



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Οχημάτων

Διπλωματική εργασία

Παπαϊωάννου Γεώργιος

**Τεχνικές μετρήσεις δυνάμεων που ασκούνται σε
ελαστικοφόρους τροχούς βαρέων οχημάτων**

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Δ. Κουλοχέρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται ο πειραματικός υπολογισμός των ασκούμενων δυνάμεων στους οπίσθιους ελαστικοφόρους τροχούς ενός βαρέος οχήματος κατηγορίας N2. Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορες πειραματικές μέθοδοι προσδιορισμού των ασκούμενων δυνάμεων στους τροχούς είτε με εξοπλισμό τοποθετημένο πάνω στο όχημα είτε στο δρόμο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται, στην διπλωματική αυτή, βασίζεται στην μέτρηση των διατμητικών παραμορφώσεων του άξονα μέσω της τοποθέτησης επιμηκυνσιομέτρων και των κάθετων επιταχύνσεων των οπίσθιων τροχών με την χρήση επιταχυνσιομέτρων. Μετά από την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού διαδρομών και την αξιοποίηση των δεδομένων, γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των δυνάμεων που υπολογίστηκαν και έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και κατ' επέκταση της πειραματικής διαδικασίας. Με σκοπό να μελετηθεί σε βάθος η συγκεκριμένη μέθοδος, υπολογίστηκαν οι δυνάμεις σε διαφορετικές διεγέρσεις (στροφή, επιτάχυνση, κεκλιμένος δρόμος, βηματική διέγερση και ολοκληρωμένες διαδρομές).

Techniques for Measuring Dynamic Tire Forces Generated by Heavy Vehicles

Abstract

In this diploma thesis, the main subject is the experimental evaluation of the forces applied to the rear wheels of a heavy vehicle, category N2. In the past, many similar methods have been developed either using a vehicle based instrumentation system or a road based. The method developed in this thesis is based on the measurement of the shear strains of the axle, using strain gauges, and the measurement of the vertical accelerations of the wheel, using accelerometers. After a great number of conducted road tests and the use of the obtained data, the resulted forces applied on both the rear wheels are compared in order to understand their behavior and the reliability of the results is questioned. In order to evaluate the method in depth, a variety of road tests were conducted (accelerating, cornering, road with a slope, step input and complete road tests).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΩΤΡΩΝ	4
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	4
1.2.1 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω της Μέτρησης της Πίεσης των Ελαστικών	4
1.2.2 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω της Μέτρησης της Μετατόπισης των Τροχών	5
1.2.3 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω Μέτρησης της Επιτάχυνσης των Τροχών	5
1.2.4 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω Μέτρησης των Παραμορφώσεων του Άξονα	6
1.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	10
1.3.1 Βασικοί Παράμετροι Μοντελοποίησης Ελαστικών	11
1.3.2 Μαθηματικά Μοντέλα (MF Models) για τον Υπολογισμό των Εγκάρσιων Δυνάμεων	12
1.3.3 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Models) για τον Υπολογισμό των Εγκάρσιων Δυνάμεων	13
1.3.4 Μοντέλα Ελαστικών για τον Υπολογισμό των Κάθετων Δυνάμεων	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ	16
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2.2 ΑΝΑΦΟΡΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	17
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ MGCPLUS	17
2.4 ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ STRAIN GAUGES	20
2.4.1 Αρχή Λειτουργίας	20
2.4.2 Εφαρμογές	22
2.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ HF-500C	31
2.5.1 Αρχή Λειτουργίας	31
2.5.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	32
2.5.3 Εφαρμογές	33
2.5.4 Σύνδεση με MGC-plus	33
2.6 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ CORREKIT L-CE	33
2.6.1 Αρχή Λειτουργίας	33
2.6.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	35
2.6.3 Εφαρμογές	36
2.6.4 Σύνδεση με MGC-plus	36
2.7 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ HBM B12	37
2.7.1 Αρχή Λειτουργίας	37
2.7.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	39
2.7.3 Εφαρμογές	40
2.7.4 Σύνδεση με MGC-plus	40
2.8 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ KISTLER 8704B	40
2.8.1 Αρχή Λειτουργίας	40
2.8.2 Εφαρμογές	41
2.8.3 Σύνδεση με MGC-plus	42
2.9 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CATMAN	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	43
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ	43
3.2.1 Κατηγορίες	43
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	46
3.3.1 Τεστ 1- Επιτάχυνσης	47

3.3.2	Τεστ 2- Δεξιάς Στροφής.....	52
3.3.3	Τεστ 3- Βηματική Διέγερση.....	56
3.3.4	Τεστ 4- Δρόμος με Κλίση.....	60
3.3.5	Τεστ 5- Κατηγορία 1.....	64
3.3.6	Τεστ 6- Κατηγορία 2.....	69
3.3.7	Τεστ 7- Κατηγορία 3.....	73
3.3.8	Τεστ 8- Κατηγορία 4.....	79
3.3.9	Τεστ 9- Κατηγορία 5.....	84
3.3.10	Τεστ 10- Κατηγορία 6.....	88
3.3.11	Τεστ 11- Κατηγορία 7.....	92
3.3.12	Τεστ 12- Κατηγορία 8.....	97
3.3.13	Τεστ 13- Κατηγορία 9.....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΦΟΡΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ.....		106
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	106
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ.....	107
4.2.1	Τεστ 1- Επιτάχυνσης.....	107
4.2.2	Τεστ 2- Δεξιάς Στροφής.....	108
4.2.3	Τεστ 3- Βηματική Διέγερση.....	109
4.2.4	Τεστ 4- Δρόμος με Κλίση.....	110
4.2.5	Τεστ 5- Κατηγορία 1.....	111
4.2.6	Τεστ 6- Κατηγορία 2.....	112
4.2.7	Τεστ 7- Κατηγορία 3.....	113
4.2.8	Τεστ 8- Κατηγορία 4.....	114
4.2.9	Τεστ 9- Κατηγορία 5.....	115
4.2.10	Τεστ 10- Κατηγορία 6.....	116
4.2.11	Τεστ 11- Κατηγορία 7.....	117
4.2.12	Τεστ 12- Κατηγορία 8.....	118
4.2.13	Τεστ 13- Κατηγορία 9.....	119
4.3	ΣΧΟΛΙΑ.....	120
4.4	ΤΕΣΤ 1-4.....	120
4.5	ΤΕΣΤ 5-13 (ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ 1-10).....	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		123
5.1	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΙΚΟΝΕΣ.....		124
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΙΝΑΚΕΣ		126
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ		127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ		130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		137

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται ανάλυση των βασικών μεθόδων προσδιορισμού των ασκούμενων δυνάμεων στους ελαστικοφόρους τροχού είτε μέσω πειραματικών μοντέλων είτε αναλυτικών. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση της πειραματικής μεθόδου, η οποία χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό επιμηκυνσιόμετρων και επιταχυνσιόμετρων για τον υπολογισμό των ασκούμενων δυνάμεων γιατί είναι η μέθοδος που θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται ο κάθε αισθητήρας που έχει τοποθετηθεί πάνω στο όχημα, που αποτέλεσε το αντικείμενο μελέτης, και αναλύονται τα τεχνικά του χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται διαγράμματα των μεγεθών που μετρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ως προς τον χρόνο, όπως η ταχύτητα, οι κάθετες επιταχύνσεις του πλαισίου και των τροχών, οι καμπτικές, οι διατμητικές και οι αξονικές παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις, και γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των μετρήσεων ίδιων αισθητήρων τοποθετημένων σε διαφορετικές θέσεις. Τα πειράματα που υλοποιήθηκαν κατηγοριοποιούνται σε ομάδες με σκοπό την καλύτερη ανάγνωση των δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4, παρατίθενται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ασκούμενων δυνάμεων στους ελαστικοφόρους τροχούς κάνοντας συγκρίσεις μεταξύ των δύο τροχών, ενώ γίνεται προσπάθεια να συσχετιστούν τα αποτελέσματα με γραμμικά μοντέλα ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά τους. Τέλος, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων τόσο από την δυναμική σκοπιά όσο και από την στατιστική.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5, γίνονται προτάσεις για την συνέχιση της εργασίας αυτής και την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΩΤΡΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Οι δυνάμεις που ασκούνται στους δρόμους από τους τροχούς των βαρέων οχημάτων θεωρούνται βασική αιτία για την καταπόνηση και κατ' επέκταση την καταστροφή τους. Στο παρελθόν, η μελέτη όσον αφορά την σχέση μεταξύ των οχημάτων και των δρόμων περιοριζόταν στον υπολογισμό και στην προσομοίωση των δυνάμεων που ασκούνται από τους τροχούς χωρίς να γίνεται αναφορά στην αντίδραση της επιφάνειας κίνησης (δρόμοι). Η μελέτη της αντίδρασης αυτής αποτέλεσε το επόμενο στάδιο της έρευνας στον τομέα των βαρέων οχημάτων με στόχο να κατανοηθεί η συμπεριφορά των οχημάτων και η καταπόνηση των δρόμων. Περαιτέρω στόχος αυτής της μελέτης ήταν η βελτίωση των συστημάτων των οχημάτων και συνεπώς η μείωση της καταπόνησης στις επιφάνειες κίνησης αλλά και η βελτίωση αυτών. Ο προσδιορισμός των δυνάμεων στα ελαστικά επίσωτρα γίνεται πλέον τόσο μέσω αναλυτικών αλλά και πειραματικών μοντέλων.

