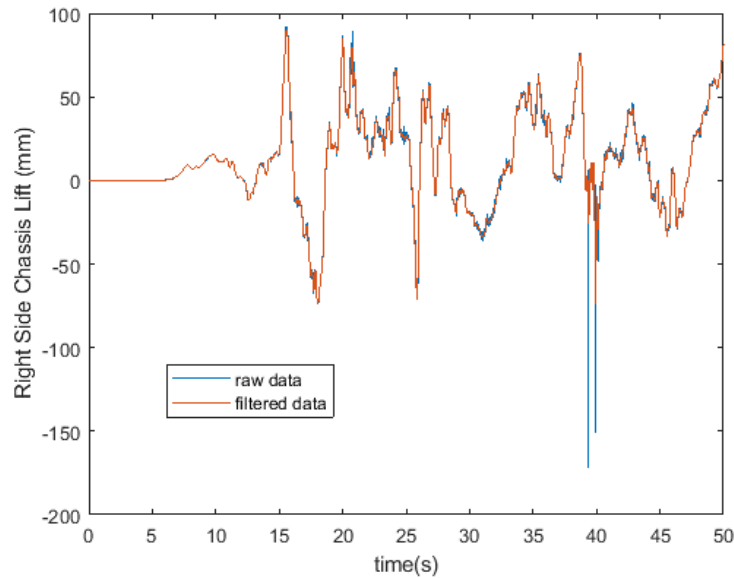
Σχήμα 4-10: Χρονοσειρές διαμήκους παραμόρφωσης αριστερής πλευράς της 1^{ης} στήριξης βυτίου



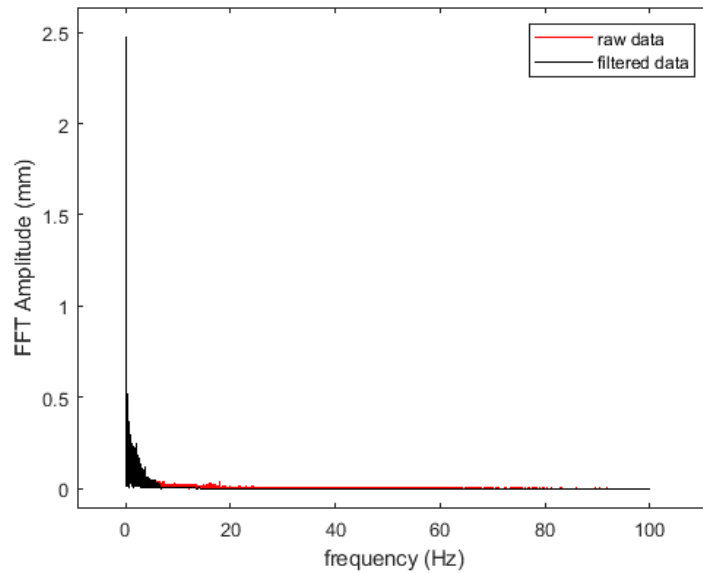
Σχήμα 4-11: Μονόπλευρο φάσμα μέτρου διαμήκους παραμόρφωσης αριστερής πλευράς της 1^{ης} στήριξης βυτίου

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-12, Σχήμα 4-13) παρουσιάζεται η ανάλυση των μετρήσεων απόστασης αμαξώματος – εδάφους, από αυτή γίνεται άμεσα φανερό πως οι μετρήσεις αυτές μεταβάλλονται σε χαμηλές συχνότητες με εξαίρεση κάποιες ανωμαλίες. Από τη μελέτη των ανωμαλιών αυτών και της αντίστοιχης βιντεοσκόπησης προσδιορίστηκε πως οφείλονται στην φύση της δέσμης laser που αξιοποιεί ο αισθητήρας για τη μέτρηση. Η τελευταία δύναται να διεισδύσει σε αγωγούς ομβρίων υδάτων μέσω των καλυμμάτων διοχέτευσης αλλά και σε εσοχές

μεταξύ οδοστρώματος και καλυμμάτων πρόσβασης φρεατίων ή πλακών πίεσης φωτεινών σηματοδοτών, αποδίδοντας έτσι μέτρηση μεγαλύτερης απόστασης.



Σχήμα 4-12: Χρονοσειρές ανύψωσης δεξιάς πλευράς αμαξώματος βυτιοφόρου



Σχήμα 4-13: Ανάλυση μετρήσεων Ανύψωσης Δεξιάς Πλευράς Αμαξώματος βυτιοφόρου

Αναφέρεται επίσης ότι η μέτρηση διαμήκουσ ταχύτητας μεταβάλλεται σημαντικά μόνο στις πολύ χαμηλές συχνότητες (<1Hz) με αμελητέα, συγκριτικά με το μέτρο του σήματος, συμβολή θορύβου και χωρίς ανωμαλίες, για αυτό το λόγο και παραλείπεται το αντίστοιχο σχήμα. Ωστόσο, το ζήτημα του θορύβου επανέρχεται παρακάτω όπου επιχειρείται διαφόριση του σήματος της

διαμήκους ταχύτητας για λήψη της αντίστοιχης επιτάχυνσης και όπου η ύπαρξη έστω και ελάχιστου θορύβου επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του υπολογισμού.

Κεφάλαιο 5 Συγκριτική Ανάλυση Μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται σχολαστικά η διαφοροποίηση των μετρήσεων μεταξύ των δύο οχημάτων, των διαφορετικών οδηγών και συνθηκών πλήρωσης. Ο σκοπός, πρωτίστως, είναι η εύρεση των αισθητήρων της συγκεκριμένης διάταξης οι οποίοι δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Παράλληλα, διερευνάται η αντιμετώπιση που απαιτείται για την αξιολόγηση μεταξύ διαφορετικών οχημάτων και ποσοστών πλήρωσης του βυτίου τους. Εντούτοις, εξετάζονται μετρήσεις από ειδική διαδρομή σε κλειστό δρόμο η οποία επαναλήφθηκε με διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, η δοκιμή ονομάσθηκε ολικά ως TESTA. Κατά τη διαδρομή αυτή, εκτελούνται δύο ζεύγη παρατεταμένων αριστερών στροφών και δύο πεδησεις μέχρι ακινητοποίησης, μια σχετικά απότομη (ξαφνική) λίγο προ της παρόδου του μισού της χρονικής διάρκειας της διαδρομής, η οποία ζητήθηκε από τους οδηγούς και άλλη μια προς περάτωση του πειράματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι διαδρομές με φορτίο εκτελέστηκαν με το ίδιο στήσιμο της μετρητικής διάταξης, ενώ αυτές χωρίς φορτίο εκτελέστηκαν υπό όμοιες καιρικές συνθήκες σε διαφορετική ημέρα αλλά και υπό διαφορετική εκτέλεση του στησίματος. Οι έστω και μικρές διαφοροποιήσεις στο στήσιμο της διάταξης συνεπάγονται διαφορετικά συστηματικά σφάλματα. Επομένως, δύνανται να επηρεάσουν περαιτέρω τη σύγκριση των μετρήσεων. Όμως, παρά τη διαμορφωμένη διαδρομή σημαντική είναι και η τυχαία διαφοροποίηση της τροχιάς και της συμπεριφοράς των οδηγών ανά πείραμα. Όσον αφορά το τελευταίο, εδώ θεωρείται πως το μήκος της διαδρομής και οι απαραίτητοι χειρισμοί, καθιστούν τις μετρήσεις κάθε πειράματος στατιστικά αντιπροσωπευτικές της συμπεριφοράς του οδηγού. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης που διαχωρίζουν τα πειράματα κωδικοποιούνται στην ονομασία του καθενός, συγκεκριμένα με τρεις διακριτούς όρους. Ο πρώτος όρος αναφέρει την αρίθμηση του οχήματος, ο δεύτερος αφορά την αντίστοιχη του οδηγού, ενώ ο τελευταίος υποδηλώνει το επίπεδο πλήρωσης της δεξαμενής. Αναφορικά με το τελευταίο, ο όρος M1 υποδηλώνει πλήρωση του βυτίου κατά 20%, ενώ ο όρος M2 αντιστοιχεί σε άδεια δεξαμενής. Συνοπτικά, διατίθενται οι μετρήσεις των ακόλουθων πειραμάτων:

V1_D3_M1

V2_D4_M1

V1_D4_M1

V1_D2_M2

V2_D3_M1

V2_D1_M2

Σύμφωνα και με τις προηγούμενες πληροφορίες, η σύγκριση της διαδρομής με τη V1_D4_M1 και της V2_D3_M1 με την V2_D4_M1 αντίστοιχα, επιδιώκεται προκειμένου να αναδειχθούν οι διαφορές μεταξύ των οδηγών. Παράλληλα, συγκρίνονται οι διαδρομές V1_D3_M1, V2_D3_M1 και οι V1_D4_M1, V2_D4_M1 ώστε να αποκαλυφθούν οι τυχούσες διαφοροποιήσεις μεταξύ των μετρήσεων των δύο οχημάτων. Πρόσθετα, εξετάζονται οι διαφορές μεταξύ των μετρήσεων του ίδιου οχήματος για πληρωμένη και άδεια δεξαμενή, ερμηνεύοντας τις τελευταίες προσεκτικά δεδομένου του χειρισμού από διαφορετικούς οδηγούς και της διαφορετικής εκτέλεσης του στησίματος. Εξαιτίας του πολυάριθμου των αισθητήρων και της επακόλουθης δυσκολίας στην αναφορά, επιλέγεται να αριθμηθούν όπως δηλώνεται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-1). Για τη σύγκριση των μετρήσεων επιλέγεται να περιγραφεί το κάθε σύνολο τους από τα στατιστικά μεγέθη του, συγκεκριμένα τα εξής:

- Μέση τιμή (*mean*)
- Διάμεσος τιμή (*median*)
- Ελάχιστη τιμή (*min*)
- Μέγιστη τιμή (*max*)
- Τυπική Απόκλιση (*standard deviation*)
- Μέση Τετραγωνική Ρίζα (*RMS*)
- Διατεταρτημοριακό Εύρος (*IQR*)
- Κύρτωση (*kurtosis*)
- Λοξότητα (*skewness*)

Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται, βάσει των αναφερθέντων στις προηγούμενες ενότητες, για τα σύνολα μετρήσεων που προέκυψαν από κάθε αισθητήρα κατά τα πειράματα, αφότου βέβαια υποστούν φιλτράρισμα. Εν τέλει, ο σκοπός είναι η εύρεση των μετρούμενων μεγεθών αλλά και των στατιστικών τους μεγεθών που είναι πιθανό να αντικατοπτρίζουν την οδηγική συμπεριφορά. Εντούτοις, ο αυξημένος κίνδυνος ανατροπής ο οποίος επιφέρεται από την ύπαρξη ρευστού στο βυτίο του οχήματος και του υψηλού κέντρου βάρους του [60], προϋδεάζει για τη σημασία της εγκάρσιας δυναμικής. Επόμενα, ελέγχονται οι μετρήσεις εγκάρσιας επιτάχυνσης των διαθέσιμων αισθητήρων, τα στατιστικά μεγέθη των διαφόρων συνόλων μετρήσεων παρουσιάζονται για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Προκειμένου να εξαλειφθεί η επίδραση των μετρήσεων επί ακινησίας μεταξύ της αρχής λήψης μετρήσεων και της εκκίνησης της διαδρομής από το όχημα, αυτές αφαιρούνται προ του υπολογισμού των στατιστικών μεγεθών.

Αρίθμηση	Μετρούμενο Μέγεθος Αισθητήρα
S1	Εγκάρσια Επιτάχυνση στο Δεξιά Εμπρόσθιο Τμήμα του Κελύφους του Βυτίου
S2	Διαμήκης Επιτάχυνση στο Οπίσθιο Άκρο του Βυτίου

S3	Εγκάρσια Επιτάχυνση στο Δεξιά Οπίσθιο Τμήμα του Κελύφους του Βυτίου
S4	Ανύψωση Αμαξώματος Οχήματος
S5	Ταχύτητα Αμαξώματος Οχήματος
S6	Κάθετη Επιτάχυνση στο Εμπρόσθιο Άκρο του Βυτίου
S7	Εγκάρσια Επιτάχυνση στο Εμπρόσθιο Άκρο του Βυτίου
S8	Διαμήκης Επιτάχυνση στο Εμπρόσθιο Άκρο του Βυτίου
S9	Διαμήκης Παραμόρφωση στο Αριστερό Άκρο της 1 ^{ης} Στήριξης του Βυτίου
S10	Εγκάρσια Παραμόρφωση στο Αριστερό Άκρο της 1 ^{ης} Στήριξης του Βυτίου
S11	Διαμήκης Παραμόρφωση στο Δεξιό Άκρο της 1 ^{ης} Στήριξης του Βυτίου
S12	Εγκάρσια Παραμόρφωση στο Δεξιό Άκρο της 1 ^{ης} Στήριξης του Βυτίου

Πίνακας 5-1: Απαρίθμηση αισθητήρων με περιγραφή των μετρούμενων μεγεθών

5.1 Ανάλυση Μετρήσεων Εγκάρσιας Επιτάχυνσης

Αρχικά, αναλύονται οι μετρήσεις του αισθητήρα S1 μέσω των στατιστικών μεγεθών τους όπως αυτά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5-2).

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	-0.0035	-0.0124	0.0038	-0.0101	-0.0042	-0.0064
Διάμεσος	-0.0081	-0.0128	0.0038	-0.0119	-0.0069	-0.0080
Ελάχιστο	-0.2293	-0.2403	-0.2506	-0.3252	-0.2451	-0.2638
Μέγιστο	0.1997	0.2222	0.2847	0.3229	0.2288	0.2069
Τυπική Απόκλιση	0.0599	0.0556	0.0572	0.0597	0.0500	0.0503
RMS	0.0600	0.0569	0.0573	0.0605	0.0502	0.0507
IQR	0.0817	0.0697	0.0558	0.0641	0.0522	0.0461
Κύρτωση	0.2160	0.6042	2.0346	3.5305	3.0286	2.5713
Λοξότητα	0.0138	0.0577	-0.0174	0.3135	0.2131	-0.1629

Πίνακας 5-2: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης αισθητήρα S1 (g)

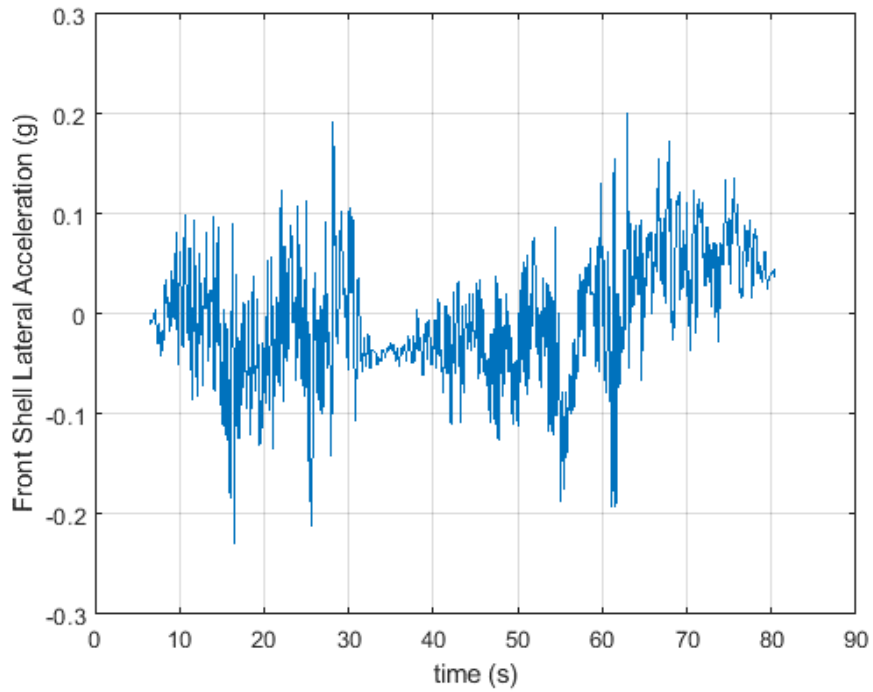
Παρατηρείται μια αξιοσημείωτη πτώση του διατεταρτημοριακού εύρους, της τυπικής απόκλισης και του RMS μεταξύ των δύο συνθηκών πλήρωσης των οχημάτων. Δηλαδή, παρουσιάζεται μεγαλύτερη διασπορά των μετρήσεων στην περίπτωση του πληρωμένου βυτίου λόγω του παφλασμού του ρευστού. Ταυτόχρονα, οι ακραίες τιμές των ζευγών διαδρομών V1_D3_M1, V1_D4_M1 και V2_D3_M1, V2_D4_M1 διαφέρουν αισθητά, αυτές των τελευταίων έχουν σημαντικά μεγαλύτερα μέτρα. Παράλληλα, μεταξύ των πειραμάτων V1_D2_M2 και V2_D1_M2, τα οποία έγιναν απουσία φορτίου, οι ακραίες τιμές δεν εμφανίζουν την ίδια τάση. Σημειώνεται επίσης πως το βυτιοφόρο V1 έχει χωρητικότητα 21,526 lt έναντι των 28,187 lt που διαθέτει το V2. Επομένως, για ποσοστό πλήρωσης 20% το βυτίο του τελευταίου οχήματος μεταφέρει περίπου 1,330kg επιπλέον νερό σε σχέση με το άλλο. Επιπρόσθετα, το απόβαρο του V1 αναφέρεται πως είναι ίσο με 11,290kg σε σύγκριση με τα 12,200kg του V2. Συνεπώς, συνάγεται ότι η διαφορά μεταξύ των ακραίων τιμών επιτάχυνσης που μετρήθηκαν στα δύο οχήματα οφείλεται στο πρόσθετο φορτίο αλλά και βάρος οχήματος που διακινεί το βυτιοφόρο V2.