1.2 Πειραματικά Μοντέλα

Με την πάροδο του χρόνου αναπτύχθηκαν διάφορες πειραματικοί μέθοδοι υπολογισμού των δυνάμεων στα ελαστικά. Ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμένων της μελέτης, μικρό ή μεγάλο αριθμό οχημάτων, και το πεδίο έρευνας, μέτρηση των δυνάμεων στα ελαστικά ή μέτρηση της αντίδρασης των επιφανειών κίνησης στα ελαστικά, χρησιμοποιήθηκαν είτε αισθητήρες τοποθετημένοι πάνω στο όχημα (vehicle-based instrumentation) είτε αισθητήρες τοποθετημένοι στις επιφάνειες κίνησης των οχημάτων (road-based instrumentation) αντίστοιχα.

1.2.1 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω της Μέτρησης της Πίεσης των Ελαστικών

Μια από τις αρχικές μεθόδους προσδιορισμού των ασκούμενων δυνάμεων στα ελαστικά ήταν μέσω της μέτρησης της πίεσης των ελαστικών με τους κατάλληλους αισθητήρες. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε σ' ένα AASHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) τεστ -τεστ τα οποία γινόντουσαν από το Υπουργείο Μεταφορών της Αμερικής με σκοπό να υπολογιστεί η φθορά των δρόμων από τα οχήματα- όπου παρατηρήθηκε να υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των στατικών φορτιών που μετρήθηκαν και της μεταβολής της πίεσης των ελαστικών. Η συσχέτιση αυτή μετά από συνεχόμενες έρευνες εν τέλει αποδείχθηκε λανθασμένη με αποτέλεσμα η μέθοδος αυτή να απορριφθεί.

Ένας βασικός λόγος της αποτυχίας αυτής της μεθόδου ήταν το γεγονός ότι η δύναμη και η πίεση στα ελαστικά εξαρτιόντουσαν από την συχνότητα.

1.2.2 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω της Μέτρησης της Μετατόπισης των Τροχών

Διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού των δυνάμεων στους τροχούς βασίζονται στην μέτρηση είτε της κάθετης είτε της εγκάρσιας μετατόπισης τους. Όσον αφορά την μέτρηση της κάθετης μετατόπισης μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση ενός οπτικού αισθητήρα τοποθετημένου πάνω στον άξονα του τροχού. Ενώ η μέτρηση της εγκάρσιας μετατόπισης προϋποθέτει την χρήση ενός αισθητήρα μέτρησης γραμμικής μετατόπισης. Οι μέθοδοι αυτές στηρίζονται στην υπόθεση ότι η κάθετη δυσκαμψία των ελαστικών είναι ανεξάρτητη από την γωνιακή ταχύτητα των τροχών. Πάροτι η υπόθεση αυτή δεν ήταν σωστή, η δυσκολία της μεθόδου αυξανόταν γιατί το καλιμπράρισμα των αισθητήρων έπρεπε να γίνει πάνω σε ένα κυλιόμενο δρόμο για διάφορες ταχύτητες. Βασιζόμενες εν τέλει σε λανθασμένη υπόθεση, οι μέθοδοι οδηγούσαν σε υψηλά σφάλματα ειδικά σε περιπτώση όπου υπήρχε ολίσθηση του τροχού είτε εγκάρσια είτε διαμήκης.

1.2.3 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω Μέτρησης της Επιτάχυνσης των Τροχών

Μια άλλη προσπάθεια υπολογισμού των δυνάμεων στους τροχούς μέσω μετρήσεων στηρίχθηκε στον υπολογισμό των επιταχύνσεων των αναρτημένων και των μη αναρτημένων μαζών. Η μέθοδος αυτή επικεντρώθηκε κυρίως σε απλά οχήματα κατηγορίας M δύο αξόνων όπου και είχε καλύτερα αποτελέσματα. Οι υπολογισμένες επιταχύνσεις πολλαπλασιάζονταν με τα κατάλληλα μεγέθη ανδράνειας, μάζες, για να προκύψουν οι ασκούμενες δυνάμεις. Οι δονήσεις όμως του πλαισίου του οχήματος οδηγούσαν σε μεγάλα σφάλματα και τελικά η μέθοδος αυτή δεν είχε ευρεία χρήση ως προς τον υπολογισμό των δυνάμεων στους τροχούς. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή προτάθηκε να χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των αναρτήσεων των οχημάτων.



Εικόνα 1.3-1: Επιταχυσίόμετρο στους Άξονες

1.2.4 Υπολογισμός Δυνάμεων μέσω Μέτρησης των Παραμορφώσεων του Άξονα

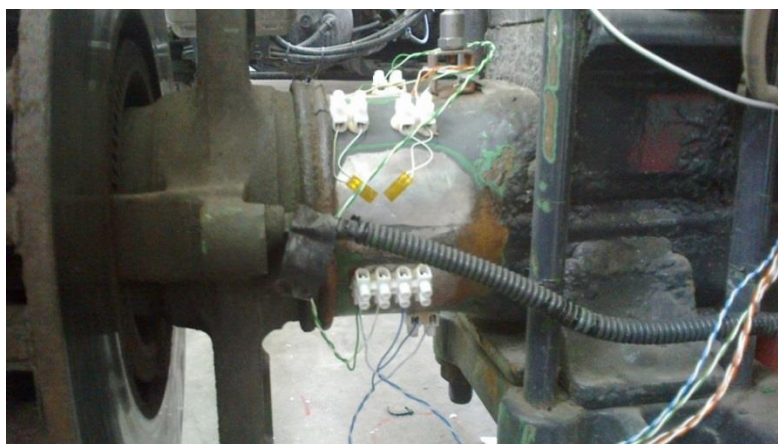
Η πιο απλή μέθοδος προσδιορισμού των ασκούμενων δυνάμεων στα ελαστικά είναι η τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρων για την μέτρηση των παραμορφώσεων, καμπτικών ή διατμητικών, μεταξύ της ανάρτησης και των φρένων. Θεωρείται ότι αποτελεί την πιο πρακτική και αποτελεσματική μέθοδο όταν πρόκειται να γίνει μελέτη των δυνάμεων στα ελαστικά σε μικρό αριθμό οχημάτων.

1.2.4.1 Μέθοδος Α' Μετρώντας τη Διατμητική Παραμόρφωση

Η μετρητική αλυσίδα, που απαιτείται για την υλοποίηση αυτή της μεθόδου, αποτελείται από δύο επιταχυνσιόμετρα τα οποία μετρούν την κάθετη επιτάχυνση των τροχών \ddot{z}_1 και \ddot{z}_2 , αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά πρέπει να τοποθετηθούν στον οπίσθιο άξονα του οχήματος αντιδιαμετρικά και κάθετα προς το έδαφος μεταξύ της ανάρτησης και της πλάκας φρένου, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.4-1.

Επίσης, τοποθετούνται και δύο ζεύγη επιμηκυνσιόμετρων στο μπροστά και στο πίσω μέρος του άξονα, σε γωνία 45° ως προς τον κάθετο άξονα και σε γωνία 90° μεταξύ τους, τα οποία μετράνε διατμητική παραμόρφωση του άξονα εξαιτίας των δυνάμεων S_1 και S_2 . Ιδιαίτερη σημασία ως προς το τελικό αποτέλεσμα έχει η τοποθέτηση των επιμηκυνσιόμετρων όσο πιο κοντά γίνεται στους τροχούς. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που πρέπει να προσεχθεί είναι να μην υπάρχει απόκλιση στις γωνίες τοποθέτησης των επιμηκυνσιόμετρων μεταξύ τους και κατ' επέκταση μεταξύ των κάθετων αξόνων, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα της τάξης του 5% αν η απόκλιση της γωνίας είναι μεγαλύτερη των 5° . Αυτό αποτελεί το λεγόμενο σφάλμα τοποθέτησης.

Η θεωρία πίσω από την συγκεκριμένη μέθοδο προκύπτει από την εξίσωση ισορροπίας των κάθετων δυνάμεων του τμήματος αριστερά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυνσιόμετρων. Επίσης οι εξισώσεις απλοποιούνται βασιζόμενες στην υπόθεση των μικρών γωνιών, δηλαδή ότι το $\sin\phi$ και το $\cos\phi$ είναι περίπου ϕ και 1 αντίστοιχα.