Ωστόσο, συγκρίνοντας τους οδηγούς D3 και D4 μέσω του πίνακα, το μόνο μέγεθος το οποίο φαινομενικά δύναται να διαχωρίσει τη συμπεριφορά τους για αμφότερα τα οχήματα είναι αυτό της κύρτωσης. Η κύρτωση αποτελεί ένα μέτρο της μη ομοιομορφίας της κατανομής ενός συνόλου μετρήσεων [9], η Σχέση (2.12) με βάσει την οποία ορίστηκε το μέγεθος αυτό μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως εξής:

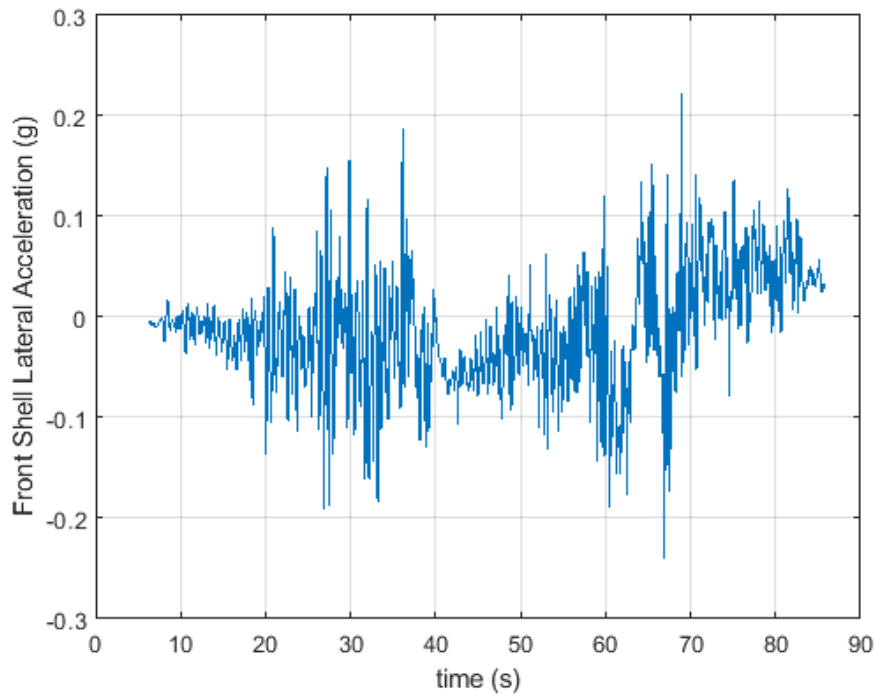
$$\gamma_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^4 - 3.0 \quad (5.1)$$

όπου z_i είναι το z-score της μέτρησης με δείκτη i . Σύμφωνα με την σχέση αυτή, η τιμή της κύρτωσης εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ μετρούμενης και μέσης τιμής αλλά και της τυπικής απόκλισης. Η τελευταία δεν παρουσιάζεται συνεκτική τάση μεταξύ των οδηγών, ενώ η μέση τιμή έχει μεν αισθητά μεγαλύτερο μέτρο για τον οδηγό D4 δε όμως εξακολουθεί αυτό να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με το εύρος στο οποίο λαμβάνουν τιμές οι μετρήσεις, για να δύναται να επηρεάσει σημαντικά τον υπολογισμό της κύρτωσης. Εντούτοις, η εμφάνιση θετικής κύρτωσης σημαίνει μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών στην ουρά της κατανομής (*heavy-tailed*) [19]. Επομένως, μεγαλύτερη τιμή της κύρτωσης προϋποθέτει για την ύπαρξη μεγαλύτερου πλήθους ακραίων τιμών ή/και πιο ακραίων (κατά μέτρο) τιμών στο μελετώμενο δείγμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό ενδέχεται να προκλήθηκε από παραμονή του οχήματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, κατά το πείραμα, σε σημεία της διαδρομής που προκαλούν σημαντική εγκάρσια κλίση του οχήματος. Μολαταύτα, το γεγονός αυτό ενδέχεται επίσης να υποδηλώνει πιο ακραίες εγκάρσιες επιταχύνσεις κατά τις στροφές, οπότε θεωρητικά πλησιέστερη και άρα πιο ριψοκίνδυνη προσέγγιση του ορίου ανατροπής του οχήματος. Καθίσταται πάντως φανερό, ότι για την συστηματική κατηγοριοποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς μεταξύ διαφορετικών

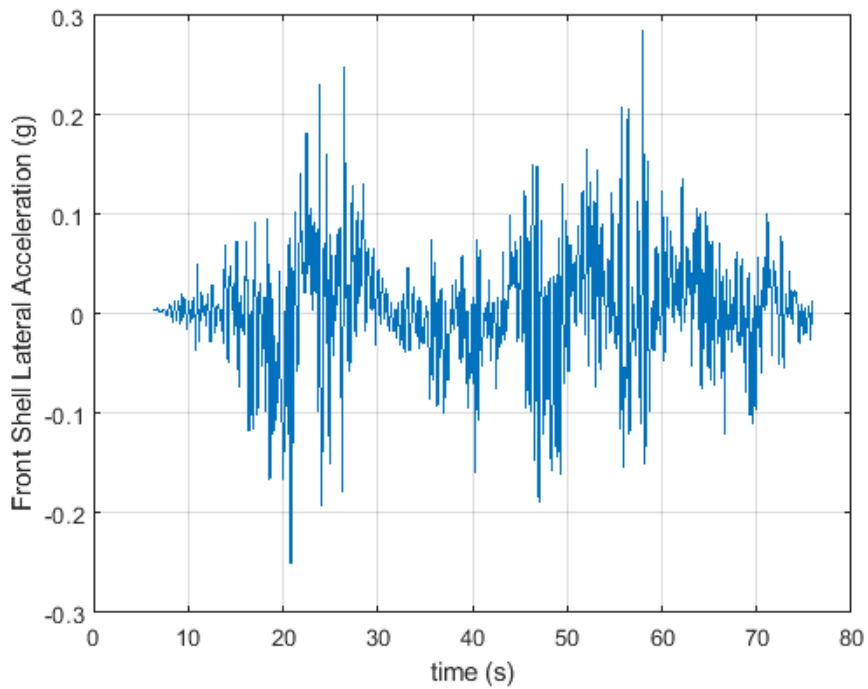
οδηγών, οχημάτων κ.λπ., τα στατιστικά μεγέθη των μετρήσεων δεν επαρκούν, τουλάχιστον στην περίπτωση αυτού του αισθητήρα. Ανεξαρτήτως, οι χρονοσειρές των μετρήσεων του αισθητήρα από τις διαδρομές TESTA με φορτίο, παρουσιάζονται για πληρότητα στα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήμα 5-1 - Σχήμα 5-4).



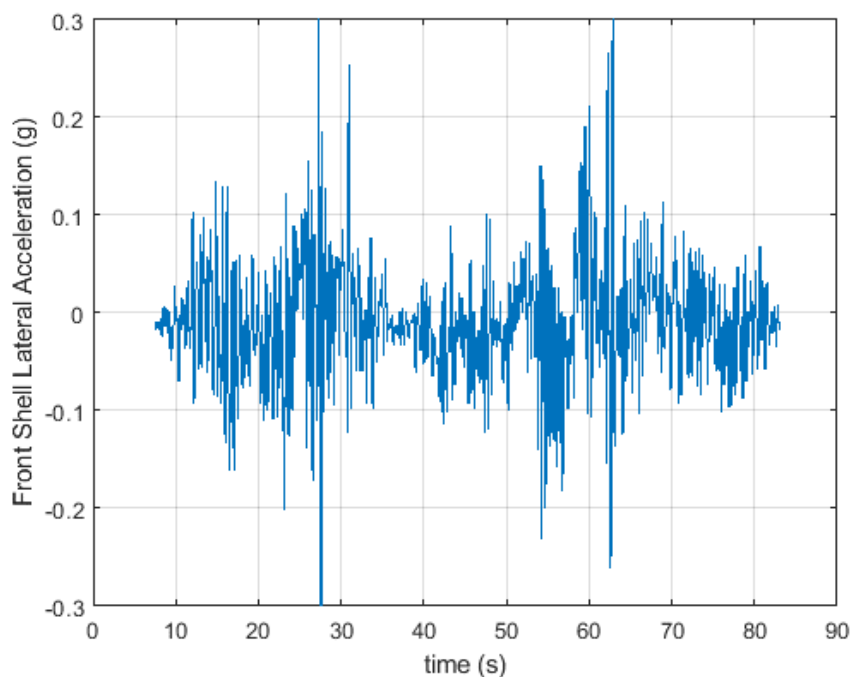
Σχήμα 5-1: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V1_D3_M1



Σχήμα 5-2: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V1_D4_M1



Σχήμα 5-3: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V2_D3_M1



Σχήμα 5-4: Χρονοσειρά S1/Διαδρομή V2_D4_M1

Ενδιαφέρουσα αναπαράσταση των μετρήσεων αποτελεί το θηκόγραμμα, αφού μέσω αυτού παρουσιάζονται τα παρακάτω χαρακτηριστικά μεγέθη του δείγματος:

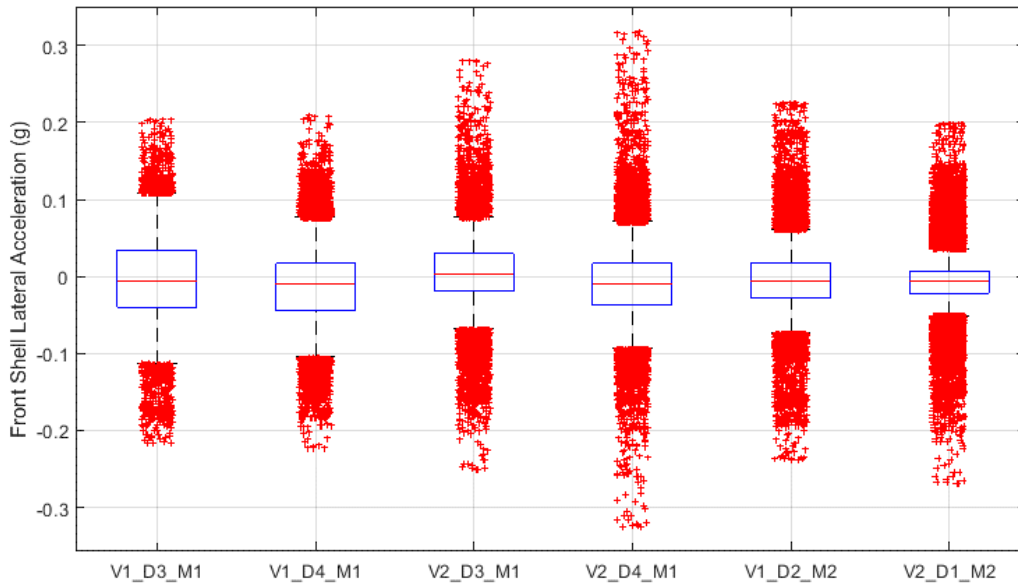
- Ελάχιστη/Μέγιστη Τιμή
- Διάμεσος Τιμή
- Πρώτο και Τρίτο Τεταρτημόριο
- Διατεταρτημοριακό Εύρος

Εκτός όμως αυτών, καθίσταται ευχερής η παρατήρηση της κατανομής των μετρήσεων και κυρίως αυτών οι οποίες κατηγοριοποιούνται ως έκτροπες από τη μεθοδολογία IQR ή υπό βολικότερη σκοπιά, των ακραίων μετρήσεων. Τα θηκογράμματα των εδώ αναλυόμενων συνόλων μετρήσεων παρουσιάζονται κοινώς στο Σχήμα 5-5. Επιμένοντας στον κίνδυνο ανατροπής, σύμφωνα με παλιότερη έρευνα, γενικά τα ατυχήματα με εκδήλωση ανατροπής οφείλονται γενικά σε στροφές του οχήματος με υπερβολική ταχύτητα και σε απότομες ανυψώσεις ή βυθίσεις της μιας πλευράς του οχήματος [68]. Παίρνοντας τις μετρήσεις που αντιστοιχούν στις στροφές των οχημάτων από το κάθε οδηγό, υψηλότερες κορυφώσεις των μετρήσεων επιτάχυνσης σε συνδυασμό με αραιότερες συγκεντρώσεις μετρήσεων στις κορυφώσεις αυτές, υποδηλώνουν πιο απότομους χειρισμούς κατά την εκτέλεση ενός ελιγμού που επιβάλλει η διαμόρφωση του δρόμου. Φυσικά, η ταχύτητα με την οποία το όχημα εκτελεί τη στροφή διαδραματίζει επίσης ριζικό ρόλο. Για τη

μελέτη της σχέσης μεταξύ εγκάρσιας επιτάχυνσης και συνολικής ταχύτητας κατά τη στροφή, χρησιμοποιείται η σχέση υπολογισμού της κεντρομόλου επιτάχυνσης, δηλαδή:

$$a_{y,cf} = \frac{V^2}{R} \quad (5.2)$$

όπου V η συνολική ταχύτητα του οχήματος και R η ακτίνα στροφής, η οποία καθορίζεται κυρίως από τη διαμόρφωση του οδοστρώματος. Από τη Σχέση (5.2), συμπεραίνεται πως εκτελώντας την ίδια στροφή με μεγαλύτερη ταχύτητα αναπτύσσονται ισχυρότερες εγκάρσιες επιταχύνσεις και μάλιστα αυξανόμενες με το τετράγωνο της ταχύτητας. Απότομες μεταβολές της εγκάρσιας επιτάχυνσης μπορούν να οφείλονται σε αντίστοιχα απότομες μεταβολές της γωνίας του τιμονιού και επομένως της εισόδου του οδηγού. Ωστόσο, σε περίπτωση που ο οδηγός εμφανίζει υπνηλία ή κόπωση, οι διορθωτικές κινήσεις τις οποίες πραγματοποιεί με το τιμόνι για την διατήρηση της τροχιάς του οχήματος καθίστανται λιγότερο ακριβείς αλλά και μεγαλύτερες κατά μέτρο [3].



Σχήμα 5-5: Θηκογράμματα μετρήσεων S1 διαδρομών TESTA

Με τα προηγούμενα κατά νου, ο οδηγός D4 καταδεικνύεται ως ο πιο επιθετικός διαμέσου της εγκάρσιας επιτάχυνσης, ειδικά στην περίπτωση χειρισμού του οχήματος V2 (V2_D4_M1). Πράγματι, οι πληροφορίες που διατίθενται από την εκπαίδευση των οδηγών επιβεβαιώνουν αυτό το συμπέρασμα. Παραδόξως, η ταχύτητα οχήματος εμφανίζεται κατά κόρον, βάσει των μετρήσεων, ελαφρά χαμηλότερη στην περίπτωση του οδηγού αυτού, όπως εξάλλου υποδηλώνεται από τη μεγαλύτερη διάρκεια της διαδρομής. Σημειώνεται ότι οι ανωμαλίες του οδοστρώματος, όπως οι λακκούβες, μπορούν επίσης να προκαλέσουν εγκάρσιες επιταχύνσεις [69]. Ωστόσο, οι ανομοιομορφίες αυτές μπορεί να έγιναν αισθητές σε κάποια πειράματα, ενώ σε άλλα να αποφεύχθηκαν λόγω μικρών ή και αμυδρών διαφοροποιήσεων της τροχιάς ή ακόμα, να

μην έγιναν το ίδιο αισθητές εξαιτίας διαφορετικής ταχύτητας προσπέλασης [70]. Παρόλα αυτά, η τοποθέτηση του αισθητήρα έγινε έτσι ώστε να βρίσκεται περίπου στο ίδιο ύψος με το κέντρο βάρους του οχήματος και να προσεγγίζει τον εγκάρσιο άξονα που διέρχεται από το τελευταίο. Ταυτόχρονα, η θέση του πάνω στο κέλυφος εξασφαλίζει την καταγραφή, μέσω των μετρήσεων, της επίδρασης του παφλασμού. Επομένως, κρίνεται πως ανεξαρτήτως των τυχαίων διαφοροποιήσεων μεταξύ των πειραμάτων, δύναται μέσω της ανάλυσης των μετρήσεων του S1 να αξιολογηθεί παραμετρικά η οδηγική συμπεριφορά κατά την εγκάρσια κατεύθυνση βάσει του κινδύνου ανατροπής. Οι δυνατότητες χαρακτηρισμού της οδηγικής συμπεριφοράς των οδηγών μέσω της κύρτωσης θα διερευνηθούν περαιτέρω μέσω των μετρήσεων των υπόλοιπων αισθητήρων.

Ακολούθως, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των υπολοίπων αισθητήρων εγκάρσιας επιτάχυνσης S3 και S7. Στο σημείο αυτό, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύγκριση των παραπάνω μετρήσεων με αυτές του αισθητήρα S1, σε αντιστοιχία με τη χρονική στιγμή μέτρησης, για κάθε διαδρομή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης των μεγεθών ο οποίος χαρακτηρίζει την ύπαρξη αυτής της συσχέτισης λαμβάνοντας τιμές στο διάστημα από 0 έως 1, με την τελευταία να υποδηλώνει ιδανική συσχέτιση [27]. Το μέγεθος αυτό υπολογίστηκε όπως αναγράφεται στην τελευταία γραμμή των ακόλουθων πινάκων. Οι συντελεστές συσχέτισης δύο διανυσμάτων, έστω y και x με μήκος N δίνονται από τη Σχέση (5.3), ως εξής:

$$cor(x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y_i - \mu_y}{\sigma_y} \right) \quad (5.3)$$

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	0.0025	0.0040	0.0006	-0.0076	-	-
Διάμεσος	-0.0012	0.0043	0.0006	-0.0096	-	-
Ελάχιστο	-0.2464	-0.2297	-0.1668	-0.2099	-	-
Μέγιστο	0.2318	0.2392	0.2525	0.2760	-	-
Τυπική Απόκλιση	0.0541	0.0523	0.0494	0.0517	-	-
RMS	0.0541	0.0525	0.0494	0.0523	-	-
IQR	0.0553	0.0473	0.0534	0.0583	-	-
Κύρτωση	1.7377	2.1958	1.7818	1.8219	-	-
Λοξότητα	0.1094	-0.2011	0.2750	0.2437	-	-

Συντ. Συσχέτισης	0.6378	0.6175	0.7197	0.7416	-	-
-------------------------	--------	--------	--------	--------	---	---

Πίνακας 5-3: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης αισθητήρα S3 (g)

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	0.0053	-0.0017	-0.3451	-0.0442	-0.0110	0.0016
Διάμεσος	0.0050	-0.0007	-0.1596	-0.0453	-0.0090	0.0033
Ελάχιστο	-0.2461	-0.2691	-1.1210	-0.3091	-0.2214	-0.2326
Μέγιστο	0.2388	0.2631	0.4825	0.1852	0.2235	0.2730
Τυπική Απόκλιση	0.0536	0.0523	0.4771	0.0560	0.0479	0.0542
RMS	0.0539	0.0523	0.5888	0.0713	0.0491	0.0542
IQR	0.0555	0.0490	0.9433	0.0639	0.0416	0.0500
Κύρτωση	1.9853	2.4544	-1.5778	1.6205	3.1075	2.3334
Λοξότητα	0.0737	-0.1103	-0.1859	0.2094	-0.0701	-0.0046
Συντ. Συσχέτισης	-0.8010	-0.8204	-0.0379	-0.6483	-0.8863	-0.9668

Πίνακας 5-4: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας επιτάχυνσης αισθητήρα S7 (g)

Οι μετρήσεις του αισθητήρα S3 παρουσιάζονται μετρίως συσχετισμένες με αυτές του S1 και ταυτόχρονα τα στατιστικά μεγέθη τους παρουσιάζουν όμοια εικόνα με τις τελευταίες, συγκρινόμενες μεταξύ των πειραμάτων. Γενικώς ωστόσο, τα μέτρα των επιταχύνσεων παρουσιάζονται κατά κόρον μειωμένα σε σχέση με τις μετρήσεις του αισθητήρα S1, καθιστώντας την αξιολόγηση βάσει των τελευταίων συντηρητικότερη. Επίσης, επειδή ο τελευταίος αισθητήρας μετράει την επιτάχυνση σε περιοχή κοντά στο κέντρο βάρους δύναται να χαρακτηρίσει τη δυναμική του οχήματος ως σύνολο. Ταυτόχρονα, όπως φαίνεται από τις χρονοσειρές των μετρήσεων, οι διαφορές μεταξύ των οδηγών αμβλύνονται στην περίπτωση του S3, ο οποίος βρίσκεται σε ίδιο ύψος αλλά στο οπίσθιο άκρο της δεξαμενής. Δεδομένου ακόμα, ότι πρόκειται για αισθητήρες της ίδιας κατασκευής αλλά διαφορετικής τοποθέτησης στο κέλυφος του βυτίου, η τοποθέτηση του S1 θεωρείται καταλληλότερη για το σκοπό της αξιολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς.

Όσον αφορά τις μετρήσεις S7, αυτές προέρχονται από τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο το οποίο βρίσκεται σε ίδιο ύψος με τον S1, αλλά τουναντίον η θέση του προσεγγίζει το διαμήκη άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους του οχήματος και η κατεύθυνση θετικής μέτρησης είναι η αντίθετη. Η συσχέτιση σε αυτήν την περίπτωση είναι ισχυρή, ενώ φαίνεται να είναι ισχυρότερη στην περίπτωση της άδειας δεξαμενής. Οι μετρήσεις της διαδρομής V2_D3_M1 παρουσιάζονται εσφαλμένες, όπως γίνεται αμέσως αντιληπτό από τις απρόσμενες και αφύσικες εκτιμήσεις των στατιστικών μεγεθών, με εξαίρεση τη λοξότητα. Παρά το ότι το πείραμα V2_D4_M1 έγινε με το ίδιο στήσιμο της μετρητικής διάταξης, η οπτική παρατήρηση της χρονοσειράς των μετρήσεων S7 δεν φανερώνει άμεσα την ύπαρξη σημαντικού σφάλματος. Όμως, από τη μέση και διάμεσο τιμή γίνεται άμεσα αντιληπτή η αρκετά έντονη πόλωση των μετρήσεων προς τα αρνητικά, η οποία υποδηλώνει σφάλμα τοποθέτησης. Ανεξαρτήτως, οι μη εσφαλμένες μετρήσεις παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση. Από την αισθητή πτώση του συντελεστή συσχέτισης του οχήματος V1 στην περίπτωση της μερικώς πληρωμένης δεξαμενής (M1), συνάγεται πως πράγματι οι μετρήσεις των S1 και S7 επηρεάζονται από το μεταφερόμενο υγρό και επομένως εν μέρει αποτυπώνουν τον αντίκτυπο στη δυναμική συμπεριφορά του οχήματος. Ταυτόχρονα, η διαφοροποίηση μεταξύ των οδηγών στις μετρήσεις S7 των πειραματικών διαδρομών V1_D3_M1 και V1_D4_M1 παρουσιάζεται όμοια με τις αντίστοιχες του S1 και ομοίως αναδεικνύει τον οδηγό D4 ως πιο επιθετικό υπό τα ίδια κριτήρια. Δεδομένης της ομοιότητας των μετρήσεων αμφοτέρων των αισθητήρων και του σφάλματος στην τοποθέτηση του εδώ μελετώμενου, η οποία πλήττει επίσης διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων και από άλλα πειράματα, επιλέγεται στη συνέχεια να περιοριστεί η μελέτη της εγκάρσιας επιτάχυνσης στον αισθητήρα S1.

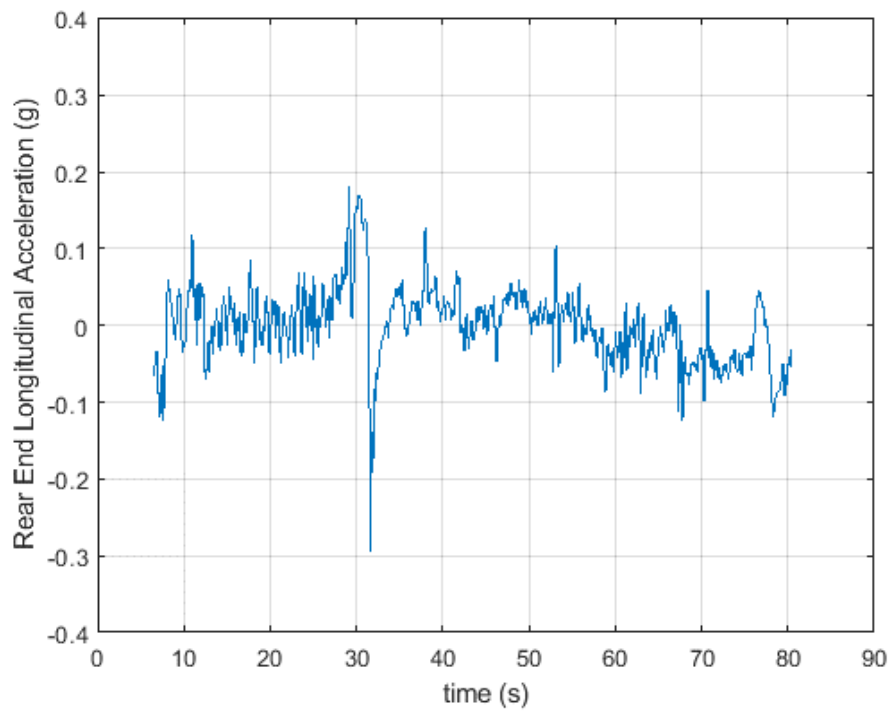
5.2 Ανάλυση Μετρήσεων Διαμήκους Επιτάχυνσης

Στη συνέχεια, τίθενται σε σύγκριση μεταξύ τους οι μετρήσεις διαμήκους επιτάχυνσης του αισθητήρα S2 (Πίνακας 5-5), των οποίων η θετική κατεύθυνση μέτρησης είναι προς τα πίσω. Τα στατιστικά μεγέθη διαφέρουν σημαντικά μεταξύ οχημάτων, αλλά μεταξύ των δύο συνθηκών πλήρωσης μόνο η κυρτότητα διαφοροποιείται αισθητά. Ανεξαρτήτως, οι χρονοσειρές του αισθητήρα παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 5-6 - Σχήμα 5-11), για όλα τα συγκρινόμενα πειράματα. Σε αυτήν την περίπτωση, αναμένεται η εκτίμηση της κύρτωσης να επηρεάζεται κυρίως από τις πεδησεις κατά το πείραμα και ιδιαιτέρως αυτής που . Από τα διαγράμματα φανερώνεται πως κατά τα φρεναρίσματα του οδηγού D4 αναπτύχθηκαν ελαφρά ισχυρότερα μέτρα επιταχύνσεων, ενώ εν γένει δίνουν την εντύπωση πιο απότομων χειρισμών. Το τελευταίο ενισχύει περισσότερο τη θεωρία για την διάκριση της συμπεριφοράς μέσω της κύρτωσης, αφού το μέγεθος αυτό παρουσιάζεται αισθητά αυξημένο στην περίπτωση αυτού του οδηγού. Εξάλλου, στο πείραμα V2_D1_M2 όπου παρουσιάστηκε με διαφορά η ισχυρότερη πέδηση, η εκτίμηση της κύρτωσης είναι επίσης σημαντικά μεγαλύτερη. Όμως, με τις μετρήσεις αυτές αποτυπώνεται η κίνηση της αναρτημένης μάζας του οχήματος. Κατά την επιβράδυνση μέχρι ακινητοποίησης,

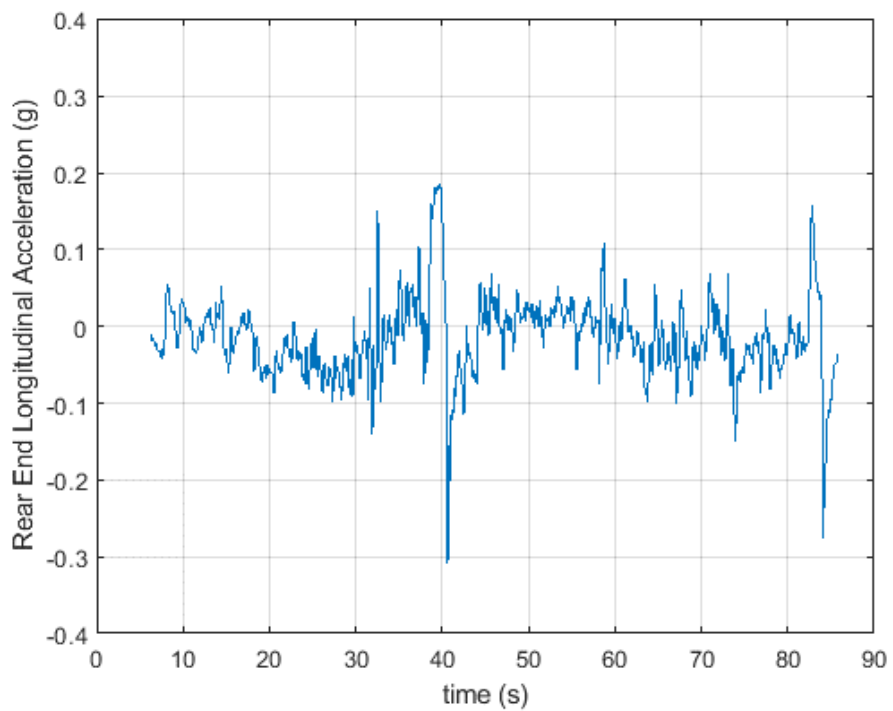
αρχικά γίνεται πράγματι αντιληπτή η επιβράδυνση αυτή. Επίσης, κατά την πέδηση επίσης, ανάλογα με το ρυθμό επιβράδυνσης μετατίθεται περισσότερο το κέντρο βάρους προς τα εμπρός του οχήματος, όπως αποτυπώνεται και στις μετρήσεις. Ταυτόχρονα όμως, αυτό μεταφράζεται σε άσκηση μεγαλύτερου φορτίου στους εμπρόσθιους τροχούς και συνεπώς καθιστώντας δυνατή την άσκηση μεγαλύτερης δύναμης πέδησης [71]. Επομένως, οι μετρήσεις του μελετώμενου αισθητήρα διαπιστώνεται ότι προσφέρουν κρίσιμη πληροφορία για την οδηγική συμπεριφορά. Ωστόσο, αποκρύπτεται η άμεση συνέπεια των χειρισμών του οδηγού που είναι η επιτάχυνση και η επιβράδυνση του οχήματος ως σύνολο. Επιπρόσθετα, η αναγνώριση και ο διαχωρισμός τέτοιων συμβάντων μέσω των μετρήσεων είναι προβληματική. Κατά συνέπεια, η συστηματική αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς, ως προς την διαμήκη κίνηση, δυσχεραίνεται περαιτέρω. Το ζήτημα αυτό θα διερευνηθεί περαιτέρω στην επόμενη ενότητα όπου επιχειρείται η εκτίμηση της διαμήκους επιτάχυνση από τις μετρήσεις της αντίστοιχης ταχύτητας του αισθητήρα S5.

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	-0.0004	-0.0148	0.0053	0.0030	-0.0008	-0.0143
Διάμεσος	0.0029	-0.0162	0.0051	0.0030	-0.0040	-0.0129
Ελάχιστο	-0.2941	-0.3096	-0.3287	-0.3471	-0.2427	-0.4766
Μέγιστο	0.1805	0.1862	0.3239	0.3042	0.1646	0.3028
Τυπική Απόκλιση	0.0490	0.0527	0.0517	0.0486	0.0472	0.0530
RMS	0.0490	0.0548	0.0520	0.0486	0.0472	0.0549
IQR	0.0590	0.0567	0.0486	0.0439	0.0563	0.0390
Κύρτωση	2.7737	4.1420	7.3436	8.9675	1.0822	16.6920
Λοξότητα	-0.0466	0.1284	0.2892	0.2564	0.0677	-0.4623

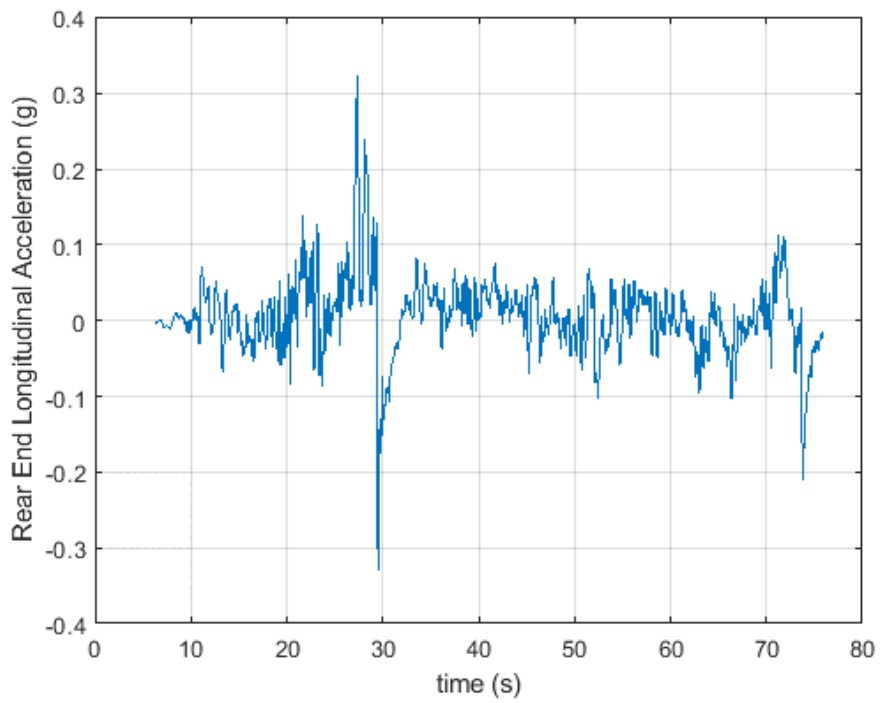
Πίνακας 5-5: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων διαμήκους επιτάχυνσης αισθητήρα S2 (g)



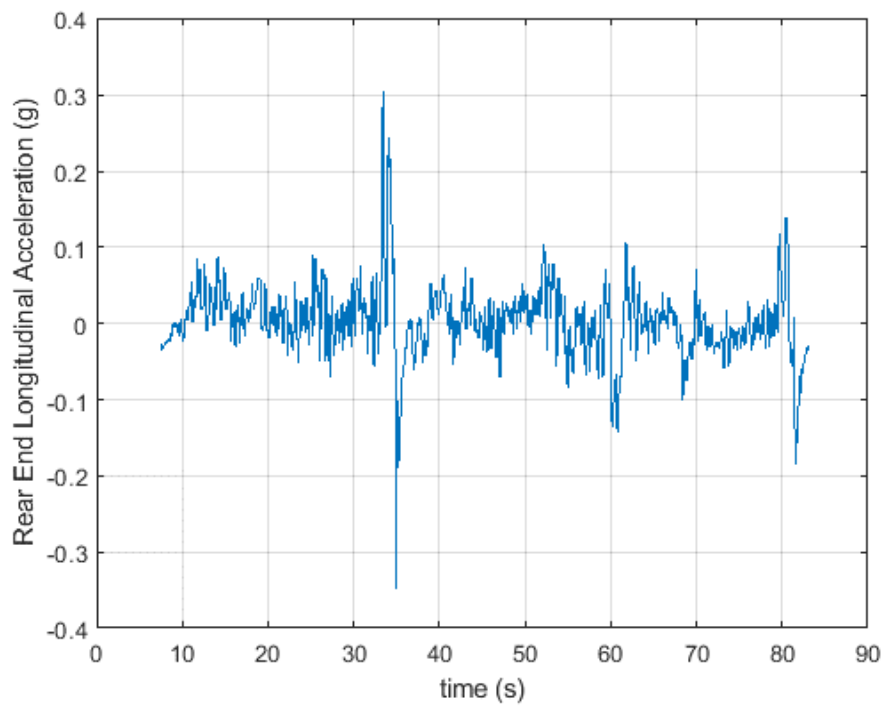
Σχήμα 5-6: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V1_D3_M1



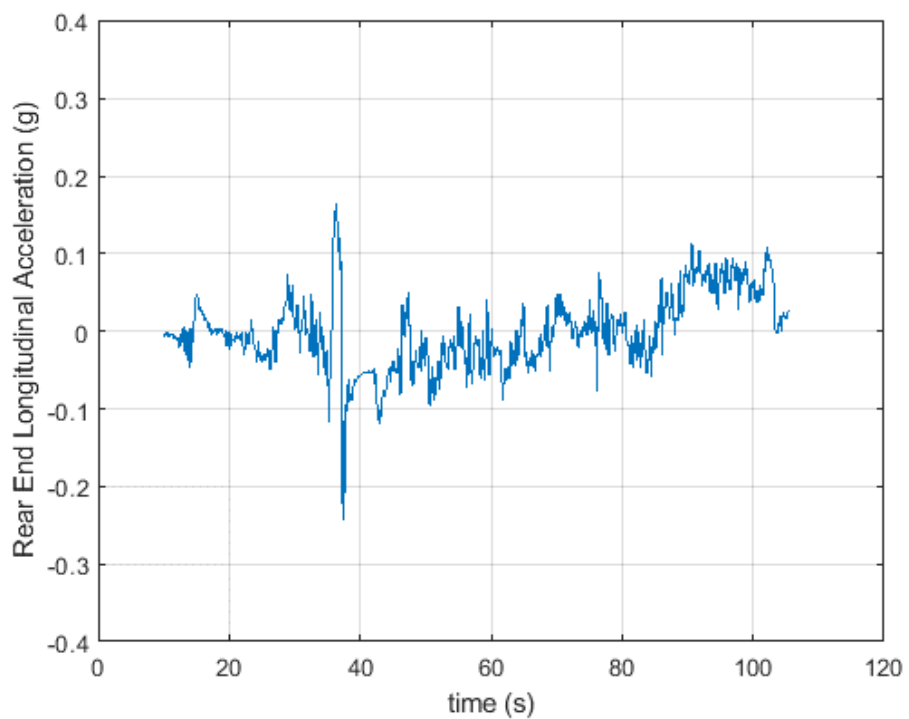
Σχήμα 5-7: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V1_D4_M1