Εικόνα 1.2.4-1: Επιμηκυνσιόμετρα για Μέτρηση Διατμητικών Παραμορφώσεων

Η κάθετη επιτάχυνση του κέντρου του άξονα \ddot{z}_G και η γωνιακή επιτάχυνση του άξονα $\ddot{\phi}$ μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση των μετρούμενων κάθετων επιταχύνσεων στους τροχούς, αριστερά και δεξιά, όπου προκύπτει:

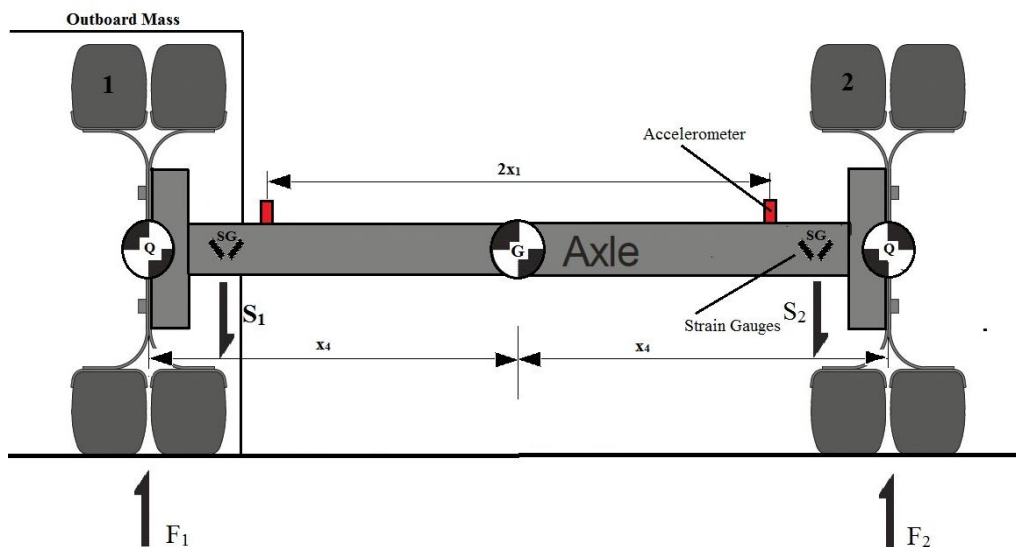
$$\ddot{z}_G = \frac{\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2}{2} \quad (1)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2}{2x_1} \quad (2)$$

Όπου το $2x_1$ είναι η απόσταση M_2 μεταξύ των δύο επιταχυνσιομέτρων. Χρησιμοποιώντας την υπόθεση των μικρών γωνιών, και κατ' επέκταση ότι η γωνία περιστροφής είναι μικρή, προκύπτει ότι η κάθετη επιτάχυνση του κέντρου μάζας του τμήματος αριστερά ή δεξιά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυσιομέτρων SG, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.4-2, είναι:

$$\begin{aligned} \ddot{z}_Q &= \ddot{z}_G + x_4 \ddot{\phi} \\ &= \frac{1}{2} \left[\ddot{z}_2 \left(1 + \frac{x_4}{x_1}\right) + \ddot{z}_1 \left(1 - \frac{x_4}{x_1}\right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Όπου το x_4 είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας του τμήματος αριστερά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυσιομέτρων και του κέντρου του άξονα.



Εικόνα 1.2.4-2: Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος Οπίσθιου Άξονα για την Μέθοδο Α'

Η κάθετη επιτάχυνση της μάζας του τμήματος αριστερά ή δεξιά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυσιομέτρων είναι υπεύθυνη για την δύναμη αδράνειας, η οποία θα διορθώσει τις διατμητικές δυνάμεις. Συνεπώς, η \ddot{z}_Q θα δημιουργήσει την δύναμη $-m\ddot{z}_Q$, όπου m είναι η μάζα του τμήματος δεξιά ή αριστερά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυσιομέτρων. Σύμφωνα λοιπόν με την εξίσωση

ισορροπίας των κάθετων δυνάμεων και χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει ότι η ασκούμενη δύναμη στα ελαστικά είναι:

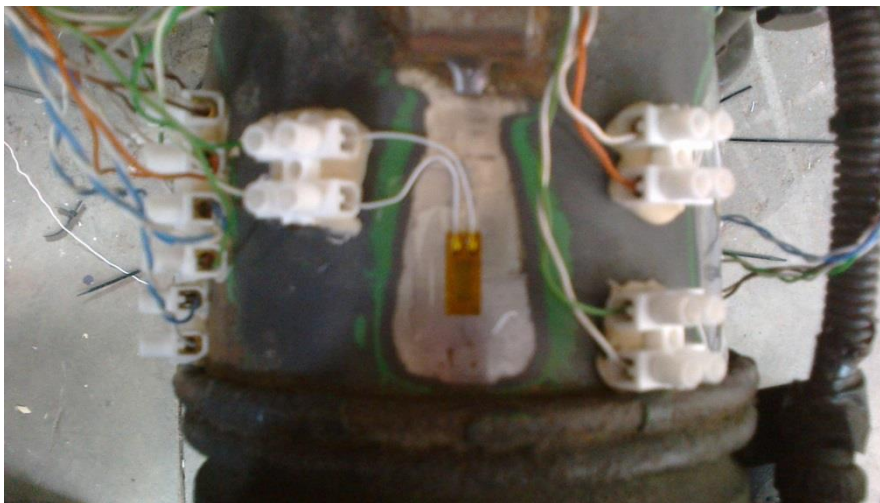
$$F_2 = S_2 + m\ddot{z}_Q \quad (4)$$

Ομοίως θα προκύψουν και οι εξισώσεις για την δύναμη F_1 .

1.2.4.2 Μέθοδος Β' Μετρώντας τη Καμπτική Παραμόρφωση

Η μετρητική αλυσίδα, που απαιτείται για την υλοποίηση αυτή της μεθόδου, αποτελείται από δύο επιταχυνσιόμετρα τα οποία μετρούν την κάθετη επιτάχυνση των τροχών \ddot{z}_1 και \ddot{z}_2 , αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Τα επιταχυνσιόμετρα αυτά πρέπει να τοποθετηθούν στον οπίσθιο άξονα του οχήματος αντιδιαμετρικά και κάθετα προς το έδαφος μεταξύ της ανάρτησης και της πλάκας φρένου, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.4.2-1.

Επίσης, τοποθετούνται και δύο επιμηκυνσιόμετρα στο πάνω και στο κάτω μέρος του άξονα αντιδιαμετρικά. Ιδιαίτερη σημασία ως προς το τελικό αποτέλεσμα έχει η τοποθέτηση των επιμηκυνσιόμετρων όσο πιο κοντά γίνεται στους τροχούς.



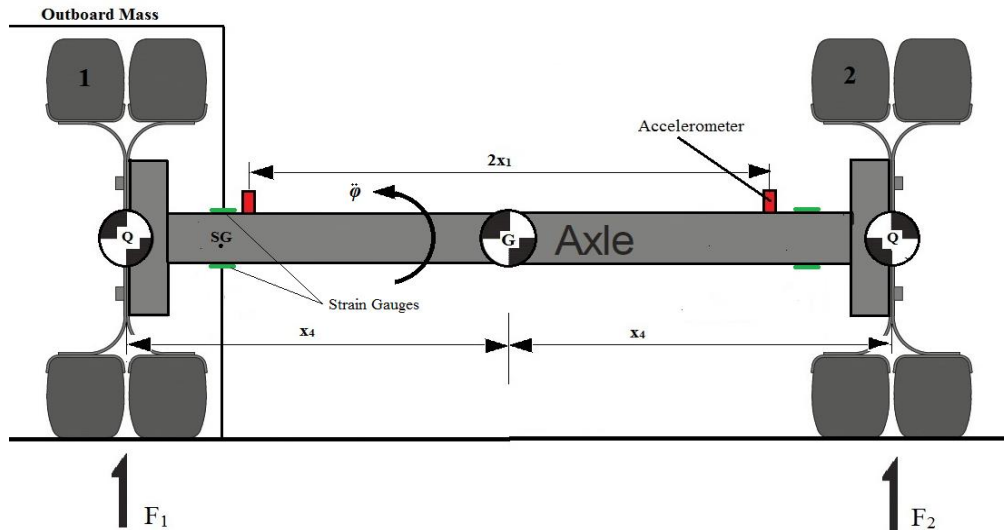
Εικόνα 1.2.4.2-1: Επιμηκυνσιόμετρα για Μέτρηση Καμπτικών Παραμορφώσεων

Η θεωρία πίσω από την συγκεκριμένη μέθοδο προκύπτει από την εξίσωση ισορροπίας των ροπών που ασκούνται στο σημείο τοποθέτησης των επιμηκυνσιόμετρων, το SG. Επίσης οι εξισώσεις απλοποιούνται βασιζόμενες στην υπόθεση των μικρών γωνιών, δηλαδή ότι το $\sin\phi$ και το $\cos\phi$ είναι περίπου ϕ και 1 αντίστοιχα.