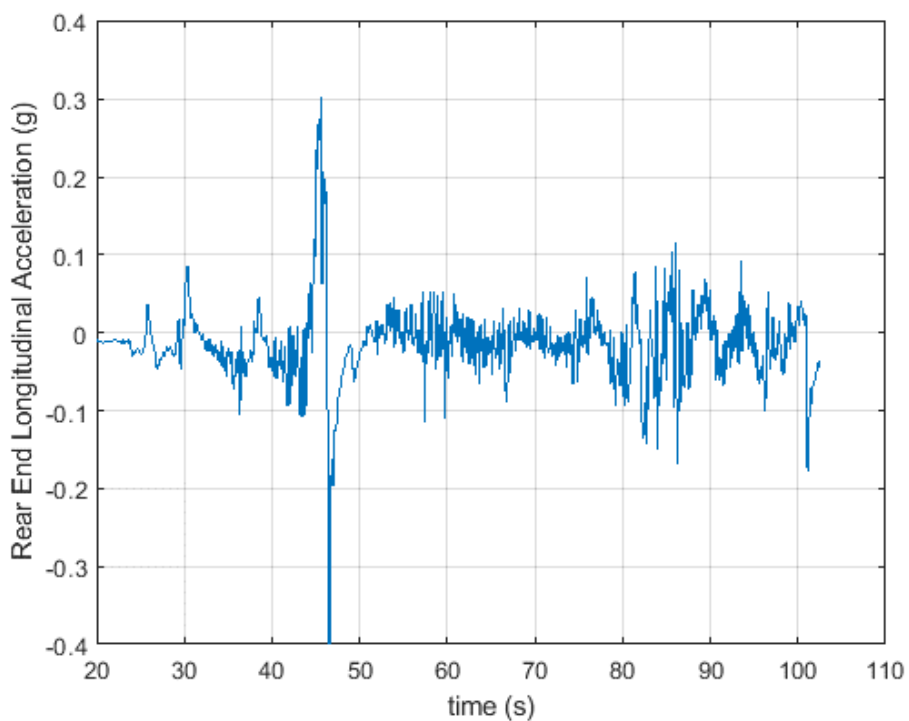
Σχήμα 5-8: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V2_D3_M1



Σχήμα 5-9: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V2_D4_M1



Σχήμα 5-10: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V1_D2_M2



Σχήμα 5-11: Χρονοσειρά S2/Διαδρομή V2_D1_M2

Η δυνατότητα μελέτης των μετρήσεων διαμήκους επιτάχυνσης του αισθητήρα S8 περιορίζεται από το σφάλμα τοποθέτησης το οποίο εμφανίσθηκε κατά τα πειράματα V2_D3_M1 και V2_D4_M1. Παράλληλα, οι μετρήσεις των πειραμάτων V1_D3_M1 και V1_D4_M1 διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τις αντίστοιχες του αισθητήρα S2, όπως φανερώνεται κατόπιν παρατήρησης των χρονοσειρών και των στατιστικών μεγεθών. Παρόλα αυτά, η κύρτωση παρουσίασε αντιστροφή τάση από τις αντίστοιχες μετρήσεις του S2 και επομένως υπέδειξε ότι το μέγεθος αυτό δε παρουσιάζει την προσδοκώμενη συσχέτιση με την οδηγική συμπεριφορά. Από την περίπτωση των πειραματικών διαδρομών V1_D2_M2 και V2_D1_M2, το πιο εύλογο συμπέρασμα είναι ότι περιττό συμπλήρωμα στις μετρήσεις του S2. Κατά συνέπεια, λόγω και συγκριτικά μεγαλύτερης αξιοπιστίας της τοποθέτησης του προηγούμενου αισθητήρα, επιλέγεται να παραλειφθεί από την επικείμενη ανάλυση.

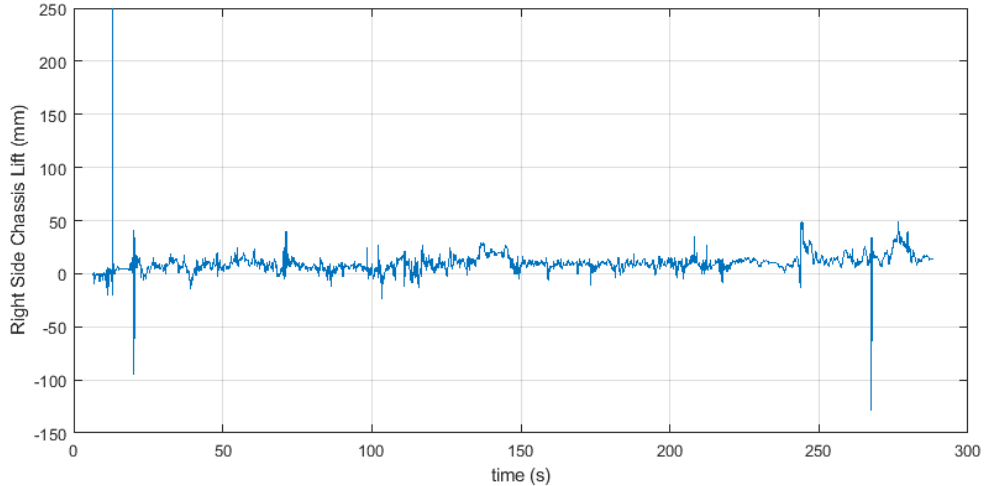
5.3 Ανάλυση Μετρήσεων Ανύψωσης Αμαξώματος & Κατακόρυφης Επιτάχυνσης

Ο Πίνακας 5-6 παρακάτω, εκθέτει τα στατιστικά μεγέθη των μετρήσεων του αισθητήρα S4 από τα εδώ συγκρινόμενα πειράματα. Το μετρούμενο φυσικό μέγεθος αυτό εξαρτάται άμεσα από την εγκάρσια γωνία κλίσης του οχήματος. Παράλληλα, η μετρούμενη εγκάρσια επιτάχυνση συνδέεται με την κλίση αυτή, εξαιτίας της υπερτιθέμενης συνιστώσας της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Λόγω της τοποθέτησης του αισθητήρα στη δεξιά πλευρά του οχήματος, ομοίως με τους αισθητήρες S1, S4, αναμένεται να παρουσιάζεται σημαντική συσχέτιση με τις μετρήσεις αυτών. Ωστόσο, όπως φαίνεται από το προηγούμενο πίνακα, όπου αναγράφεται ο συντελεστής συσχέτισης με τις μετρήσεις S1, η συσχέτιση αυτή είναι αξιόλογη μόνο στην περίπτωση του οχήματος V1. Μολαταύτα, μέσω της σύγκρισης των μετρήσεων, δεν γίνεται άμεσα αντιληπτή κάποια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων μελέτης. Η κύρτωση παρουσιάζεται και για αυτό το φυσικό μέγεθος, σχετικά αυξημένη στην περίπτωση του οδηγού D4, ενισχύοντας έτσι την ιδέα πως δύναται να διακρίνει τον πιο επιθετικό οδηγό. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες ως προς την εγκάρσια κλίση του οχήματος κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου, μικρή κλίση οδηγεί σε πρόκληση σημαντικού συστηματικού σφάλματος. Ταυτόχρονα, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η δέσμη laser του αισθητήρα δύναται να αποτυπώσει ανωμαλίες του οδοστρώματος οι οποίες μπορεί να μην γίνονται αισθητές από το ίδιο το όχημα ή τουλάχιστον όχι στον ίδιο βαθμό που υποδεικνύει η μέτρηση. Επομένως, μικρές διαφορές στην τροχιά των οχημάτων κατά τα πειράματα, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά διαφορετικές μετρήσεις ανύψωσης μεταξύ ίδιων διαδρομών. Τελικά, αφού η μέτρηση του μεγέθους αυτού είναι επιρρεπής σε έκτροπες τιμές, η εκτίμηση της κύρτωσης καθίσταται επίσης επιρρεπής σε σημαντικά συστηματικά σφάλματα. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5-12 παρατίθεται χρονοσειρά από ανεξάρτητο πείραμα επί του οδικού δικτύου, όπου διαμορφώθηκε πλήθος ύποπτων κορυφώσεων του σήματος. Η χρήση του οπτικού υλικού της διαδρομής, οδήγησε στη διαπίστωση ότι πρόκειται για ευδιάκριτες ανωμαλίες του οδοστρώματος, σαν αυτές οι οποίες

αναφέρθηκαν νωρίτερα κατά την ανάλυση στο πεδίο συχνότητας. Η κύρτωση σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει την υπέρμετρη τιμή 158.32, ενώ η λοξότητα εκτιμάται ίση με -5.08 , οπότε φανερώνεται άμεσα η παρουσία ανωμαλίας στις μετρήσεις. Συνεπώς, στην καλύτερη των περιπτώσεων, απαιτείται ιδιαίτερη προεπεξεργασία για την αξιοποίηση αυτού του αισθητήρα στην αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Επιπρόσθετα, η κυρίαρχη συμβολή της τύχης στη διαμόρφωση του σήματος καθιστά την χρήση του αισθητήρα δυσχερή για τους σκοπούς του παρόντος.

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	-3.02	-7.69	14.07	25.77	15.92	8.23
Διάμεσος	-1.19	-4.58	11.21	24.98	17.83	10.10
Ελάχιστο	-141.00	-142.29	-82.36	-68.77	-191.84	-133.39
Μέγιστο	48.46	76.36	110.50	140.42	91.47	104.25
Τυπική Απόκλιση	28.12	29.17	31.20	29.42	26.72	29.02
RMS	28.28	30.17	34.22	39.11	31.10	30.16
IQR	35.43	32.18	36.29	27.88	29.89	21.28
Κύρτωση	1.70	1.99	0.59	1.36	3.48	4.26
Λοξότητα	-0.98	-0.79	0.20	0.03	-0.76	-1.10
Συντ. Συσχέτισης	0.23	0.26	-0.05	-0.12	0.35	-0.05

Πίνακας 5-6: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων ανύψωσης αμαξώματος αισθητήρα S4 (mm)



Σχήμα 5-12: Παράδειγμα χρονοσειράς αισθητήρα S4

Όσον αφορά τις μετρήσεις κατακόρυφης επιτάχυνσης του ίδιου επιταχυνσιόμετρου (Πίνακας 5-7), αυτές πλήττονται από τα προβλήματα της τοποθέτησης. Το τελευταίο καθίσταται φανερό και από το αυξημένο μέτρο διάμεσου και μέσης τιμής των διαδρομών V2_D3_M1, V2_D4_M1 και V2_D1_M2, το οποίο υποδηλώνει την παρουσία μη αμελητέου συστηματικού σφάλματος. Πιθανολογείται πως η μέτρηση θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την εκτίμηση της επαφής των τροχών με το οδόστρωμα και κατά επέκταση του κινδύνου ανατροπής, όμως η βιβλιογραφία επικεντρώνεται στη μελέτη μέσω της εγκάρσιας επιτάχυνσης. Καταληκτικά, οι μετρήσεις αυτές εκτιμάται πως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μονάχα συνδυαστικά με αυτές άλλων αισθητήρων για την ακριβέστερη αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω ενός σύνθετου αλγορίθμου. Συνεπώς, οι μετρήσεις S6 θεωρούνται δευτερεύουσας σημασίας για τη διαδικασία αξιολόγησης. Αξίζει όμως να αναφερθεί η δυνατότητα χρήσης των μετρήσεων για την ανίχνευση ανωμαλιών του οδοστρώματος και την αξιοποίηση αυτού του περιστατικού για την περαιτέρω αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς, στα πλαίσια ενός αλγορίθμου κατηγοριοποίησης βασισμένου σε αναγνώριση και διάκριση συμβάντων [51].

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	0.0079	-0.0072	-0.0269	0.0171	-0.0037	-0.0231
Διάμεσος	0.0069	-0.0082	-0.0262	0.0164	-0.0030	-0.0207
Ελάχιστο	-0.2307	-0.2219	-0.2942	-0.2607	-0.1467	-0.2920
Μέγιστο	0.2748	0.2787	0.2818	0.2954	0.2866	0.2335

Τυπική Απόκλιση	0.0378	0.0352	0.0559	0.0509	0.0265	0.0475
RMS	0.0386	0.0359	0.0620	0.0537	0.0267	0.0528
IQR	0.0350	0.0298	0.0630	0.0496	0.0207	0.0388
Κύρτωση	7.1921	7.6018	2.6737	4.0542	12.1957	3.6093
Λοξότητα	0.6154	0.6499	0.2919	0.0488	0.9143	-0.3367

Πίνακας 5-7: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων κατακόρυφης επιτάχυνσης αισθητήρα S6 (g)

5.4 Ανάλυση Μετρήσεων Παραμόρφωσης

Αναφορικά στις μετρήσεις παραμόρφωσης της πρώτης στήριξης του βυτίου, τα στατιστικά μεγέθη τους αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5-8, Πίνακας 5-9). Οι τελευταίες, δεν εμφανίζουν σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των οδηγών, ανάμεσα στα πειράματα όπου ελήφθησαν. Όπως αναμένεται, οι παραμορφώσεις βρίσκονται σημαντικά ασθενέστερες στην περίπτωση του άδειου βυτίου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ελαφριά αλλά αισθητή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων επιτάχυνσης και παραμόρφωσης στους ίδιους άξονες. Πράγματι, ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ μετρήσεων S1/S10 και S2/S9 αντίστοιχα, βρίσκεται κοντά στο 0.2 για τα πειράματα V2_D3_M1, V2_D4_M1. Η συσχέτιση αυτή γίνεται μηδαμινή στην περίπτωση άδειας δεξαμενής (V2_D1_M2), υποδηλώνοντας πως οι εν λόγω μετρήσεις διαμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη του ρευστού στο βυτίο. Εν πάση περιπτώσει, η ανάλυση αυτή υποδεικνύει πως οι μετρήσεις αυτές δεν προσφέρουν τη δυνατότητα διάκρισης του οδηγού με την πιο ριψοκίνδυνη συμπεριφορά, τουλάχιστον μέσω των χρονοσειρών τους και των στατιστικών τους μεγεθών. Μολαταύτα, οφείλει να διερευνηθεί εάν η ανάλυση μετρήσεων από μεμονωμένα συμβάντα, χαρακτηριστικά της οδήγησης, δύναται να αναδείξει κάποια σχέση με την οδηγική συμπεριφορά. Ανεξαρτήτως, εφόσον αξιολογηθεί η συμπεριφορά του οδηγού μέσω διαφορετικών μέσων, παρουσιάζεται ενδιαφέρουσα η μελέτη της συσχέτισης της με τις μετρούμενες παραμορφώσεις και επομένως με τη φόρτιση ενός κρίσιμου δομικού μέλους του οχήματος.

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	-	-	-3.24	7.54	-	-0.46
Διάμεσος	-	-	-4.80	8.37	-	-0.55
Ελάχιστο	-	-	-87.59	-80.65	-	-69.47

Μέγιστο	-	-	97.49	103.83	-	70.05
Τυπική Απόκλιση	-	-	28.59	28.42	-	18.96
RMS	-	-	28.77	29.41	-	18.96
IQR	-	-	27.73	31.63	-	17.79
Κύρτωση	-	-	1.54	1.36	-	2.93
Λοξότητα	-	-	0.07	0.29	-	-0.24

Πίνακας 5-8: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων διαμήκους παραμόρφωσης αισθητήρα S9 ($\mu\text{m}/\text{m}$)

A/Π	V1_D3_M1	V1_D4_M1	V2_D3_M1	V2_D4_M1	V1_D2_M2	V2_D1_M2
Μέση Τιμή	-	-	-1.24	-5.64	-	0.23
Διάμεσος	-	-	-0.46	-6.14	-	-0.33
Ελάχιστο	-	-	-44.04	-44.73	-	-23.38
Μέγιστο	-	-	32.73	28.75	-	32.92
Τυπική Απόκλιση	-	-	11.44	11.03	-	7.70
RMS	-	-	11.50	12.39	-	7.70
IQR	-	-	11.29	11.32	-	7.66
Κύρτωση	-	-	1.73	1.56	-	1.86
Λοξότητα	-	-	-0.17	-0.34	-	0.68

Πίνακας 5-9: Στατιστικά μεγέθη μετρήσεων εγκάρσιας παραμόρφωσης αισθητήρα S10 ($\mu\text{m}/\text{m}$)

Κεφάλαιο 6 Συστηματική Αξιολόγηση της Οδηγικής Συμπεριφοράς

Στόχος αυτής της ενότητας, είναι η δόμηση ενός απλού αλγορίθμου για την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω των διατιθέμενων μετρήσεων, αξιοποιώντας τους αισθητήρες της διάταξης οι οποίοι προηγουμένως κρίθηκαν καταλληλότεροι. Αρχικά, αναπτύσσεται η λογική με την οποία επιχειρείται η κατηγοριοποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς. Επικείμενα, δομείται ο αλγόριθμος αξιολόγησης και υλοποιείται ως πρόγραμμα στο περιβάλλον MATLAB. Ακόλουθα, το τελευταίο χρησιμοποιείται για την συστηματική αξιολόγηση των μετρήσεων από τα τετελεσμένα πειράματα. Εκ των υστέρων, ερευνάται εάν υφίσταται κάποια αξιολογική σχέση μεταξύ οδηγικής συμπεριφοράς και των υπόλοιπων μετρούμενων μεγεθών, η οποία να δύναται να καταστήσει εύχρηστη την ανεξάρτητη ανάλυση τους προς κατηγοριοποίηση της συμπεριφοράς. Παράλληλα, ανεξάρτητα της επιτυχίας της προηγούμενης διαδικασίας, διερευνάται η δυνατότητα πρόσθετης χρήσης των αναξιολογήτων μετρήσεων για την βελτίωση της ακρίβειας και αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου. Σημαντικότερα όμως, επισημαίνονται οι δυνατότητες επέκτασης της έρευνας όπου αυτές διαπιστώνονται.

6.1 Εκτίμηση Κινδύνου Ανατροπής και Χρησιμότητα

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της ανάλυσης της προηγούμενης ενότητας, εκτιμάται πως οι μετρήσεις εγκάρσιας επιτάχυνσης του αισθητήρα S1, είναι ικανές και επαρκείς για την εκτίμηση του κινδύνου ανατροπής. Η εκτίμηση του κινδύνου επιδιώκεται να γίνει βάσει του περιθωρίου μεταξύ μετρούμενης εγκάρσιας επιτάχυνσης και της αντίστοιχης η οποία οδηγεί σε ανατροπή του οχήματος. Ωστόσο, η τελευταία διαφέρει μεταξύ οχημάτων διαφορετικής κατασκευής αλλά και μεταξύ των διαφόρων φύσεων μεταφερόμενων εμπορευμάτων και φυσικά των συνθηκών πλήρωσης της δεξαμενής [72]. Μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων είναι η μάζα του οχήματος και του φορτίου, το ύψος του κέντρου βάρους, το μετατρόχιο αλλά και το πλήθος αξόνων και τροχών επί αυτών. Ταυτόχρονα, το όριο ανατροπής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες του οδοστρώματος που διανύεται, από την τροχιά που αυτό επιβάλλει και από την ταχύτητα του οχήματος. Συγκεκριμένα, οι κρίσιμοι μη ελεγχόμενοι παράγοντες του δρόμου, είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ οδοστρώματος και επισώτρων, η κλίση του οδοστρώματος αλλά και ο ρυθμός υπερύψωσης του ή αλλιώς υπό διαφορετική διατύπωση, η εγκάρσια κλίση [73]. Τελευταία, ριζική παράμετρος είναι και η ακτίνα της κυκλικής καμπύλης που διανύει το όχημα κατά έναν ελιγμό. Στην περίπτωση όπου πρόκειται για μια στροφή και υπό την υπόθεση ότι η πορεία του οχήματος διατηρείται σε μια λωρίδα του δρόμου, η παράμετρος αυτή δε μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τις επιλογές του οδηγού δεδομένων και των αυξημένων διαστάσεων του οχήματος. Εντούτοις, εάν πρόκειται για έναν ελιγμό αλλαγής λωρίδας, η παράμετρος αυτή

εξαρτάται έντονα από τους χειρισμούς του οδηγού και συνεπώς την αντίστοιχη συμπεριφορά του.

Υφίστανται δύο μεγέθη τα οποία ποσοτικοποιούν, ως μέτρα εγκάρσιας επιτάχυνσης, τα όρια ευστάθειας ως προς την ανατροπή, η στατική οριακή τιμή ανατροπής (*SRT*) και η αντίστοιχη δυναμική (*DRT*) [74]. Η πρώτη, προσομοιάζει την τιμή εγκάρσιας επιτάχυνσης που προκαλεί ανατροπή κατά την εκτέλεση μιας σταθερής στροφής [72]. Η εκτίμηση της γίνεται μέσω της δοκιμής ανάκλισης (*tilt-test*), μέσω προσομοίωσης ή εναλλακτικά, μέσω ενός θεωρητικού μοντέλου [75]. Τουναντίον, το δεύτερο όριο καθορίζεται ως η τιμή που οδηγεί σε απώλεια επαφής όλων των τροχών της μιας πλευράς του οχήματος με το οδόστρωμα, κατά την εκτέλεση ενός μεταβατικού στροφικού ελιγμού. Η εύρεση του *DRT* δύναται να γίνει μέσω προσομοίωσης ή με τη χρήση ενός μοντέλου του οχήματος και της πρόσφυσης του στο οδόστρωμα [73]. Από τα αναφερθέντα, γίνεται εμφανές πως η τιμή της εγκάρσιας επιτάχυνσης η οποία οδηγεί σε ανατροπή ένα βυτιοφόρο όχημα δεδομένης κατασκευής και πλήρωσης, παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από την κατάσταση του οδοστρώματος και τις συνθήκες που αυτό διαμορφώνει. Συνεπώς, για τον ακριβή προσδιορισμό της οριακής τιμής ανατροπής, απαιτείται η γνώση ή εστω προσέγγιση κάποιων επιπρόσθετων πληροφοριών. Ειδικότερα, χαρακτηριστικών της γεωμετρίας και της ανάρτησης του οχήματος, της κλίσης του οδοστρώματος αλλά κυριότερα, του συντελεστή τριβής που παρέχει και τελικά της ακτίνας στροφής. Εικάζεται ότι ο ενδιαφερόμενος για τη διενέργεια της ανάλυσης, κατέχει τη γνώση των γεωμετρικών στοιχείων του οχήματος αλλά και τη δυνατότητα εξεύρεσης των ιδιομορφιών και των χαρακτηριστικών μεγεθών της ανάρτησης. Όσον αφορά το οδόστρωμα, γίνεται εδώ η υπόθεση ότι η εγκάρσια κλίση του δρόμου, στη χειρότερη περίπτωση, δε προσφέρει καμία βελτίωση του ορίου ανατροπής. Τότε, υπολείπεται κυρίως η επίγνωση του υλικού και της ποιότητας του οδοστρώματος, της εποχής, αλλά και των καιρικών συνθηκών, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην εκδήλωση βροχής, προκειμένου να καταστεί δυνατή μια ακριβής προσέγγιση του συντελεστή τριβής [76], [77]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεδομένων των αίθριων καιρικών συνθηκών κατά τα πειράματα, πιθανότατα θα επαρκούσε η προσέγγιση του τελευταίου με τη βοήθεια στατιστικών στοιχείων από το οδικό δίκτυο της πόλης ή της χώρας. Τελικά όμως, η εκτίμηση της ακτίνας στροφής από τα δεδομένα μετρούμενα μεγέθη είναι αδύνατη.

Λόγω των αναφερθέντων δυσκολιών, αλλά και της αδυναμίας ανίχνευσης και διαχωρισμού των ελιγμών μέσω των μετρήσεων, επιλέγεται να διερευνηθεί η δυνατότητα θεώρησης ενός ενιαίου ορίου ανατροπής για την εκτίμηση του κινδύνου ως απόρροια των χειρισμών του οδηγού. Η Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (UNECE), συμφώνησε εν έτει 2000 την απαίτηση από κάθε όχημα της κατηγορίας *N*, το οποίο αδειοδοτείται για πρώτη φορά αφότου τέθηκε σε ισχύ ο κανονισμός, να επιτυγχάνει ένα ελάχιστο *SRT* [78]. Η ελάχιστη τιμή καθορίσθηκε στα 4 m/s^2 , ισοδύναμα περίπου $0.408g$, για προσδιορισμό του *SRT* μέσω

δοκιμής ανάκλισης ή μέσω θεωρητικού υπολογισμού όπως περιγράφεται στο κανονισμό [79]. Τα έτη κατασκευής των οχημάτων τα οποία συμμετείχαν στα πειράματα δείχνουν πως πληρούν την προηγούμενη προδιαγραφή. Ταυτόχρονα, το *DRT* εκτιμήθηκε σε παλιότερες έρευνες βαρέων οχημάτων ότι δεν πέφτει κάτω από το 80% του *SRT* [72]. Οπότε εκ παρεκβολής, στη δυσμενέστερη περίπτωση, θα είναι ίσο με 0.326*g*. Η παρατήρηση αυτή λοιπόν, φανερώνει ότι θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην ανάλυση των μετρήσεων επιτάχυνσης οι οποίες προσεγγίζουν ή ξεπερνούν αυτή την τιμή. Παρόλα αυτά, η εκτίμηση του κινδύνου ανατροπής βάσει του περιθωρίου μεταξύ ενός οποιουδήποτε ενιαίου ορίου ανατροπής και της μετρούμενης εγκάρσιας επιτάχυνσης είναι ανακριβής. Για παράδειγμα, θεωρούνται δυο περιπτώσεις στροφής με πανομοιότυπες καμπύλες εγκάρσιων επιταχύνσεων, όπου στη μια το πραγματικό όριο ανατροπής υποτίθεται σημαντικά υψηλότερο. Προφανώς τότε, η βαθμολόγηση των ελιγμών θα είναι ίδια. Ωστόσο, το πραγματικό περιθώριο σε σχέση με το όριο ανατροπής είναι σημαντικά μεγαλύτερος στη μία εκ των περιπτώσεων. Οπότε, υπό τη σκοπιά της ανάλυσης, το ίδιο ισχύει και για τον αντίστοιχο κίνδυνο. Παράλληλα, τα διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων σπανιότατα παρουσιάζουν υπέρβαση της τιμής των 0.25*g* και με εξαίρεση την διαδρομή V2_D4_M1_TESTA που εξετάσθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δε προσεγγίζουν ιδιαίτερος το όριο ανατροπής που υποτέθηκε. Συνάγεται λοιπόν ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η θεώρηση του κινδύνου ανατροπής δε θα οδηγήσει σε διάκριση των συμπεριφορών των διαφορετικών οδηγών υπό διαφορετικές συνθήκες. Σε παρέκταση της ανάλυσης της προηγούμενης ενότητας, βρίσκεται ενδιαφέρον το ότι ο πιο επιθετικός οδηγός, ανάμεσα στα πειράματα με φορτίο, ανέπτυξε μεγαλύτερες εγκάρσιες επιταχύνσεις, μάλιστα προσεγγίζοντας το θεωρούμενο όριο ανατροπής στο πείραμα V2_D4_M1_TESTA. Μολαταύτα, δεδομένου του αυξημένου κινδύνου ανατροπής που αντιμετωπίζεται, οφείλει να ληφθεί υπόψιν. Για την πληρότητα λοιπόν του προς κατασκευή αλγορίθμου, ενσωματώνεται σε αυτόν η καταγραφή, απαρίθμηση και επισήμανση των περιστατικών κάθε πειράματος όπου η τιμή της επιτάχυνσης *S1* υπερβαίνει τα 0.3*g*.

6.2 Υπολογισμός Διαμήκους Επιτάχυνσης Οχήματος και Χρησιμότητα

Όσον αφορά τη διαμήκη επιτάχυνση, διαπιστώθηκε προηγούμενα ότι οι μετρήσεις αμφότερων των αισθητήρων είναι ακατάλληλες για τη διαδικασία διάκρισης και παραμετρικής αξιολόγησης των κρίσιμων συμβάντων πέδησης και επιτάχυνσης. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται ως εναλλακτική η λήψη της διαμήκους επιτάχυνσης μέσω αριθμητικής παραγωγίσις των μετρήσεων της αντίστοιχης ταχύτητας του αισθητήρα *S5*. Η αρκετά μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας η οποία χρησιμοποιήθηκε στη λήψη των μετρήσεων μεταφράζεται σε μικρή περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή μικρό χρονικό βήμα και άρα ανάλογα μικρή τάξη σφάλματος στη διαδικασία παραγωγίσις. Προκύπτει λοιπόν, ότι η διακριτοποίηση της παραγωγίσις της ταχύτητας με μια απλή προς τα πίσω διαφόριση είναι υπεραρκετή. Ο υπολογισμός γίνεται σε κάθε σημείο του αναλυόμενου συνόλου τιμών, πλην της αρχής, μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$a_{x,i} = \left(\frac{dV_x}{dt} \right)_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{T} \quad (6.1)$$

Η Σχέση (6.1) προκύπτει θεωρώντας το ανάπτυγμα Taylor γύρω από το σημείο με δείκτη i και αγνοώντας τους όρους ανώτερης τάξης, πρακτική δικαιολογούμενη από το μικρό χρονικό βήμα. Μετά από έλεγχο προέκυψε ότι το σχήμα αυτό δίνει πανομοιότυπα αποτελέσματα συγκριτικά με τα σχήματα που προκύπτουν με θεώρηση κεντρικής ή προς τα εμπρός διαφοράς. Μολαταύτα, η επιλογή αυτή απλοποιεί τη διαδικασία διότι κατά την αρχή λήψης μέτρησης το όχημα είναι σταθευμένο και άρα η επιτάχυνση στην αρχή είναι πράγματι μηδέν. Παράλληλα, όπως προαναφέρθηκε, η μέτρηση της ταχύτητας μεταβάλλεται κυρίως σε συχνότητες κάτω του $1Hz$ με αποτέλεσμα να προβάλλονται με υψηλή ανάλυση για τη συχνότητα δειγματοληψίας $200Hz$. Εξ αυτού, η χρήση σχημάτων διαφόρισης ανώτερης τάξης καθίσταται αναποτελεσματική όπως επιδείχθηκε κατόπιν δοκιμής.

Κατόπιν εκτέλεσης της παραπάνω διαδικασίας για τα διάφορα διαθέσιμα μετρητικά σύνολα, διαπιστώθηκε πως οι υπολογισμένες επιταχύνσεις περιέχουν σημαντικά σφάλματα. Ελέγχοντας τις αντίστοιχες ταχύτητες, παρατηρήθηκε ότι παρά τη χρήση φίλτρου, εξακολουθούν να εμπεριέχουν θόρυβο μικρού μέτρου, ο οποίος όμως στη συνέχεια ενισχύεται μέσω της διαδικασίας διαφόρισης και υπερτίθεται στην εκτίμηση της επιτάχυνσης. Το πρόβλημα έλαβε μεγάλες διαστάσεις στην περίπτωση των πειραμάτων τα οποία εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, μέσω της συνδυασμένης παρατήρησης των χρονοσειρών και του οπτικού υλικού, παρατηρείται ότι το σφάλμα ενισχύεται υπέρμετρα στην περίπτωση στροφών με ιδιαίτερα μεταβατικό χαρακτήρα και χαμηλή ταχύτητα. Κατά τους ελιγμούς αυτούς, εκδηλώνονται έντονες διακυμάνσεις και υπερακοντίσεις του μετρούμενου σήματος. Εμβαθύνοντας, η περιστροφή του τιμονιού οδηγεί σε μεταβολή του διανύσματος ταχύτητας έτσι ώστε τμήμα της διαμήκους ταχύτητας να μετατρέπεται σε αντίστοιχη εγκάρσια. Η χαμηλή ταχύτητα και οι σχετικά μεγάλες στροφές τιμονιού που επιβάλλει η διαμόρφωση του δρόμου σε συνδυασμό με την αδυναμία μέτρησης του αισθητήρα S5 σε ταχύτητες μικρότερες των $0.5 km/h$ μεταφράζονται σε έντονες μεταβολές της υπολογιζόμενης διαμήκους επιτάχυνσης. Εκτός αυτών των περιπτώσεων, αποδείχθηκε πως το φιλτράρισμα της ταχύτητας με μικρότερη συχνότητα αποκοπής δύναται να προσφέρει την επιζητούμενη λύση. Συγκεκριμένα, έχοντας κατά νου και τα προηγούμενα συμπεράσματα, επιλέχθηκε να θεσπιστεί συχνότητα αποκοπής ίση με $1Hz$. Για την αποφυγή εκδήλωσης αστάθειας στο φίλτρο, η μεμονωμένη τάξη του τέθηκε μικρή και ίση με 4, εν τέλει συγκροτώντας φίλτρο τάξης ίση με 8. Προκειμένου να εξακριβωθεί η επίδραση της αλλαγής αυτής, υπολογίζονται και ελέγχονται τα στατιστικά μεγέθη ενός συνόλου μετρήσεων μεγάλου μήκους κατόπιν εφαρμογής αμφοτέρων των φίλτρων. Η διαφορά είναι κατεξοχήν αμελητέα και επομένως αποδεκτή, όπως συνοψίζεται από τα παρακάτω στατιστικά μεγέθη (Πίνακας 6-1).

Φίλτρο	$f_c = 6\text{Hz}$	$f_c = 1\text{Hz}$
Μέγιστο	67.54	67.30
Διακύμανση	309.62	309.59
RMS	41.04	41.04
IQR	25.78	25.82
Κύρτωση	2.44	2.44
Λοξότητα	-0.61	-0.61

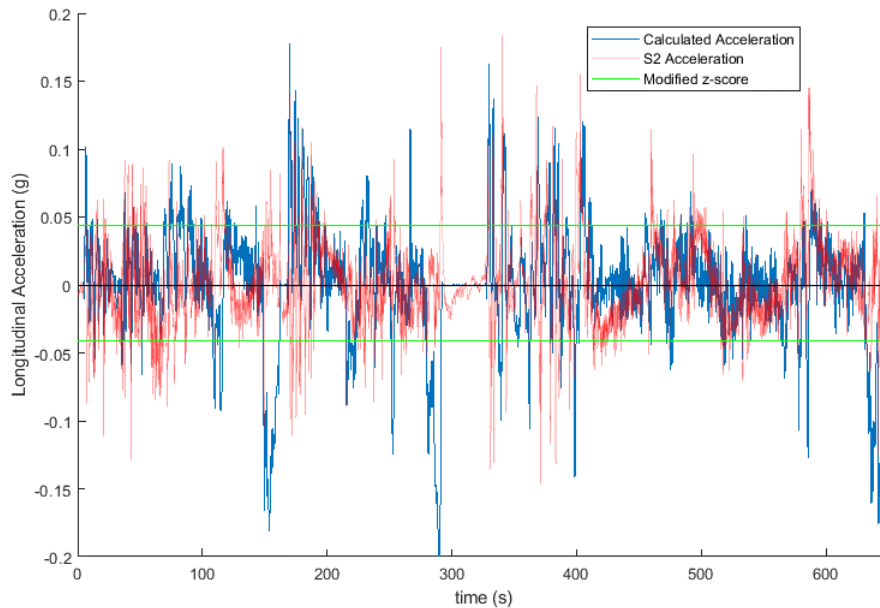
Πίνακας 6-1: Παράδειγμα στατιστικών μεγεθών φιλτραρισμένης διαμήκουσ ταχύτητας S5 (km/h)

Οι χρονοσειρές της υπολογιζόμενης διαμήκουσ επιτάχυνσης, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη μετρούμενη μέσω του S2, παρουσιάζονται στη συνέχεια για το αναλυόμενο πείραμα (Σχήμα 6-1) και για ένα εκ των πειραμάτων της δοκιμής TESTA (Σχήμα 6-2). Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις του αισθητήρα S2 υπέστησαν αντιστροφή πρόσημου, προκειμένου να παραστούν συμβατές με τις υπολογιζόμενες επιταχύνσεις. Από την ασυμφωνία μεταξύ των χρονοσειρών σε αμφοτέρα τα διαγράμματα, επιβεβαιώνεται η υποψία ότι οι μετρήσεις του S2 βρίσκονται ακατάλληλες για την κατηγοριοποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω παραμετρικής αξιολόγησης τους, χωρίς την πρότερη απόκτηση πρόσθετων πληροφοριών.