Η κάθετη επιτάχυνση του κέντρο του άξονα \ddot{z}_G και η γωνιακή επιτάχυνση του άξονα $\ddot{\phi}$ μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση των μετρούμενων κάθετων επιταχύνσεων στους τροχούς, αριστερά και δεξιά, όπου προκύπτει:

$$\ddot{z}_G = \frac{\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2}{2} \quad (5)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2}{2x_1} \quad (6)$$

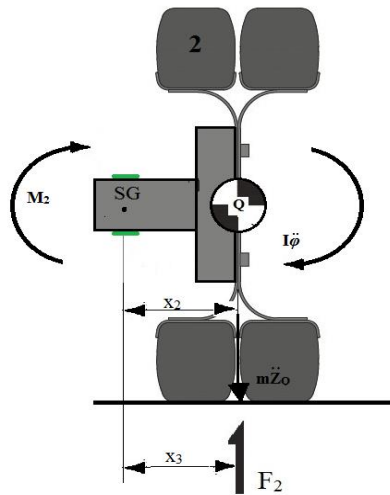


Εικόνα 1.2.4.2-2: Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος Οπίσθιου Άξονα για την Μέθοδο Β'

Όπου το $2x_1$ είναι η απόσταση μεταξύ των δύο επιταχυνσιομέτρων. Χρησιμοποιώντας την υπόθεση των μικρών γωνιών, και κατ' επέκταση ότι η γωνία περιστροφής είναι μικρή, προκύπτει ότι η κάθετη επιτάχυνση του κέντρου μάζας του τμήματος αριστερά ή δεξιά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυσσιόμετρων SG, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.4.2-2, είναι:

$$\begin{aligned} \ddot{z}_Q &= \ddot{z}_G + x_4 \ddot{\phi} \\ &= \frac{1}{2} \left[\ddot{z}_2 \left(1 + \frac{x_4}{x_1}\right) + \ddot{z}_1 \left(1 - \frac{x_4}{x_1}\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Όπου το x_4 είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας του τμήματος δεξιά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυσσιόμετρων και του κέντρου του άξονα.



Εικόνα 1.2.4.2-3: Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος Πίσω Δεξιά Τροχού

Η κάθετη επιτάχυνση της μάζας του τμήματος δεξιά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυνσιόμετρων είναι υπεύθυνη για τις ροπές αδράνειας, οι οποίες θα διορθώσουν τις καμπτικές δυνάμεις που θα προκύψουν από τα επιμηκυνσιόμετρα. Συνεπώς, η \ddot{z}_Q θα δημιουργήσει την δύναμη $-m\ddot{z}_Q$, όπου m είναι η μάζα του τμήματος δεξιά από το σημείο τοποθέτησης των επιμηκυνσιόμετρων. Αντίστοιχα, η γωνιακή επιτάχυνση $\ddot{\phi}$ του άξονα και των επιμέρους μερών του τμήματος αριστερά ή δεξιά από το σημείο SG θα δημιουργήσει την ροπή $I\ddot{\phi}$, όπου I είναι η ροπή αδράνειας όλων των μερών του τμήματος αριστερά ή δεξιά από το σημείο SG ως προς το κέντρο βάρους τους. Σύμφωνα λοιπόν με την εξίσωση ισορροπίας των ροπών γύρω από το σημείο SG προκύπτει ότι η δύναμη είναι:

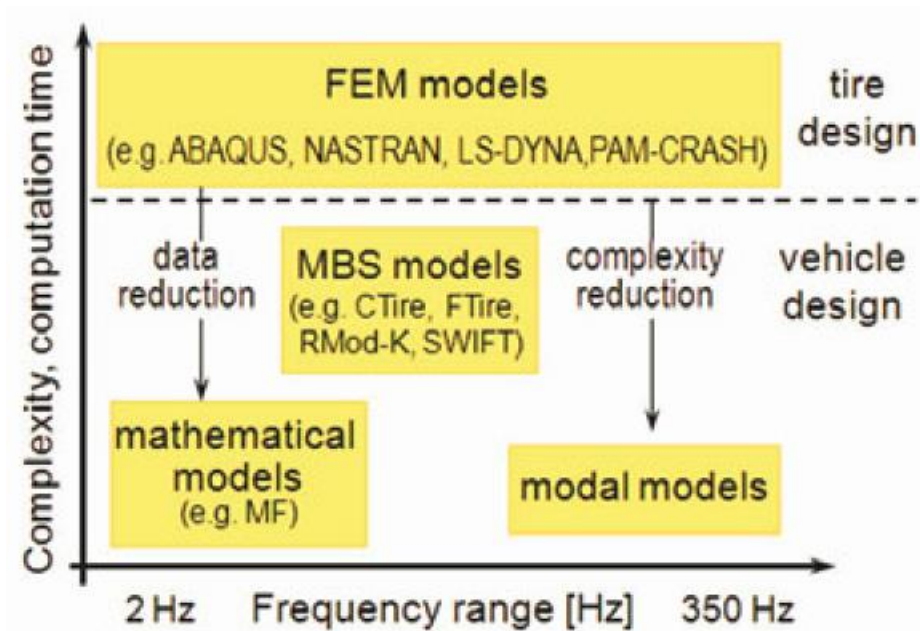
$$F_2 = \frac{M_2 + x_2 m \ddot{z}_Q + I \ddot{\phi}}{x_3} \quad (8)$$

Όπου x_3 είναι η απόσταση από το σημείο SG μέχρι το μέσο των τροχών και x_2 είναι η απόσταση από το σημείο SG μέχρι το κέντρο βάρους Q του τμήματος αριστερά ή δεξιά του σημείου SG.

1.3 Αναλυτικά μοντέλα

Τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των ελαστικών και να προβλέψουν την συμπεριφορά τους. Χρησιμοποιούμενα μοντέλα ελαστικών θεωρούνται τόσο διάφορα απλά μαθηματικά μοντέλα (MF Models-Magic Formula) όσο και λεπτομερή μοντέλα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία (FE Models-Abaqus, Nastran, LS-Dyna, PAM-Crash). Η πολυπλοκότητα του επιλεγμένου μοντέλου διαφέρει ανάλογα τις προϋποθέσεις κάθε εφαρμογής. Όσον αφορά τα ελαστικά, στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων αλλά δεδομένου του μεγάλου χρόνου υλοποίησης δεν συνδυάζονται με μοντέλα οχημάτων, όπως

φαίνεται στην εικόνα 1.2.4-6. Τα MBS μοντέλα (multi body models), που χρησιμοποιούνται κύριως για σχεδιασμό των οχημάτων, είναι κατάλληλα για την προσομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων των ελαστικών αλλά χωρίς να δίνουν έμφαση στα δομικά χαρακτηριστικά τους.

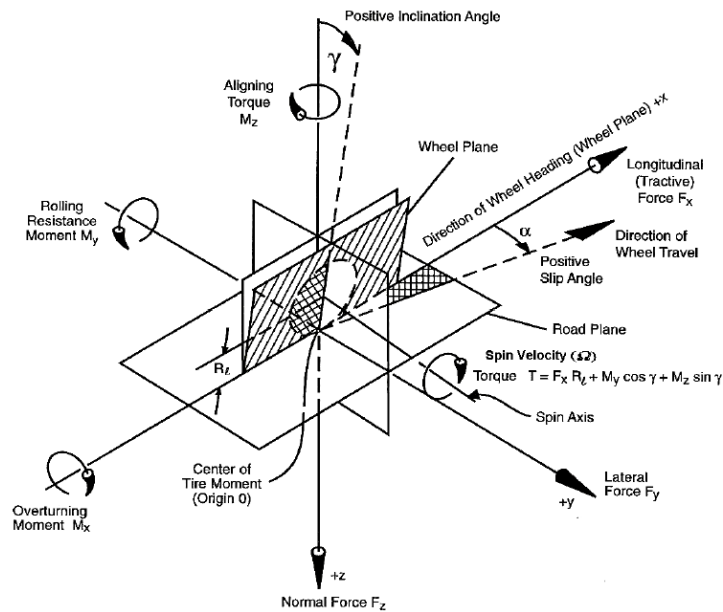


Εικόνα 1.3-1: Ανάλυση των πιθανών Εφαρμογών των Αναλυτικών Μοντέλων

1.3.1 Βασικοί Παράμετροι Μοντελοποίησης Ελαστικών

Η δημιουργία των αναλυτικών μοντέλων βασίζεται στην μελέτη βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφορά των ελαστικών. Αυτοί οι παράμετροι λαμβάνονται υπόψη τόσο ως προς την μοντελοποίηση των οχημάτων με πεπερασμένα στοιχεία όσο στην δημιουργία μαθηματικών μοντέλων για τον υπολογισμό διάφορων μεγεθών. Οι βασικές αυτές παράμετροι είναι:

- **Coefficient of Friction**
- **Slip Angle α**
- **Slip Ratio - %Slip**
- **Cornering Stiffness C_α**
- **Camber Angle γ**
- **Camber Stiffness C_γ**
- **Self-Aligning Torque M_z**
- **Pneumatic Trail t**



Εικόνα 1.3-2: Βασικοί Παράμετροι Μοντελοποίησης των Ελαστικών

1.3.2 Μαθηματικά Μοντέλα (MF Models) για τον Υπολογισμό των Εγκάρσιων Δυνάμεων

Κάθε μορφή προσομοίωσης, όσον αφορά τα όχημα, βασίζεται στην τμηματική ανάλυση με χρονικά βήματα. Συνεπώς κάθε επιλεγμένο μοντέλο προσομοίωσης πρέπει να είναι ικανό να υπολογίζει γρήγορα τις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές στα ελαστικά σε κάθε χρονικό βήμα για κάθε συνδυασμό αρχικών κινηματικών συνθηκών (ολίσθηση, πλαγιολίσθηση, γωνία camber κ.α). Για την πραγματοποίηση αυτού του στόχου έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά εμπειρικά μοντέλα τα οποία βασίζονται σε αναλυτικές φόρμουλες. Οι αναλυτικές αυτές φόρμουλες περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια την συμπεριφορά των ελαστικών χρησιμοποιώντας έναν συγκεκριμένο αριθμό μεταβλητών ως εισόδους.