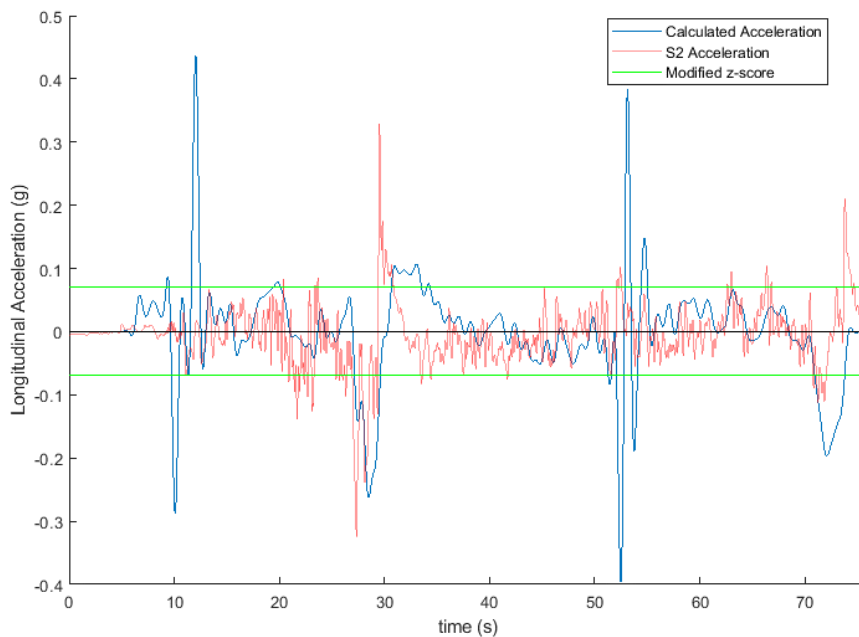
Επιπρόσθετα, στα διαγράμματα σχεδιάσθηκαν τα όρια κατηγοριοποίησης τιμών ως έκτροπων από τη μέθοδο τροποποιημένου *z-score* για $z_m = \pm 1.0$. Η επιλογή μικρής τιμής ελέγχου έγινε με σκοπό να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης του κριτηρίου για την ανίχνευση κρίσιμων οδηγικών συμβάντων. Όμως, η εμφανώς έντονη επίδραση την οποία έχουν οι έκτροπες τιμές στον καθορισμό των ορίων οδηγεί στο συμπέρασμα πως η χρήση ενός τέτοιου κριτηρίου συνεπάγεται διαφορετικό ορισμό αυτών των συμβάντων μεταξύ των διαφόρων συνόλων μετρήσεων. Φυσικά τότε, πλήττεται η δυνατότητα βαθμολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς σε κοινή κλίμακα μεταξύ διαφορετικών συνθηκών οδήγησης αλλά και οδηγών. Το πρόβλημα φαίνεται επί της ουσίας να πηγάζει από το σφάλμα υπολογισμού που νωρίτερα ανιχνεύθηκε κατά τις στροφές με χαμηλή ταχύτητα και με έντονο μεταβατικό χαρακτήρα. Μολαταύτα, ο περιορισμός των επιπτώσεων θα μπορούσε να γίνει μονάχα μέσω αμφιλεγόμενων ενεργειών, όπως το *Winsorization* των αντίστοιχων μετρήσεων. Παράλληλα, οι υπόλοιπες δύο μέθοδοι που παρουσιάστηκαν, ενέχουν τις ίδιες δυσχέρειες.

Κατά συνέπεια, η αναγνώριση των συμβάντων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης επιδιώχθηκε να γίνει με τη θέσπιση ορίων ίσων με $\pm 0.05g$. Για να εξασφαλισθεί ότι τα συμβάντα τα οποία καταγράφονται είναι πράγματι κρίσιμα, επιλέγεται η υιοθέτηση μιας ελάχιστης χρονικής διάρκειας για την οποία πρέπει να ξεπερνούνται τα όρια ώστε να θεωρηθεί ένα συμβάν ως

κρίσιμο. Εφόσον, η συντριπτική πλειοψηφία των συνεπειών που έχουν οι χειρισμοί του οδηγού εκδηλώνεται σε πολύ μικρές συχνότητες ή κάτω του 1Hz , ο καθορισμός μιας ελάχιστης χρονικής διάρκειας ίσης με 60sec παρουσιάζεται εύλογος. Ενδιαφέρον βρίσκεται το ότι με αυτό τον τρόπο παρακάμπτεται το πρόβλημα των υπερακοντίσεων που νωρίτερα περιεγράφηκε. Πράγματι, στις περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκε το φαινόμενο, οι αντίστοιχες κορυφώσεις του σήματος δεν ξεπέρασαν το θεσπιζόμενο όριο για μεγαλύτερο από το αναφερόμενο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 6-1: Χρονοσειρές διαμήκους επιτάχυνσης του πρώτου παραδείγματος



Σχήμα 6-2: Διάγραμμα χρονοσειρών διαμήκους επιτάχυνσης του δεύτερου παραδείγματος

6.3 Κατασκευή Αλγορίθμου Αξιολόγησης της Οδηγικής Συμπεριφοράς

Παραμένει ωστόσο το ερώτημα, πώς οφείλει να πραγματοποιηθεί η βαθμολόγηση των ανιχνευμένων συμβάντων. Για την επίλυση του, επιστρατεύεται η θεωρία του κύκλου τριβής, η οποία συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία [80]. Αναπόσπαστο τμήμα της θεωρίας είναι το διάγραμμα g-g ή αλλιώς το διάγραμμα εγκάρσιας – διαμήκους επιτάχυνσης του οχήματος. Σύμφωνα με αυτή, οι συνδυασμοί των επιταχύνσεων οι οποίοι διατηρούν την πρόσφυση του οχήματος, βρίσκονται εντός και στα όρια του κύκλου πρόσφυσης (ή έλλειψης πρόσφυσης) [81]. Η λογική πηγάζει από τη θεώρηση των δυνάμεων τριβής μεταξύ ελαστικών του οχήματος και οδοστρώματος, επεκτεινόμενη στις επιταχύνσεις μέσω του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα και του συντελεστή τριβής μεταξύ τελευταίων [47]. Εντούτοις, η ανάλυση δύναται να επεκταθεί με τη θεώρηση του στυλ οδήγησης (*driving style*), ελλείψει καταλληλότερης λέξης, ο οποίος καθιστά δυνατή την ανάλυση της οδηγικής συμπεριφοράς εκ παρεκβολής [82]. Η έννοια αυτή μέσω του αντίστοιχου της διαγράμματος, επιδιώκει να χαρτογραφηθεί η περιοχή οδηγικής εμπειρίας του χειριστή επί του διαγράμματος g-g. Παρά το επιστημονικό κάλλος και τη χρησιμότητα της θεωρίας, η παρούσα ανάλυση δυσχεραίνεται σημαντικά από την έλλειψη ερευνών και μεθοδολογιών οι οποίες να λαμβάνουν υπόψιν την ιδιαιτερότητα των βυτιοφόρων οχημάτων. Για τις ανάγκες της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, γίνονται κάποιες υποθέσεις, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή μια απλή αλλά αποτελεσματική βαθμολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς αξιοποιώντας τα διαθέσιμα μέσα. Εντούτοις, γίνεται η υπόθεση πως κατά τα συμβάντα πέδησης και επιτάχυνσης, τα οποία ανιχνεύονται από τις μετρήσεις, οι εγκάρσιες επιταχύνσεις είναι αμελητέες. Η χρήση της εγκάρσιας επιτάχυνσης μετρούμενης μέσω του S1, απορρίπτεται λόγω του ότι δεν αντιπροσωπεύεται ικανά η συνολική κίνηση του οχήματος μέσω αυτών. Τελικά, η βαθμολόγηση της επιθετικότητας των αναλυόμενων περιστατικών, γίνεται με βάση το μέτρο της υπολογιζόμενης διαμήκους επιτάχυνσης a_x και τα στοιχεία των παρακάτω πινάκων (Πίνακας 6-2, Πίνακας 6-3). Διευκρινίζεται ότι η χαμηλότερη βαθμολογία αντιστοιχεί σε περισσότερο επιθετική εκτέλεση των εν λόγω χειρισμών. Επίσης, η βαθμολογία των μετρήσεων των συμβάντων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης κάθε πειράματος, προκύπτει ως η μέση τιμή των αντίστοιχων μεμονωμένων βαθμολογιών κάθε σημείου μέτρησης.

Επιτάχυνση	Βαθμολογία
$a_x \leq 0.05g$	100
$0.2g > a_x > 0.05g$	$133.33 - 666.67 \cdot a_x$
$a_x \geq 0.2g$	0

Πίνακας 6-2: Πίνακας σχήματος βαθμολόγησης συμβάντων επιτάχυνσης

Επιβράδυνση	Βαθμολογία
$a_x \leq -0.05g$	100
$-0.05g < a_x < -0.25g$	$125 - 500 \cdot a_x $
$a_x \leq -0.25g$	0

Πίνακας 6-3: Πίνακας σχήματος βαθμολόγησης συμβάντων επιβράδυνσης

6.4 Υλοποίηση Αλγορίθμου και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Έχοντας κατασκευάσει τον αλγόριθμο, γίνεται η υλοποίηση του στο MATLAB και ακολούθως εφαρμόζεται για την αξιολόγηση των μετρήσεων επί οδικού δικτύου. Δυστυχώς, από τις τέσσερις διαθέσιμες σειρές πειραμάτων, στη μια παρουσιάζεται σφάλμα σύνδεσης του αισθητήρα διαμήκους ταχύτητας και επομένως η εφαρμογή είναι αδύνατη. Αναφέρεται ότι οι πειραματικές διαδρομές έχουν χρονική διάρκεια από 4 έως 10 λεπτά χονδρικά. Μολαταύτα, οι βαθμολογίες που υπολογίστηκαν μέσω του αλγορίθμου για τα διαθέσιμα δείγματα μετρήσεων, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 6-4 - Πίνακας 6-6). Τα πειράματα με την ίδια διαδρομή αποδεικνύεται, από τις μαγνητοσκοπήσεις αλλά και τις μετρήσεις, πως διαφέρουν σημαντικά λόγω των ξεχωριστών κυκλοφοριακών συνθηκών που αντιμετωπίστηκαν.

Διαδρομή	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Βαθμολογία Επιταχύνσεων	72.40	71.43	76.77	72.74	69.56	66.01
Βαθμολογία Επιβραδύνσεων	73.64	65.33	67.86	44.44	57.67	70.17

Πίνακας 6-4: Βαθμολογίες επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων πειραματικών διαδρομών V1_D4_M1

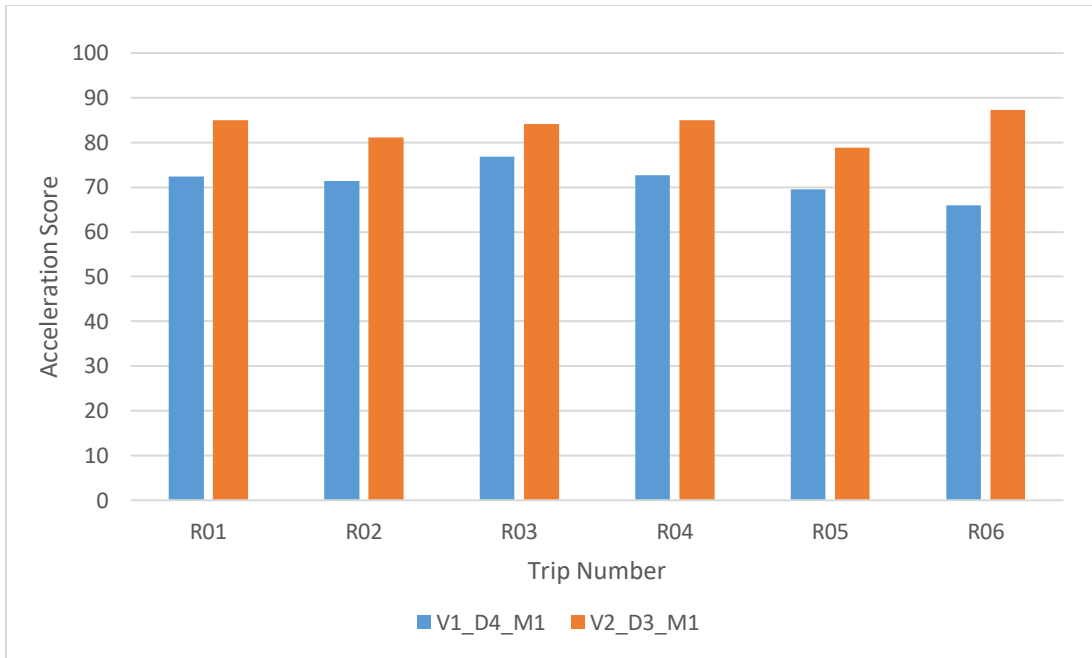
Διαδρομή	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Βαθμολογία Επιταχύνσεων	84.91	81.12	84.06	84.02	78.85	87.29
Βαθμολογία Επιβραδύνσεων	87.20	84.41	54.08	75.63	79.04	71.16

Πίνακας 6-5: Βαθμολογίες επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων πειραματικών διαδρομών V2_D3_M1

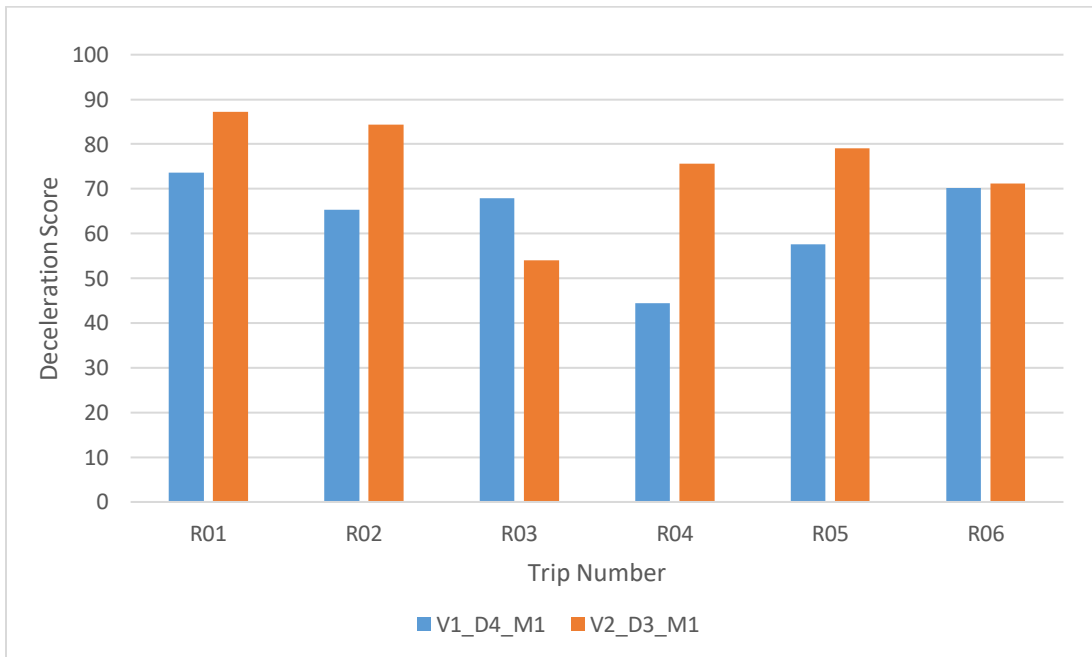
Διαδρομή	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Βαθμολογία Επιταχύνσεων	73.68	73.00	73.38	74.30	76.11	74.36
Βαθμολογία Επιβραδύνσεων	67.20	82.18	79.55	78.70	79.91	61.10

Πίνακας 6-6: Βαθμολογίες επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων πειραματικών διαδρομών V1_D2_M2

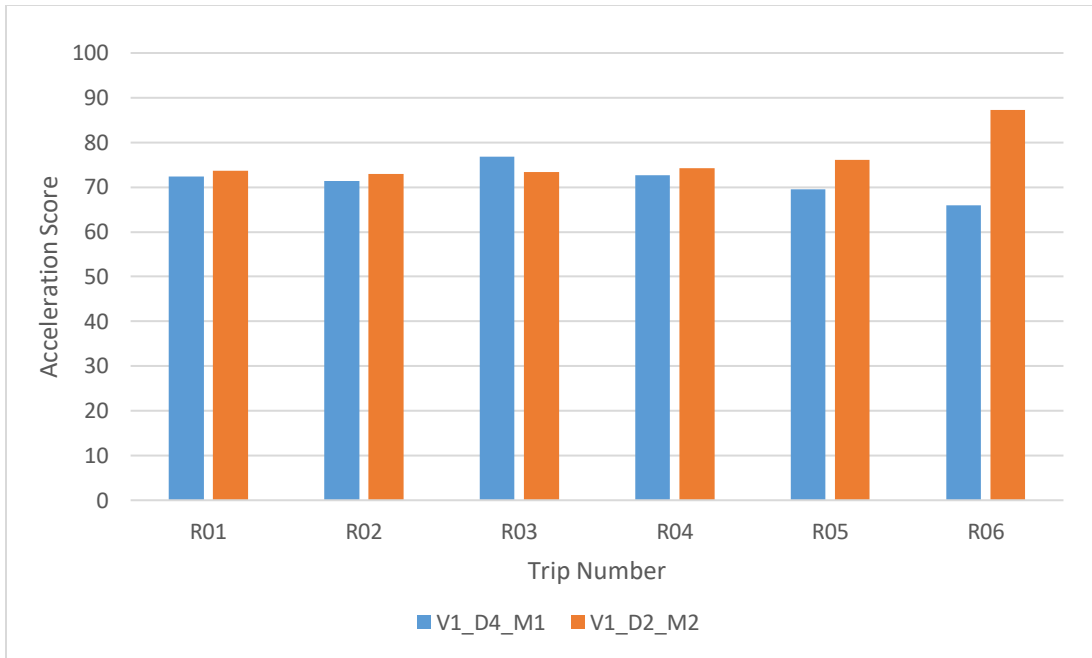
Ο αλγόριθμος κατέγραψε με επιτυχία από 7 έως 25 συμβάντα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης από τις μετρήσεις κάθε πειραματικής διαδρομής. Κατόπιν ελέγχου, διαπιστώνεται πως πράγματι τα ανιχνευμένα συμβάντα πληρούν τις συνθήκες οι οποίες ορίστηκαν. Για τη σύγκριση της βαθμολόγησης της διαδρομής V1_D4_M1 με την V2_D3_M1 και την V1_D2_M2 σχεδιάζονται τα αντίστοιχα ραβδογράμματα για τις επιταχύνσεις (Σχήμα 6-3, Σχήμα 6-5) και τις επιβραδύνσεις (Σχήμα 6-4, Σχήμα 6-6) όπως φαίνεται παρακάτω. Από τα ραβδογράμματα παρατηρείται ότι ο οδηγός D2 αξιολογείται σε γενικές γραμμές ως λιγότερο επιθετικός από τον D4. Ωστόσο, η διακύμανση της βαθμολογίας στην περίπτωση του πρώτου εμφανίζεται σημαντικά ασθενέστερη, υποδηλώνοντας διατήρηση σταθερής οδηγικής συμπεριφοράς μεταξύ διαδρομών. Τουναντίον, η ισχυρότερη διακύμανση των βαθμολογιών μεταξύ των διαδρομών του οδηγού D4 αποδίδει την εικόνα λιγότερο ομοιόμορφης συμπεριφοράς και κατά συνέπεια προϋποθέτει για το ότι η επιθετικότητα του εξαρτάται έντονα από τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Οι βαθμολογίες των πειραμάτων V1_D4_M1 και V2_D3_M1 καθιστούν εμφανές το γεγονός ότι ο οδηγός D3 είναι λιγότερο επιθετικός από τον D4, επαληθεύοντας την ορθότητα της διαδικασίας αξιολόγησης.