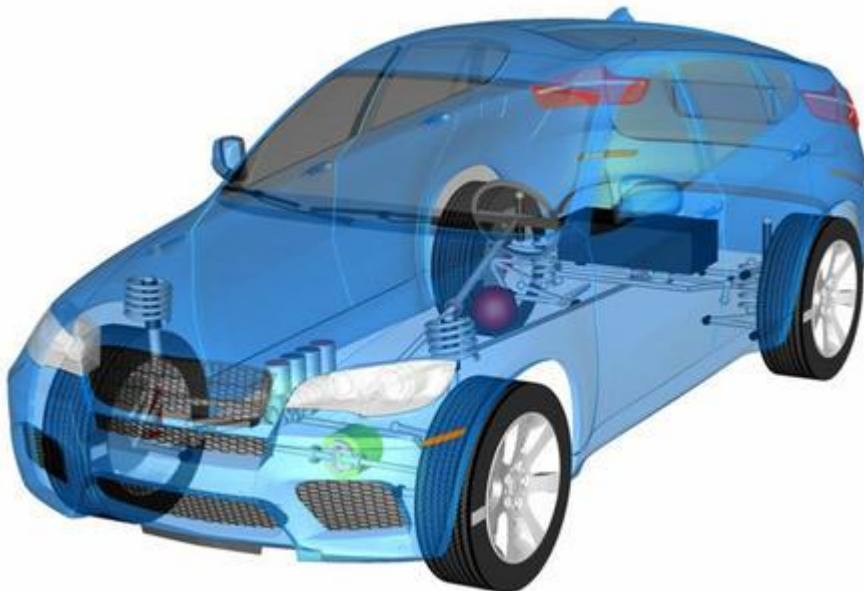
Το πιο συνηθισμένο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς των ελαστικών είναι η Magic Formula, όπου αναπτύχθηκε από τον Hans Bastiaan Pacejka. Για τις προσομοιώσεις οχημάτων είναι πολύ σημαντικό το μοντέλο να είναι ικανό να επιστρέφει αποτελέσματα που είναι όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται. Με στόχο την ικανοποίηση συγκεκριμένων προδιαγραφών η Αυτοκινητοβιομηχανία και η Βιομηχανία των Ελαστικών δημιούργησαν μια συγκεκριμένη διαδικασία μέτρησης των ελαστικών λεγόμενη TIME (Tire Measurement).

Η συγκεκριμένη διαδικασία, σε αντίθεση με συμβατικές μεθόδους μέτρησης που θέτουν το φορτία των τροχών και την γωνία camber σταθερές και αλλάζοντας την γωνία πλαγιολίσθησης, βασίζεται στο γεγονός ότι η γωνία πλαγιολίσθησης, η γωνία camber και τα φορτία μεταβάλλονται ταυτόχρονα σύμφωνα με πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Τα φορτία που ασκούνται στους τροχούς προκύπτουν από απότομες αλλαγές κατεύθυνσης με σταθερή ταχύτητα που γίνονται με διαφορετικές εγκάρσιες επιταχύνσεις.

Υπολογίζοντας τις αλλαγές στην γωνία πλαγιολίσθησης, στην γωνία camber και στα φορτία των τροχών που προκύπτουν από απότομες αλλαγές κατεύθυνσης των τροχών, δημιουργείται μια σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων η οποία στηρίζεται στην στατική κατανομή των φορτίων στους τροχούς και στα χαρακτηριστικά των αναρτήσεων.

1.3.3 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Models) για τον Υπολογισμό των Εγκάρσιων Δυνάμεων

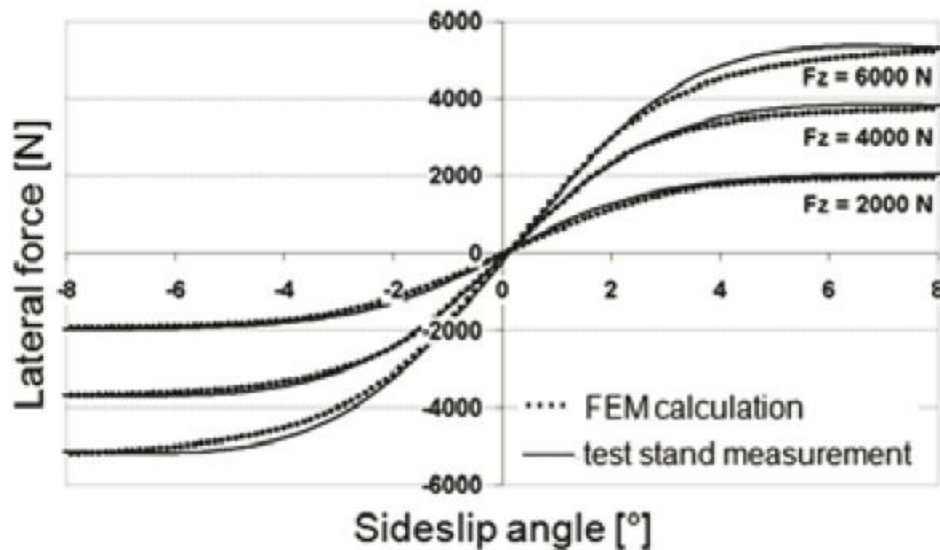
Στην προσπάθεια αντικατάστασης των πειραματικών μεθόδων, η αυτοκινητοβιομηχανία δημιούργησε μοντέλα προσομοίωσης των ελαστικών βασισμένα σε πεπερασμένα στοιχεία. Ο βασικός στόχος αυτών των προσπαθειών δεν ήταν η εξοικονόμηση χρήματων αλλά μια καλύτερη οπτική της συμπεριφοράς των επιμέρους μηχανισμών των τροχών που δεν μπορούσε να προσδιορισθεί, είτε εύκολα είτε καθόλου.



Εικόνα 1.3-3: Σύνθετο Μοντέλο Ανάλυσης Οχήματος για τον Προσδιορισμό Δυνάμεων

Παρέχοντας αναλυτικές πληροφορίες, μέσω των μοντέλων αυτών μπορεί να γίνει μελέτη των τοπικών δυνάμεων και της τριβής στην περιοχή επαφής των τροχών βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο την βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς των τροχών αλλά και των ελαστικών συνδυάζοντας την πλαγιολίσθηση και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της οδήγησης ή της επιβράδυνσης. Η βελτιστοποίηση πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή τόσο στην αναπτυξη της τριβής στο ελαστικό όσο και στην επιφάνεια οδήγησης τους οχήματος. Η μεταφορά των δυνάμεων από τους τροχούς στο δρόμο εξαρτάται από την πίεση στην περιοχή επαφής των ελαστικών, στην ταχύτητα περιστροφής και την θερμοκρασία στην περιοχή επαφής των ελαστικών με τον δρόμο.

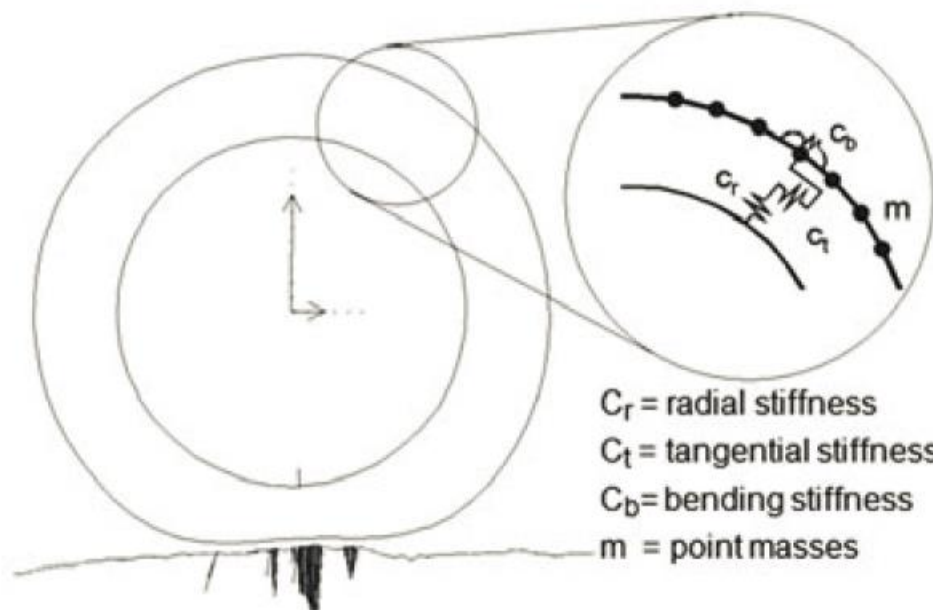
Η ανεξαρτητοποίηση από τα πειραματικά μοντέλα δεν είναι ακόμα εφικτή, δεδομένου ότι διάφορα αναλυτικά μοντέλα απαιτούν πρώτα την πραγματοποίηση μετρήσεων μέσω πειραματικών διαδικασιών και την χρησιμοποίηση των δεδομένων αυτών για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης και του υπολογισμού. Συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό της πίεσης και της θερμοκρασίας της περιοχής επαφής των ελαστικών χρειάζεται πρώτα να υπολογισθούν οι τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων. Με αυτό το σκοπό πρέπει να πραγματοποιηθούν πρώτα τα απαραίτητα τεστ ως προς τα υλικά, είτε σε εργαστήριο είτε σε πραγματικές συνθήκες με κάποιο όχημα.



Εικόνα 1.3-4: Σύγκριση Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων με Πειραματικές Μετρήσεις - Καμπύλη Εγκάρσιας Δύναμης με Γωνία Ολίσθησης

1.3.4 Μοντέλα Ελαστικών για τον Υπολογισμό των Κάθετων Δυνάμεων

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα απλό διάγραμμα ελευθέρου σώματος για την μοντελοποίηση ενός τροχού με ελατήρια, μάζες και αποσβεστήρες. Η εικόνα 1.3-5 δείχνει τον τροχό, τη παραμορφωμένη περιοχή και τις ασκούμενες δυνάμεις στο άξονα. Οι απαιτούμενες τιμές παραμέτρων για την εφαρμογή των μοντέλων για τον υπολογισμό των κάθετων δυνάμεων μπορούν να προσδιοριστούν μέσω πειραματικών μεθόδων και κατόπιν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα ή μέσω πολύ πιο σύνθετων αναλυτικών μοντέλων.



Εικόνα 1.3-5: Μοντέλο Ελαστικού για την Ανάλυση των Ασκούμενων Δυνάμεων

Από την στιγμή που κάποιες από αυτές τις παραμέτρους υπολογιστούν, το αναλυτικό μοντέλο είναι ικανό να προσδιορίσει τις ασκούμενες δυνάμεις στον άξονα καθώς το όχημα κινείται σε κάποιον ανώμαλο δρόμο. Η περιοχή επαφής του ελαστικού με το δρόμο μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά είδη κόμβων στην ανάλυση του σώματος. Τα δεδομένα που θα προκύψουν με αυτή την αλλαγή για την μελέτη στο σημείο επαφής θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των δυνάμεων.

<u>Modes</u>	1.	2.	3.	4.	5.	6.
fore/aft						
lateral						
vertical						
bending						
torsion						
steering						

Εικόνα 1.3-6: Διάφορα Είδη Προσομοίωσης των Ελαστικών ανάλογα με την Φόρτιση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Μετρητική Αλυσίδα

2.1 Εισαγωγή

Το αντικείμενο μελέτης στην διπλωματική αυτή αποτέλεσε ένα φορτηγό Atego 815 της Daimler Chrysler κατηγορίας N2. Με σκοπό να μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος κατά την διάρκεια διάφορων συνθηκών στο δρόμο, εγκαταστάθηκαν σ' αυτό αισθητήρες για την μέτρηση διάφορων μεγεθών.



Εικόνα 2.1-1: Atego 815, Daimler Chrysler

Η απόκτηση, αποθήκευση και επεξεργασία των μετρήσεων επιτυγχάνεται μέσα από τρία επιμέρους στοιχεία:

- τους αισθητήρες, οι οποίοι διαβάζουν το φυσικό φαινόμενο (ταλάντωση, παραμόρφωση, πίεση, θερμοκρασία, κτλ) και το μετατρέπουν συνήθως σε ηλεκτρικό σήμα,
- τους ενισχυτές, οι οποίοι αφενός προσφέρουν ενέργεια στους αισθητήρες για να λειτουργήσουν και αφετέρου καταγράφουν το ηλεκτρικό σήμα με επιλεγμένη συχνότητα δειγματοληψίας,
- το λογισμικό, το οποίο χρησιμεύει ως στοιχείο παρουσίασης, αποθήκευσης και επεξεργασίας των μετρήσεων.

Προφανώς και απαιτείται η πλήρης συμβατότητα μεταξύ αυτού και των ενισχυτών, ώστε να αποφευχθούν απώλειες δεδομένων.



Εικόνα 2.1-2:Μετρητική Αλυσίδα

2.2 Αναφορά Αισθητήρων

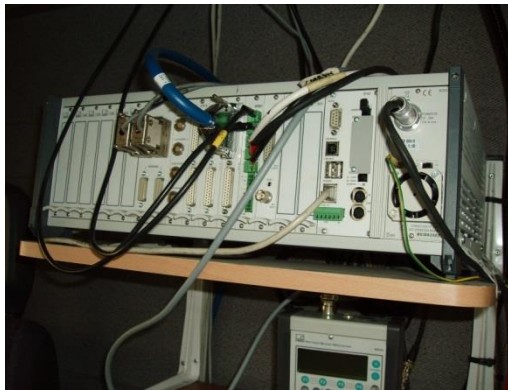
Η μετρητική αλυσίδα που είναι εγκαταστημένη στο φορτηγό αποτελείται από τα παρακάτω μετρητικά όργανα:

- 8 επιταχυνσιόμετρα κάθετης επιτάχυνσης (Kistler 8704)
- 1 επιταχυνσιόμετρο εγκάρσιας επιτάχυνσης (HBM B12)
- 1 επιταχυνσιόμετρο διαμήκου επιτάχυνσης (HBM B12)
- 2 αισθητήρες μέτρησης ύψους (HF-500C)
- 1 αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας (Correxit L-CE)
- 34 μονοαξονικά επιμηκυνσιόμετρα (HBM)

Οι αισθητήρες είναι συνδεδεμένα με το σύστημα καταγραφή και συλλογής δεδομένων, *MGCplus* και στην συνέχεια μεταφέρονται στο υπολογιστή με ένα καλώδιο ethernet όπου είναι εγκαταστημένο το λογισμικό *Catman 5.0* για την συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων.

2.3 Σύστημα Συλλογής Μετρήσεων *MGCplus*

Το *MGC plus* της HBM αποτελεί ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων. Διαθέτει έως και 16 υποδοχές σύνδεσης με ενισχυτές ή στοιχεία μονών ή πολλαπλών καναλιών. Αυτό σημαίνει ότι μέσω του *MGCplus* μπορούν να μετρηθούν έως και 128 σημεία μέτρησης. Κάθε συνδεόμενος ενισχυτής (amplifier plug-in module) λειτουργεί με αυτόνομο τρόπο, μέσω της εσωτερικής CPU.



Εικόνα 2.3-1: (α)Κεντρική Μονάδα Συλλογής Δεδομένων-MGCrplus

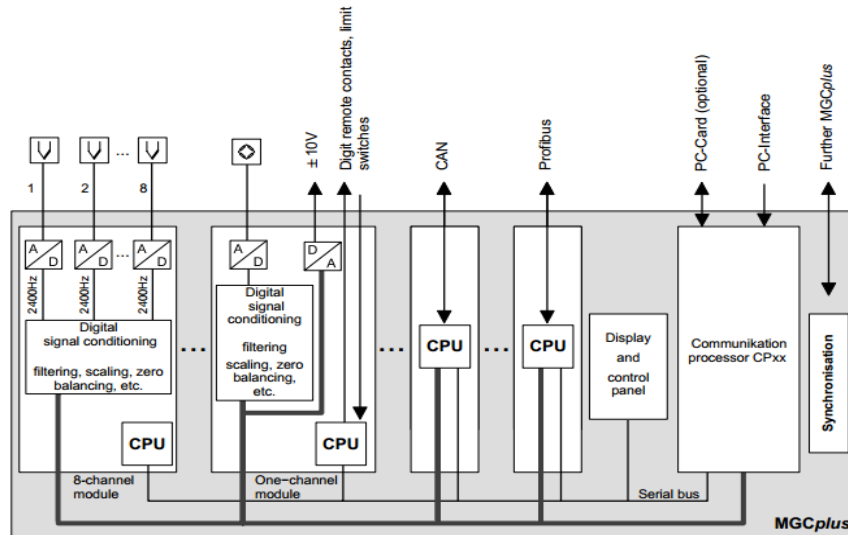
Με την χρήση του MGCrplus και την μετατροπή του σήματος σε ψηφιακό, μπορεί να γίνει μελέτη δεδομένων ταυτόχρονα με την μέτρηση, το φιλτράρισμα ακραίων τιμών και τη βελτιστοποίηση των ορίων μέτρησης. Τα μειονεκτήματα της αναλογικής εξάρτησης, όπως του χρόνου και της συνεχής θερμοκρασιακής μεταβολής, τα σφάλματα λόγω της μειωμένης αντοχής των επιμέρους τμημάτων της μετρητικής αλυσίδας, η χαμηλή ελαστικότητα και η υψηλή πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων, πλέον δεν υφίστανται. Η προϋπόθεση για αυτό είναι η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό χωρίς την απώλεια πληροφορίας.