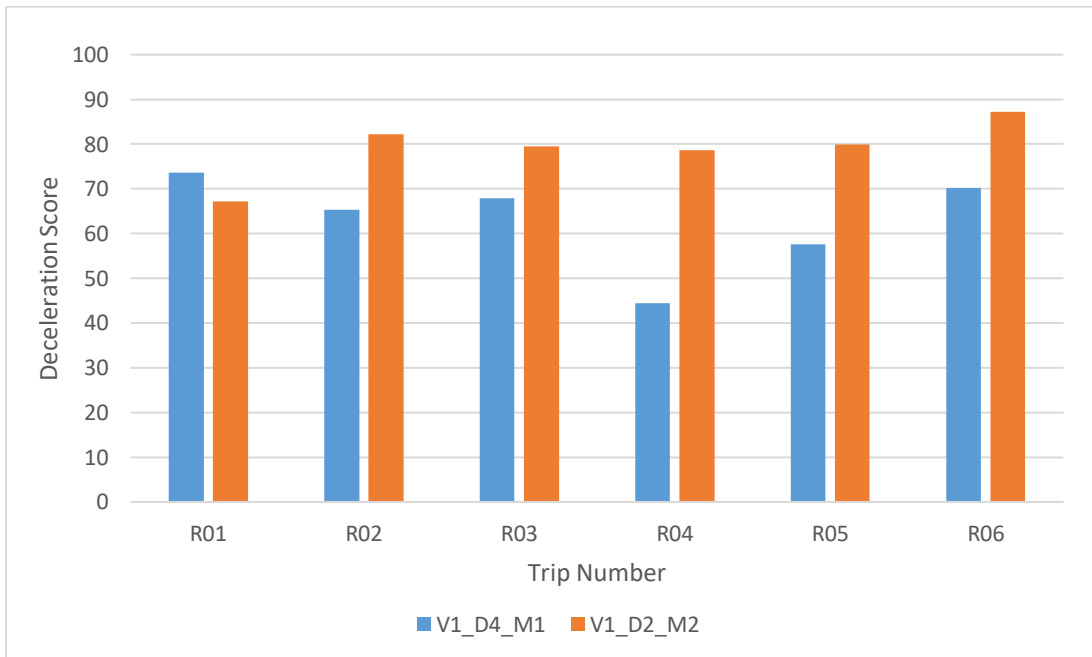
Σχήμα 6-3: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιταχύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V2_D3_M1



Σχήμα 6-4: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιβραδύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V2_D3_M1



Σχήμα 6-5: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιταχύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V1_D2_M2



Σχήμα 6-6: Ραβδόγραμμα βαθμολογίας επιβραδύνσεων διαδρομών πειραμάτων V1_D4_M1 και V1_D2_M2

Ενώ όμως τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά, παρατηρείται ότι η βαθμολόγηση με αυτόν τον τρόπο δύναται να αποκρύψει μεμονωμένα συμβάντα με ισχυρά μέτρα επιταχύνσεων τα οποία φυσικά θεωρούνται κρίσιμότητα για την οδική ασφάλεια. Αυτό δύναται να εκδηλωθεί όταν κατά τα υπόλοιπα ανιχνευμένα και αντίστοιχα συμβάντα, σημειώνονται συγκριτικά μικρά

μέτρα επιτάχυνσης επί ευρύ χρονικό διάστημα. Παρά το ότι αυτό το πρόβλημα δεν εκδηλώθηκε σε σημαντικό βαθμό για τις διατιθέμενες μετρήσεις, οφείλει να ελεγχθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου και με δείγματα μεγαλύτερου μεγέθους.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

Συνοψίζοντας, προσδιορίστηκαν τα δυναμικά μεγέθη ενός βυτιοφόρου οχήματος τα οποία, κατόπιν μέτρησης, προσφέρουν τη δυνατότητα διάκρισης της οδηγικής συμπεριφοράς και της διεξαγωγής κρίσιμων συμπερασμάτων για αυτήν. Ταυτόχρονα, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε η μεθοδολογία φιλτραρίσματος και ανάλυσης μετρήσεων αυτής της φύσης, δίνοντας έμφαση στο φαινόμενο του παφλασμού. Από την ανάλυση προέκυψε ότι οι μετρήσεις εγκάρσιας και διαμήκου επιτάχυνσης, καθώς και οι μετρήσεις ταχύτητας, αποτελούν κατάλληλα μέσα για την αξιολόγηση της επιθετικότητας της εκδηλωμένης οδηγικής συμπεριφοράς. Η παρατήρηση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των ερευνών της σχετικής βιβλιογραφίας.

Αναφορικά στην εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος ενός βυτιοφόρου οχήματος, η πιθανότητα ανατροπής του συμπεράθηκε πως αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμο παράγοντα. Η απόπειρα θέσπισης ενός ενιαίου ορίου ανατροπής για την εκτίμηση του εκάστοτε κινδύνου, ανέδειξε τη νοοτροπία αυτή ως λανθασμένη. Συγχρόνως, το γεγονός ότι κατά τα γενικά πειράματα οι εγκάρσιες επιταχύνσεις διατήρησαν σημαντικά περιθώρια ως προς το θεσμοθετημένο ελάχιστο όριο ανατροπής, σήμανε ότι η παραμετρική αξιολόγηση βάσει του τελευταίου δεν πρόκειται να οδηγήσει σε διάκριση των συμπεριφορών των διαφορετικών οδηγών οι οποίοι έχουν λάβει την απαραίτητη εκπαίδευση.

Η μέτρηση εγκάρσιας επιτάχυνσης από το βυτίο φανερώθηκε ως ικανή να καταδείξει τον κίνδυνο ανατροπής που ενέχει η κατάσταση του οχήματος. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις των επιταχύνσεων από το βυτίο του οχήματος αποδείχθηκε ότι δεν αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τα αντίστοιχα μεγέθη του οχήματος ως στιβαρό σώμα. Ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία των ερευνών της βιβλιογραφίας αξιοποιεί ακριβώς αυτές τις μετρήσεις, δηλαδή τις επιταχύνσεις του οχήματος ως σύνολο σε σχέση με το οδόστρωμα. Για τη διενέργεια λοιπόν της ανάλυσης κατά τον διαμήκη άξονα, επιλέχθηκε να εκτιμηθεί η διαμήκης επιτάχυνσης παραγωγίζοντας το σήμα της αντίστοιχης μετρούμενης ταχύτητας.

Η έννοια του κύκλου τριβής και κατά επέκταση αυτής του διαγράμματος τρόπου οδήγησης, φανερώθηκε πως δύνανται να προσφέρει λύση στο πρόβλημα αξιολόγησης της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω μετρήσεων δυναμικών μεγεθών. Συγκεκριμένα, αξιοποιώντας τις έννοιες αυτές, καταστρώθηκε ένα σχήμα βαθμολόγησης των συμβάντων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του οχήματος από τον εκάστοτε οδηγό με βάση την εκδηλωμένη επιθετικότητα. Προκειμένου τα αξιολογούμενα συμβάντα να είναι τα πλέον κρίσιμα για την οδηγική συμπεριφορά, επιλέχθηκε να αξιολογούνται μόνο συμβάντα τα οποία διαρκούν παραπάνω από ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα.

Κατόπιν κατάστρωσης του αλγορίθμου βαθμολόγησης, αυτός υλοποιήθηκε στο MATLAB και εφαρμόστηκε σε διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων ώστε να καταστεί εμφανής η λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητά του. Πράγματι, μεταξύ των οδηγών για τους οποίους οι πληροφορίες από την εκπαίδευση κατέδειξαν διαφορά στην επιθετικότητα τους κατά την οδήγηση, η βαθμολογία τους αποτύπωσε αυτή τη διαφορά όπως ακριβώς θα ήταν λογικά αναμενόμενο.

Στο μέλλον, επιδιώκεται καταρχήν ο εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων με μετρήσεις από περισσότερα πειράματα και διαδρομές. Καταρχήν, με τη διάθεση και μελέτη μεγαλύτερου πλήθους συνόλων μετρήσεων δύναται να επιβεβαιωθούν με μεγαλύτερη αξιοπιστία οι παρατηρήσεις της παρούσας έρευνας. Παράλληλα, θα μπορούσε έτσι να καταστεί δυνατή η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης και η διενέργεια της ανάλυσης των μετρήσεων σε επίπεδο εξαγωγής χαρακτηριστικών.

Εκτός αυτού, θεωρείται χρήσιμος ο ταυτόχρονος εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων και με πρόσθετες μετρήσεις επιπλέον μεγεθών. Συγκεκριμένα, εξετάζεται το ενδεχόμενο λήψης μετρήσεων από το ενσωματωμένο σύστημα διάγνωσης του οχήματος (*OBD*). Η προσθήκη αυτή θα καθιστούσε άμεσα εμφανείς τους χειρισμούς και τις εισόδους του οδηγού (π.χ. πίεση στα πεντάλ, γωνία τιμονιού) και εξ αυτού αποτελεί ενδιαφέρον ενδεχόμενο. Παράλληλα επίσης, θα καθιστούσε δυνατή την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου και τη μελέτη της συσχέτισης της με την επιθετική οδήγηση.

Συγχρόνως, ενδιαφέρουσα παρουσιάζεται η απόκτηση μετρήσεων δυναμικών μεγεθών του οχήματος μέσω ευφυούς κινητού. Παρά την μειωμένη ευκρίνεια αυτών των μετρήσεων λόγω περιορισμών στη συχνότητα δειγματοληψίας, αυτές αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τη συνολική κίνηση του οχήματος, ενώ επιπρόσθετα έχει αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων για την ανάλυση και αξιολόγησή τους. Εκτός αυτού το ευφύες κινητό προσφέρει τη δυνατότητα λήψης δεδομένων GPS για περαιτέρω επέκταση της έρευνας, λαμβάνοντας έτσι πληροφορίες για τις εκάστοτε συνθήκες οδοστρώματος.

Παράρτημα Α: Μεσοπερατό φίλτρο

Μια γνωστή μέθοδος σχεδιασμού φίλτρων διαφορετικού του χαμηλοπερατού τύπου επιλεκτικότητας συχνότητας από αυτή συνίσταται αρχικά στον σχεδιασμό ενός αντίστοιχου αναλογικού χαμηλοπερατού φίλτρου με την απαραίτητη τάξη και συχνότητα αποκοπής. Η συχνότητα αποκοπής στην περίπτωση του μεσοπερατού φίλτρου είναι η κεντρική συχνότητα της ζώνης διέλευσης ω_{cbc} , δηλαδή η συχνότητα στο κέντρο της τελευταίας. Τα επόμενα βήματα της μεθόδου είναι η εφαρμογή κατάλληλου μετασχηματισμού συχνότητας για τη χαρτογράφηση του αναλογικού πρότυπου του επιζητούμενου φίλτρου και τελικώς η εκτέλεση του διγραμμικού μετασχηματισμού ώστε να προκύψει το επιθυμητό ψηφιακό φίλτρο [32]. Ο μετασχηματισμός συχνότητας για την περίπτωση του μεσοπερατού δίνεται μέσω της αλλαγής μεταβλητής που εκφράζεται ως εξής:

$$S = \omega_{cl} \frac{s^2 + \omega_{cbl} \cdot \omega_{cbu}}{s \cdot BW} \quad (\text{Π.1})$$

Όπου στην παραπάνω σχέση, ω_{cl} είναι η συχνότητα αποκοπής του αρχέτυπου χαμηλοπερατού φίλτρου, ω_{cbl} και ω_{cbu} είναι οι κάτω και άνω αντίστοιχα συχνότητες αποκοπής της ζώνης αποκοπής του μεσοπερατού φίλτρου, ενώ με BW συμβολίζεται το εύρος της ζώνης διέλευσης δηλαδή το μέτρο της διαφοράς μεταξύ των δυο προηγούμενων μεγεθών. Η συνάρτηση του τετραγωνικού μεγέθους απόκρισης του φίλτρου λαμβάνει για την περίπτωση αυτή τη μορφή της ακόλουθης σχέσης:

$$H_b(j\omega) = 1 - \frac{1}{1 + \left[\frac{\omega \cdot BW}{(\omega^2 - \omega_{cbc}^2)} \right]^{2n}} \quad (\text{Π.2})$$

Επομένως, και στην περίπτωση αυτή καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της απαραίτητης τάξης συναρτήσει των απαιτήσεων οριοθέτησης της ζώνης διέλευσης όπως έγινε και στην περίπτωση του χαμηλοπερατού φίλτρου.

Παράρτημα Β: Τεχνικά στοιχεία αισθητήρων

Στο Παράρτημα αυτό δίνονται οι αρχές λειτουργίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.


Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης

Οι αισθητήρες γραμμικής επιτάχυνσης μετρούν γραμμική επιτάχυνση. Η αρχή λειτουργία τους στηρίζεται στη μέτρηση της δύναμης και στη σχέση που συνδέει τη δύναμη με την επιτάχυνση. Οι αισθητήρες μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης αποτελούνται από μια μάζα m η οποία ονομάζεται «σεισμική μάζα» και λόγω αδράνειας, καθώς επιταχύνεται προς μια κατεύθυνση, τείνει να κινηθεί στην αντίθετή της. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, η μάζα αυτή, κατά την κίνησή της είτε πιέζει έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο (πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο) είτε μεταβάλλει τη χωρητικότητα ενός πυκνωτή (χωρητικό επιταχυνσιόμετρο), είτε επιμηκύνει ένα ελατήριο με το οποίο είναι συνδεδεμένη (επιταχυνσιόμετρο με ελατήριο). Στα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, ο κρύσταλλος, καθώς πιέζεται παράγει ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο μετατρέπεται σε τάση ανάλογη της δύναμης που ασκείται σε αυτόν και, συνεπώς, ανάλογη της επιτάχυνσης. Στα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα η αδρανειακή μάζα, η οποία είναι μεταλλική και τυλιγμένη με πηνίο, τοποθετείται ανάμεσα σε δυο μαγνήτες. Η μετακίνησή της λόγω επιτάχυνσης, κατά τον διαμήκη άξονα, μεταβάλλει τη χωρητικότητα των πυκνωτών, μεταβάλλοντας το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο ώστε να επαναφέρει τη μάζα στην αρχική της θέση. Η τιμή του ρεύματος είναι η έξοδος του αισθητήρα και αντιστοιχεί στην επιτάχυνση. Τέλος, στα επιταχυνσιόμετρα με ελατήριο η επιμήκυνση ή η βράχυνση του ελατηρίου αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκείται σε αυτό και δίνει την τιμή της επιτάχυνσης.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης σε έναν και τρεις άξονες.

Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης σε έναν άξονα

Οι αισθητήρες μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης σε έναν άξονα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 8704B25T της εταιρείας Kistler. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι κατασκευασμένοι από τιτάνιο προκειμένου να είναι ελαφρείς και είναι κατάλληλοι για χρήση σε εργαστηριακό ή βιομηχανικό περιβάλλον για δοκιμές σε οχήματα, ανάλυση ταλαντώσεων σε περιστρεφόμενα μέλη κ.ά.. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π-1) παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα 8704B25T.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά		
	Μονάδα μέτρησης	<i>g</i>
	Εύρος (g)	± 25
	Φυσική συχνότητα (kHz)	54
	Εύρος συχνοτήτων 5% (kHz)	8
	Ευαισθησία (mV/g)	200
	Ρεύμα τροφοδοσίας (mA)	4
	Τάση τροφοδοσίας DC (V)	20...30
	Τάση εξόδου (V)	± 5

Πίνακας Π-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα 8704B25T Kistler

Αισθητήρες μέτρησης γραμμικής επιτάχυνσης σε τρεις άξονες

Για τη μέτρηση της γραμμικής επιτάχυνσης σε τρεις κάθετους μεταξύ τους άξονες χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες: (α) ο αισθητήρας 8792A25 της Kistler και (β) ο αισθητήρας FastTracer της Sequoia. Η αρχή λειτουργίας του πρώτου αισθητήρα βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και είναι κατάλληλος για τη μέτρηση ταλαντώσεων σε εργαστηριακό και βιομηχανικό περιβάλλον. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π-2) παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα αυτού (8792A25).

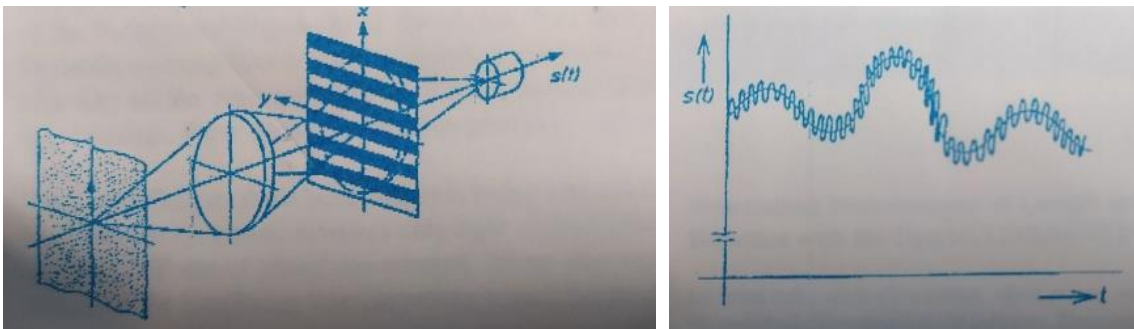
Τεχνικά Χαρακτηριστικά		
	Μονάδα μέτρησης	<i>g</i>
	Εύρος (g)	± 25
	Φυσική συχνότητα (kHz)	54
	Εύρος συχνοτήτων $\pm 5\%$ (Hz)	1-5000
	Ευαισθησία (mV/g)	200
	Ρεύμα τροφοδοσίας (mA)	2 – 20
	Τάση τροφοδοσίας DC (V)	2 – 30
	Τάση εξόδου (V)	± 5

Πίνακας Π-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα 8792A25 Kistler

Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής ταχύτητας

Οι αισθητήρες γραμμικής ταχύτητας είναι είτε οπτικοί είτε έχουν ενσωματωμένο γυροσκόπιο. Η αρχή λειτουργίας των οπτικών αισθητήρων μέτρησης της γραμμικής ταχύτητας στηρίζεται στο φαινόμενο Doppler, όπου ένα κύμα εκπέμπεται προς το κινούμενο αντικείμενο, ανακλάται σε αυτό και επιστρέφει. Η ταχύτητα υπολογίζεται από τη διαφορά του ανακλώμενου μήκους κύματος από το εκπεμπόμενο.