Εικόνα 2.3-2: (β)Κεντρική Μονάδα Συλλογής Δεδομένων-MGCrplus

Το ψηφιακά διαμορφωμένο σήμα τροφοδοτείται στον υψηλής ταχύτητας εσωτερικό διαυλο (bus). Στην περίπτωση των μονοκάναλων μετρητικών στοιχείων, δύο αναλογικές έξοδοι (τάσης ή ρεύματος) είναι διαθέσιμες μαζί με αυτή των ψηφιακά μετρούμενων τιμών. Η σταθερότητα του ψηφιακού σήματος και το συνεχές φιλτράρισμα του σήματος επιταγχάνονται με την μη ύπαρξη πολύπλεκτη στο MGCrplus.

Για την συλλογή δεδομένων, είναι υπεύθυνος ένας εσωτερικό υπολογιστής σε μορφή διακριτής κάρτας (PC card) όπου έχει συνολική συχνότητα δειγματοληψίας 300,000 τιμές το δευτερόλεπτο. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των καναλιών, μπορεί να γίνεται ταυτόχρονη μέτρηση και συλλογή δεδομένων μέσω του MGCrplus λόγω της ύπαρξης ξεχωριστού A/D μετατροπέα σε κάθε κανάλι. Για την μεταφορά δεδομένων από το καταγραφικό σε εξωτερικό υπολογιστή χρησιμοποιείται καλώδιο Ethernet ή USB.



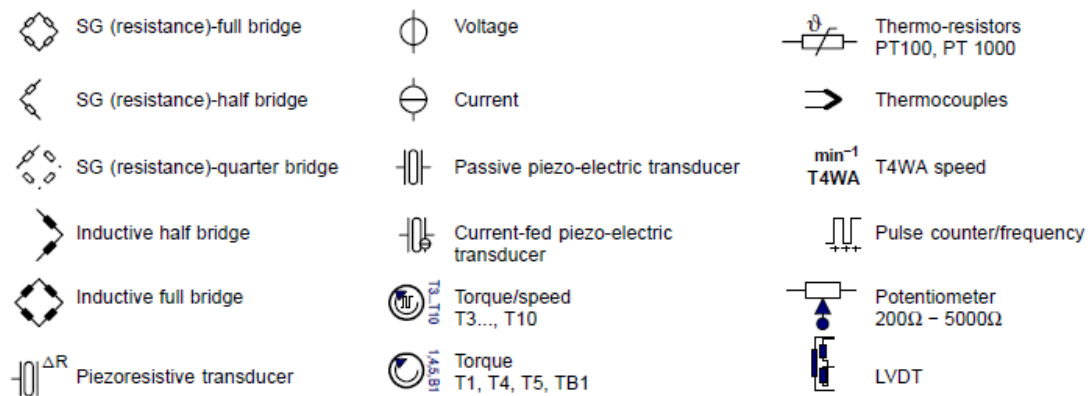
Εικόνα 2.3-3: Δομή Λειτουργίας MGCplus

Για την σύνδεση των αισθητήρων με το σύστημα συλλογής μετρήσεων πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή υποδοχών ανάλογα με το είδος του αισθητήρα. Επίσης πρέπει να γίνει και κατάλληλη επιλογή ενισχυτή πολλαπλών καναλιών ή ενισχυτή μονών καναλιών. Σύμφωνα με τους παρακάτω πίνακες γίνεται η αντιστοίχιση ενισχυτών, υποδοχών και κατηγορίας αισθητήρων.

	ML01B	ML10B	ML30B	ML35B	ML38B	ML50B	ML55B ML55BS6	ML60B		ML801B	ML455	ML460
TEDS AP01i									TEDS AP401			
TEDS AP03i									TEDS AP402i ⁽¹⁾			
AP07/1									TEDS AP409			
AP08									TEDS AP418i			
AP09									TEDS AP455i AP455iS6			
TEDS AP11i									TEDS AP480i			
AP12									TEDS AP801 AP801S6			
TEDS AP13i									TEDS AP809			
AP14									TEDS AP810i ⁽²⁾			
TEDS AP18i									TEDS AP814Bi			
									TEDS AP815i			
									AP835			
									TEDS AP836i ⁽²⁾			

Εικόνα 2.3-4: Αντιστοιχία Διάφορων Αισθητήρων με Υποδοχές

Όπου τα σχήματα δηλώνουν τους ακόλουθους αισθητήρες:

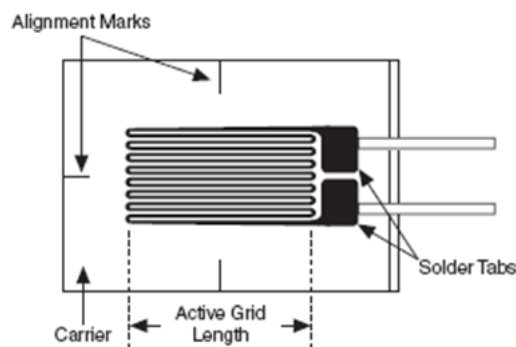


Εικόνα 2.3-5: Κατηγορίες Αισθητήρων

2.4 Επιμηκυνσιόμετρα Strain Gauges

2.4.1 Αρχή Λειτουργίας

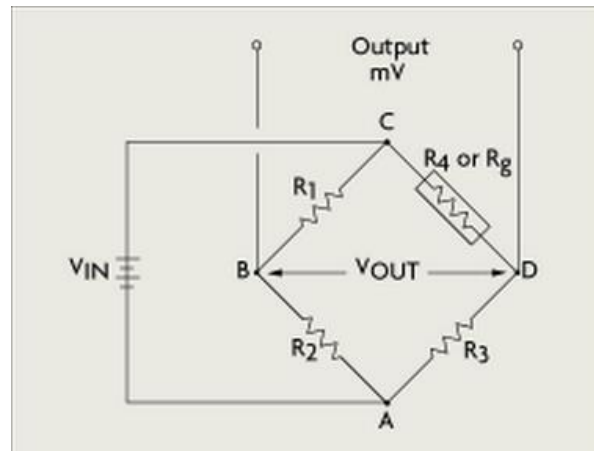
Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες, που αποτελούν μετρητές μηχανικής καταπόνησης, βασίζονται στην θεωρία της ελαστικότητας του Hooke αλλά κυρίως στο ότι κάθε μεταλλικός αγωγός που υπόκειται σε κάποια μηχανική καταπόνηση παρουσιάζει μια μεταβολή στην ηλεκτρική του αντίσταση. Τα επιμηκυνσιόμετρα έχουν σχεδιαστεί για να μετατρέπουν την μηχανική κίνηση σε ηλεκτρονικό σήμα. Η μεταβολή στην χωρητικότητα, την αυτεπαγωγή ή στην ηλεκτρική αντίσταση τους είναι ανάλογη με την τάση που ασκείται σ' αυτό.



Εικόνα 2.4-1: Επιμηκυνσιόμετρο-Strain Gauge

Σ' ένα ιδανικό strain gauge η αντίσταση του μεταβάλλεται μόνο εξαιτίας των παραμορφώσεων της επιφάνειας στην οποία είναι τοποθετημένο. Ωστόσο, σε πραγματικές εφαρμογές κάποιοι, παράγοντες όπως η θερμοκρασία, οι ιδιότητες των υλικών και η κόλλα που χρησιμοποιείται για την τοποθέτησή τους, επηρεάζουν την αντίσταση που υπολογίζεται. Επειδή τα περισσότερα υλικά δεν έχουν τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις, για την μελέτη της καταπόνησης ενός αντικείμενου δεν αρκεί η μέτρηση της αξονικής καταπόνησης. Μια πλήρης ανάλυση προϋποθέτει την μέτρηση των διατμητικών, των καπτικών και των στρεπτικών τάσεων.

Με σκοπό την μέτρηση μεγεθών μέσω των επιμηκυνσιόμετρων, πρέπει να συνδεθούν δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα μέσω του οποίου θα μπορεί να μετρηθεί η αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση των επιμέρους επιμηκυνσιόμετρων. Το κύκλωμα που θα δημιουργηθεί θα αποτελεί μια γέφυρα Wheatstone.