Το κινούμενο αντικείμενο προβάλλεται σε πλέγμα (Σχήμα Π-1). Ο φακός εστίασης που βρίσκεται απέναντι από το πλέγμα συλλέγει το φως και το κατευθύνει σε ένα σύστημα οπτικού πλέγματος όπου και ανιχνεύεται. Παράγεται προβαλλόμενη λεπτομέρεια του αντικείμενο η οποία κινούμενη παράγει μια διαμόρφωση τορεύματος. Κάθε ημιτονοειδής περίοδος σήματος αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη απόσταση που καλύπτεται από το κινούμενο αντικείμενο. Η συχνότητα του σήματος είναι ανάλογη με την ταχύτητα του αντικειμένου ($f = \frac{m}{g} \cdot u$).



(α)


(β)

Σχήμα Π-1: (α) Αρχή λειτουργίας αισθητήρα μέτρησης γραμμικής ταχύτητας και (β) Αναπαράσταση φωτορεύματος

Για τη μέτρηση της γραμμικής ταχύτητας των βυτιοφόρων οχημάτων χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας μέτρησης σε έναν άξονα και συγκεκριμένα τοποθετημένο ώστε να μετράει στη διαμήκη κατεύθυνση.

Αισθητήρας μέτρησης γραμμικής ταχύτητας σε έναν άξονα

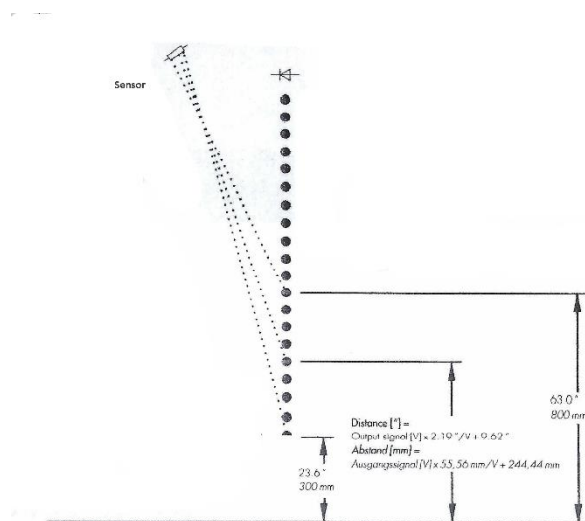
Για τη μέτρηση της γραμμικής ταχύτητας σε έναν άξονα χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας LC-E της Datron. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας λειτουργεί με ακρίβεια της τάξης του $\pm 0.1\%$ σε εξαιρετικά μεγάλο εύρος ταχυτήτων (0.5 – 400 km/h). Λόγω του μικρού μεγέθους και βάρους του προσφέρει το πλεονέκτημα της ευελιξίας του οχήματος σε πραγματικές δυναμικές δοκιμές. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π-3) παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα LC-E, Datron.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά		
	Μονάδα μέτρησης	km/h (kph)
	Εύρος (kph)	0.5-400
	Απόσταση λειτουργίας (mm)	300±60
	Έξοδος σήματος (pulses/m)	0.1...460
	Τάση τροφοδοσίας DC (V)	11.5 - 14.5

Πίνακας Π-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα L-CE

Αισθητήρας μέτρησης ύψους

Η λειτουργία των αισθητήρων ύψους στηρίζεται στις οπτικές ιδιότητες δέσμης υπέρυθρου φωτός και στην αρχή της τριγωνοποίησης. Οι αποστάσεις ορίζονται με τρίγωνα των οποίων οι πλευρές εξαρτώνται από τις μετρούμενες αποστάσεις. Ένας πομπός και ένας δέκτης είναι εγκατεστημένοι στον αισθητήρα. Η δίοδος του πομπού στέλνει μια ακτίνα υπέρυθρου φωτός, μέσω φακού, στο οδόστρωμα. Η ακτίνα ανακλάται από το οδόστρωμα, συγκεντρώνεται από έναν φακό και φτάνει στον δέκτη. Η τιμή του σήματος εξόδου του αισθητήρα διαμορφώνεται από τη θέση του σημείου πρόσπτωσης της ακτίνας στον δέκτη και τη μεταβολή της. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα.




Σχήμα Π-2: Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα μέτρησης απόστασης / ύψους

Για τη μέτρηση ύψους χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες από την ίδια εταιρεία, συγκεκριμένα το μοντέλο ονομαζόμενο ως HF-500C.

HF-500C

Ο αισθητήρας μέτρησης ύψους HF-500C της εταιρίας CORSSYS DARTON είναι σχεδιασμένος ώστε να χρησιμοποιείται σε δυναμικές δοκιμές οχημάτων όπου απαιτούνται μετρήσεις ακριβείας για μεταβλητές όπως, το ύψος οδήγησης, η μετατόπιση, η συμπίεση των ελαστικών, γωνία camber και η αναπήδηση του ελαστικού. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Π-4) παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα HF-500C.

<i>Τεχνικά Χαρακτηριστικά</i>		
	<i>Μονάδα μέτρησης</i>	<i>mm</i>
	<i>Εύρος (mm)</i>	<i>125-625</i>
	<i>Γραμμικότητα (%)</i>	<i>±0.2</i>
	<i>Εύρος συχνοτήτων δειγματοληψείας (kHz)</i>	<i>1 – 8</i>

Πίνακας Π-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα HF-500C

Βιβλιογραφία

- [1] Farooq, D., Moslem, S., Faisal Tufail, R., Ghorbanzadeh, O., Duleba, S., Maqsoom, A., & Blaschke, T. (2020). Analyzing the importance of driver behavior criteria related to road safety for different driving cultures. *International journal of environmental research and public health*, 17(6), 1893.
- [2] Săucan, D. Ş., Micle, M. I., Popa, C., & Oancea, G. (2012). Violence and aggressiveness in traffic. *Procedia-social and behavioral sciences*, 33, 343-347.
- [3] Barr, L., Howarth, H., Popkin, S., & Carroll, R. J. (2005). A review and evaluation of emerging driver fatigue detection measures and technologies. *National Transportation Systems Center, Cambridge. US Department of Transportation, Washington*.
- [4] Kang, H. B. (2013). Various approaches for driver and driving behavior monitoring: A review. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops* (pp. 616-623).
- [5] Uras, R. Z. (1995). *Sloshing analysis of viscous liquid storage tanks* (No. ANL/RE/CP-85929; CONF-950740-63). Argonne National Lab., IL (United States).
- [6] Engineering ToolBox (2003). *Liquids - Kinematic Viscosities*. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/kinematic-viscosity-d_397.html
- [7] Pape, D., Thornton, B., & Yugulis, K. (2016). *Slosh characteristics of aggregated intermediate bulk containers on single-unit trucks* (No. FMCSA-RRT-16-006). United States. Department of Transportation. Federal Motor Carrier Safety Administration. Office of Analysis, Research, and Technology.
- [8] Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 41(3), 1-58.
- [9] CHARU, C. A. (2017). *OUTLIER ANALYSIS*. Springer.
- [10] Ghosh, D., & Vogt, A. (2012, July). Outliers: An evaluation of methodologies. In *Joint statistical meetings* (Vol. 2012).
- [11] Limb, B. J., Work, D. G., Hodson, J., & Smith, B. L. (2017). The Inefficacy of Chauvenet's Criterion for Elimination of Data Points. *Journal of Fluids Engineering*, 139(5).
- [12] Maples, M. P., Reichart, D. E., Konz, N. C., Berger, T. A., Trotter, A. S., Martin, J. R., ... & Salemi, C. P. (2018). Robust chauvenet outlier rejection. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 238(1), 2.

- [13] Ross, S. M. (2003). Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data. *Journal of engineering technology*, 20(2), 38-41.
- [14] Porter, K., Hamburger, R., & Kennedy, R. (2007). Practical development and application of fragility functions. In *Structural engineering research frontiers* (pp. 1-16).
- [15] Hodge, V., & Austin, J. (2004). A survey of outlier detection methodologies. *Artificial intelligence review*, 22(2), 85-126.
- [16] Domański, P. D. (2020). Study on statistical outlier detection and labelling. *International Journal of Automation and Computing*, 17(6), 788-811.
- [17] Vasconcelos, I., Vasconcelos, R. O., Olivieri, B., Roriz, M., Endler, M., & Junior, M. C. (2017). Smartphone-based outlier detection: a complex event processing approach for driving behavior detection. *Journal of Internet Services and Applications*, 8(1), 1-30.
- [18] Hoaglin, D. C. (2003). John W. Tukey and data analysis. *Statistical Science*, 311-318.
- [19] Park, J., Choi, S., & Jung, H. M. (2020). Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea. *Applied Sciences*, 10(19), 6754.
- [20] Kline, R. B. (2015). *Principles and practice of structural equation modeling*. Guilford publications.
- [21] Balakrishnan, N., & Lai, C. D. (2009). *Continuous bivariate distributions*. Springer Science & Business Media.
- [22] Westfall, P. H. (2014). Kurtosis as peakedness, 1905–2014. RIP. *The American Statistician*, 68(3), 191-195.
- [23] Giller, G. L. (2005). A generalized error distribution.
- [24] Ashour, S. K., & Abdel-hameed, M. A. (2010). Approximate skew normal distribution. *Journal of Advanced Research*, 1(4), 341-350.
- [25] Sarmad, M. (2006). *Robust data analysis for factorial experimental designs: Improved methods and software* (Doctoral dissertation, Durham University).
- [26] Crosby, T. (1994). How to detect and handle outliers.
- [27] Figliola, R. S., & Beasley, D. E. (2015). *Theory and design for mechanical measurements*. John Wiley & Sons.
- [28] Smith, S. (2003). *Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists*. Elsevier.
- [29] Seifert, K., & Camacho, O. (2007). Implementing positioning algorithms using accelerometers. *Freescale Semiconductor*, 1, 13.
- [30] Webster, J. G. (Ed.). (1999). *The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook*. Springer Science & Business Media.

- [31] Ellis, G. (2012). *Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers*. Butterworth-Heinemann.
- [32] Hayes, M. H. (1999). *Schaum's outline of theory and problems of digital signal processing*. Mc Graw Hill.
- [33] Arumugam, S., & Bhargavi, R. (2019). A survey on driving behavior analysis in usage based insurance using big data. *Journal of Big Data*, 6(1), 1-21.
- [34] A. V Oppenheim, R. W. Schaffer, and J. R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2009.
- [35] Bogdan, M. (2015). LabVIEW modeling and simulation, of the digital filters.
- [36] Parks, T. W., & Burrus, C. S. (1987). *Digital filter design*. Wiley-Interscience.
- [37] Oppenheim, A. V. (1978). Applications of digital signal processing. *Englewood Cliffs*.
- [38] Coonen, J. T. (1984). *Contributions to a proposed standard for binary floating-point arithmetic (computer arithmetic)* (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).
- [39] Gustafsson, F. (1996). Determining the initial states in forward-backward filtering. *IEEE Transactions on signal processing*, 44(4), 988-992.
- [40] Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons.
- [41] Piersol, A. G., & Paez, T. L. (2010). *Harris' shock and vibration handbook*. McGraw-Hill Education.
- [42] Delice, I. I., & Ertugrul, S. (2007, June). Intelligent modeling of human driver: A survey. In *2007 IEEE intelligent vehicles symposium* (pp. 648-651). IEEE.
- [43] Weir, D. H., & McRuer, D. T. (1968). *A theory for driver steering control of motor vehicles* (No. HS-005 311).
- [44] Naude, C., Serre, T., Dubois-Lounis, M., Fournier, J. Y., Lechner, D., Guilbot, M., & Ledoux, V. (2017). Acquisition and analysis of road incidents based on vehicle dynamics. *Accident Analysis and Prevention*.
- [45] Liu, J., Khattak, A., Han, L., & Yuan, Q. (2020). How much information is lost when sampling driving behavior data? Indicators to quantify the extent of information loss. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*
- [46] Grimberg, E., Botzer, A., & Musicant, O. (2020). Smartphones vs. in-vehicle data acquisition systems as tools for naturalistic driving studies: a comparative review. *Safety science*, 131, 104917.

- [47] Eboli, L., Mazzulla, G., & Pungillo, G. (2016). Combining speed and acceleration to define car users' safe or unsafe driving behaviour. *Transportation research part C: emerging technologies*, 68, 113-125.
- [48] Mumcuoğlu, M. E. (2019). *Driving behavior classification for Heavy-Duty vehicles using LSTM Networks* (Doctoral dissertation).
- [49] Jurecki, R. S., & Stańczyk, T. L. (2021). A Methodology for Evaluating Driving Styles in Various Road Conditions. *Energies*, 14(12), 3570.
- [50] Liu, R., Zhao, X., Zhu, X., & Ma, J. (2019). Statistical characteristics of driver acceleration behaviour and its probability model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 09544070211018039.
- [51] Li, Y., Xue, F., Feng, L., & Qu, Z. (2017). A driving behavior detection system based on a smartphone's built-in sensor. *International Journal of Communication Systems*, 30(8), e3178.
- [52] Wu, X., Zhou, J., An, J., & Yang, Y. (2018, March). Abnormal driving behavior detection for bus based on the Bayesian classifier. In *2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)* (pp. 266-272). IEEE.
- [53] Zhang, D. (2017). *Vehicle Parameters Estimation and Driver Behavior Classification for Adaptive Shift Strategy of Heavy Duty Vehicles* (Doctoral dissertation, Clemson University).
- [54] Warren, J., Lipkowitz, J., & Sokolov, V. (2017). Clusters of Driving Behavior from Observational Smartphone Data. *arXiv e-prints*, arXiv-1710.
- [55] Brombacher, P., Masino, J., Frey, M., & Gauterin, F. (2017, March). Driving event detection and driving style classification using artificial neural networks. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 997-1002). IEEE.
- [56] Zeeman, A. S., & Booyesen, M. J. (2013, October). Combining speed and acceleration to detect reckless driving in the informal public transport industry. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)* (pp. 756-761). IEEE.
- [57] Nuswantoro, F. M., Sudarsono, A., & Santoso, T. B. (2020, September). Abnormal Driving Detection Based on Accelerometer and Gyroscope Sensor on Smartphone using Artificial Neural Network (ANN) Algorithm. In *2020 International Electronics Symposium (IES)* (pp. 356-363). IEEE.
- [58] Jung, J. H., Yoon, H. S., & Lee, C. Y. (2015). Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular tank. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(3), 580-594.

- [59] Jaiswal, O. R., Kulkarni, S., & Pathak, P. (2008, October). A study on sloshing frequencies of fluid-tank system. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 12-17).
- [60] Zheng, X. L., Zhang, H., Ren, Y. Y., Wei, Z. H., & Song, X. G. (2017). Rollover stability analysis of tank vehicles based on the solution of liquid sloshing in partially filled tanks. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 1687814017703894.
- [61] Vetterli, M., Kovačević, J., & Goyal, V. K. (2014). *Foundations of signal processing*. Cambridge University Press.
- [62] Frigo, M., & Johnson, S. G. (1997). The Fastest Fourier Transform in the West.
- [63] The MathWorks, I. (2021). *Signal Processing Toolbox: Reference (r2021a)*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/signal/>
- [64] Rao, K. R., Kim, D. N., & Hwang, J. J. (2010). Fast Fourier transform: algorithms and applications.
- [65] Cerna, M., & Harvey, A. F. (2000). *The fundamentals of FFT-based signal analysis and measurement*. Application Note 041, National Instruments.
- [66] Jiao, L. (2013). Vehicle model for tyre-ground contact force evaluation.
- [67] Advanced Highway Maintenance and Construction Technology (AHMCT) Research Center (2018). Natural Frequencies of Pickups and Medium and Heavy Trucks for Use in Component Design. Caltrans Division of Research, Innovation and System Information.
- [68] McKnight, A. J., & Bahouth, G. T. (2008). Analysis of large truck rollover crashes. In *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference* (Vol. 52, p. 281). Association for the Advancement of Automotive Medicine.
- [69] RAO, N. V. (2005). *An Approach To Rollover Stability In Vehicles Using Suspension Relative Position Sensors And Lateral Acceleration Sensors* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- [70] Spiric, G. (2014). Algorithm evaluation for road anomaly detection and wear estimation on trucks using an accelerometer.
- [71] Jazar, R. N. (2017). *Vehicle dynamics: theory and application*. Springer.
- [72] D'ALESSANDRO, V. I. N. C. E. N. Z. O. (2012). Modeling of tank vehicle dynamics by fluid sloshing coupled simulation.
- [73] Xin, T., Xu, J., Gao, C., & Sun, Z. (2021). Research on the speed thresholds of trucks in a sharp turn based on dynamic rollover risk levels. *PLoS one*, 16(8), e0256301.
- [74] Dahlberg, E. (2000). A method determining the dynamic rollover threshold of commercial vehicles. *SAE transactions*, 789-801.

- [75] Prem, H., Mai, L., & Brusza, L. (2006, June). Tilt testing of two heavy vehicles and related performance issues. In *International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, 9th*.
- [76] Σκλαβούνος, Δ. (2020). Εργαστηριακή διερεύνηση των εποχιακών μεταβολών της ολισθηρότητας σε ασφαλοτάπητες οδοστρωμάτων.
- [77] Derbel, O. (2016). Driver behavior assessment based on the GG diagram in the DVE system. *IFAC-PapersOnLine, 49(11)*, 89-94.
- [78] Billing, J. R., Patten, J. D., & Billing, J. R. (2005). An assessment of tank truck roll stability. *Report TP, 14237*.
- [79] GAS, U. C. N. (2008). Concerning The Adoption Of Uniform Technical Prescriptions For Wheeled Vehicles, Equipment And Parts Which Can Be Fitted And/Or Be Used On Wheeled Vehicles And The Conditions For Reciprocal Recognition Of Approvals Granted On The Basis Of These Prescriptions*.
- [80] Mahapatra, G., & Kumar, A. M. (2018). Defining Driving Behaviour Using Friction-Circle concept: An Experimental Study. *EUROPEAN TRANSPORT-TRASPORTI EUROPEI*, (67).
- [81] Vaiana, R., Iuele, T., Astarita, V., Caruso, M. V., Tassitani, A., Zaffino, C., & Giofrè, V. P. (2014). Driving behavior and traffic safety: an acceleration-based safety evaluation procedure for smartphones. *Modern Applied Science, 8(1)*, 88.
- [82] Colombo, T., Panzani, G., Savaresi, S. M., & Paparo, P. (2017, August). Absolute driving style estimation for ground vehicles. In *2017 IEEE conference on control technology and applications (CCTA)* (pp. 2196-2201). IEEE.