Εικόνα 2.4-2: Κύκλωμα Λειτουργίας Επιμηκυνσιόμετρου

Σύμφωνα με το παραπάνω εικόνα 2.4-2 εάν οι ίσες αντιστάσεις R_1 , R_2 , R_3 και R_4 δέχθουν ηλεκτρική τάση V_{in} στα άκρα A και C, τότε η τάση εξόδου V_{out} στα άκρα B και D θα είναι μηδενική, όπου η V_{out} υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$$

και τότε η γέφυρα θα βρίσκεται σε ισορροπία, δεδομένου προκύπτει:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0$$

Άλλη περίπτωση ισορροπίας της γέφυρας Wheatstone εμφανίζεται όταν υπάρχει αναλογία μεταξύ των τιμών των αντιστάσεων που των κλάδων αριστερά και δεξιά:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_2}{R_1}$$

Για να υπάρξει μεταβολή στην τάση εξόδου, θα πρέπει να υπάρξει μεταβολή τουλάχιστον σε μια αντίσταση, έστω την R_4 , ώστε να είναι διάφορη των υπολοίπων.

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$$

Στην περίπτωση αυτή η V_{out} , όπως φαίνεται και από τον παραπάνω τύπο, θα είναι διάφορη της V_{in} και του μηδενός και η γέφυρα δεν θα είναι σε ισορροπία. Για το λόγο αυτό συνήθως ένας αισθητήρας αποτελείται από ένα, δύο ή τέσσερα επιμηκυνσιόμετρα που σχηματίζουν μια γέφυρα Wheatstone quarter, half ή full bridge αντίστοιχα. Έτσι όταν οι αντιστάσεις μεταβάλλουν την τιμή τους εμφανίζεται μια τάση εξόδου V_{out} :

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} - \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} \right]$$

Πάρα την μεταβολή των επιμέρους αντιστάσεων, η συνολική αντίσταση των κλάδων παραμένει σταθερή παρά τις συνεχείς μεταβολές. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση από το ένα επιμηκυνσιόμετρο θα αυξάνεται και του δεύτερου θα μειώνεται. Βέβαια, η συνολική μεταβολή της αντίστασης των επιμηκυνσιόμετρων είναι της τάξεως του 10^{-3} , επομένως γίνεται απλοποίηση της εξίσωσης και χρησιμοποιείται η προσεγγιστική σχέση:

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

και λαμβάνοντας υπόψη ότι ισχύει:

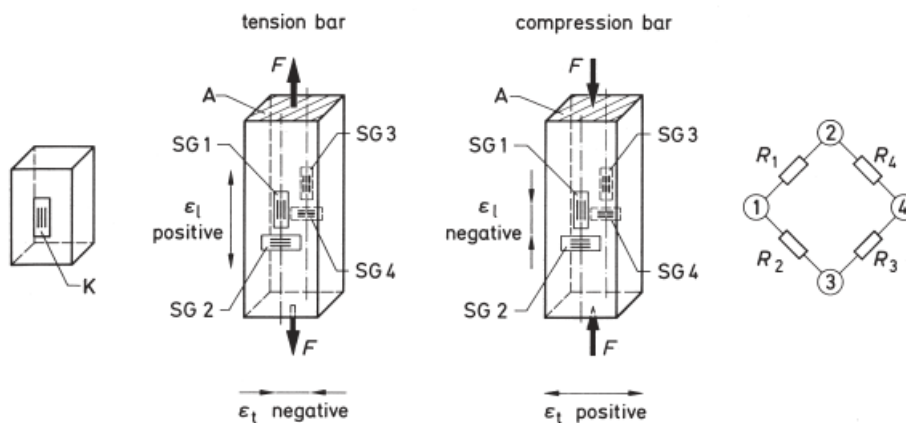
$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

προκύπτει ότι:

$$V_{out} = V_{in} \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4].$$

2.4.2 Εφαρμογές

2.4.2.1 Μέτρηση Αξονικών Παραμορφώσεων



Εικόνα 2.4-3: Διάταξη Επιμηκυνσιόμετρων για Μέτρηση Αξονικών Παραμορφώσεων

Στο εικόνα 2.4-3, φαίνεται η διάταξη σε full-bridge για την μέτρηση της εφελκυστική ή της θλιπτικής δύναμης που ασκείται σε μια δοκό. Για την περίπτωση που ακολουθηθεί διάταξη μισής γέφυρας (half bridge) αρκεί να χρησιμοποιηθούν μόνο τα επιμηκυνσιόμετρα 1 και 2. Βέβαια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες διατάξεις όπως η γέφυρα τετάρτου (quarter bridge-επιμηκυνσιόμετρο 1) και η διαγώνια γέφυρα (diagonal bridge - επιμηκυνσιόμετρο 1 και 3).

Συγκεκριμένα, η γέφυρα τετάρτου έχει ως βασικό μειονέκτημα την είσοδο των καμπτικών παραμορφώσεων στο τελικό αποτέλεσμα. Επίσης οι θερμικές παραμορφώσεις εισάγονται στο αποτέλεσμα κάτι που μπορεί να αντιμετωπισθεί χρησιμοποιώντας γέφυρα τετάρτου με ένα επιμηκυσιόμετρο για αντιστάθμιση της θερμοκρασίας. Αυτή η προσθήκη στην γέφυρα τετάρτου μπορεί να μην βελτιώσει κατά πολύ τις μετρήσεις. Αυτό θα συμβεί γιατί ο συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής του υλικού μπορεί να μην ξεπερνάει αυτόν του τοποθετημένου επιμηκυσιόμετρου, κάτι που θα οδηγήσει στην αχρήστευση του και στην επιστροφή σε μια απλή γέφυρα τετάρτου.

Κλάδος Γέφυρας	R_1	R_2	R_3	R_4	Τελική Εξίσωση
Εξίσωση Γέφυρας	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_i$				
Γέφυρα Τετάρτου (Quarter Bridge)	SG1	R_c	R_c	R_c	$\varepsilon_i = \varepsilon_1$
Γέφυρα Τετάρτου (Quarter Bridge) με ένα Επιμηκυσιόμετρο για Αντιστάθμιση της Θερμοκρασίας (Compensating Strain Gauge)	SG1	K	R_c	R_c	$\varepsilon_i = \varepsilon_1$
Μισή Γέφυρα (Half Bridge)	SG1	SG2	R_c	R_c	$\varepsilon_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_q = (1 + \nu)\varepsilon_i$
Διαγώνια Γέφυρα (Diagonal Bridge)	SG1	R_c	SG3	R_c	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_1$
Διαγώνια Γέφυρα (Diagonal Bridge) με δύο Επιμηκυσιόμετρα για Αντιστάθμιση της θερμοκρασίας (Compensating Strain Gauges)	SG1	K	SG3	K	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_1$
Πλήρης Γέφυρα (Full Bridge)	SG1	SG2	SG3	SG4	$\varepsilon_i = 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_q) = 2(1 + \nu)\varepsilon_i$

Πίνακας 2.4-1: Διατάξεις Μέτρησης Αξονικών Παραμορφώσεων

Όσον αφορά την διάταξη σε half bridge, στο αποτέλεσμα επηρεάζονται και οι καμπτικές παραμορφώσεις ενώ οι θερμικές απαλείφονται χωρίς την χρησιμοποίηση κάποιου επιμηκυσιόμετρου για την θερμοκρασιακή αντιστάθμιση. Σ' αντίθεση όμως με την half bridge, η diagonal bridge είναι ικανή να απαλείψει τις καμπτικές παραμορφώσεις και με την χρήση επιμηκυσιόμετρου για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας τις θερμικές παραμορφώσεις. Πρέπει να σημειωθεί, ότι με την χρήση του συγκεκριμένου επιμηκυσιόμετρου υπάρχει ο κίνδυνος να μην απαλειφθούν οι θερμικές παραμορφώσεις βάσει της ανάλυσης που έγινε και στην γέφυρα τετάρτου (quarter bridge).

Όπως αναμενόταν, τα πλεονεκτήματα της διάταξης σε πλήρη γέφυρα την καθιστούν μεγαλύτερης ακρίβειας από τις υπόλοιπες αλλά και κατάλληλη για τον υπολογισμό αξονικών δυνάμεων. Αρχικά, με την χρήση της συγκεκριμένης διάταξης εξαιρούνται οι θερμικές παραμορφώσεις και στο αποτέλεσμα δεν επηρεάζονται οι καμπτικές. Επίσης, είναι αρκετά το σημαντικό ότι μειώνονται τα σφάλματα σύνδεσης και θορύβου.

2.4.2.1.1.1 Υπολογισμός Δυνάμεων Μέσω των Μετρήσεων

Η τάση σ που ασκείται στη δοκό είναι, ανάλογα με την διάταξη που έχει επιλεχτεί:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_l E}{2(1+\nu)} : \text{Full bridge}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_l E}{(1+\nu)} : \text{Half bridge}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_l E}{2} : \text{Diagonal bridge}$$

$$\sigma = \varepsilon_l E : \text{Quarter bridge}$$

όπου ε είναι η παραμόρφωση που υπολογίζεται από τα επιμηκυσσιόμετρα και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Η δύναμη που ασκείται στον άξονα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F_y = \sigma A$$

όπου A είναι η διατομή του άξονα που είναι τοποθετημένα τα επιμηκυσσιόμετρα.

Συνεπώς, σύμφωνα με την σχέση για το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

η δύναμη προκύπτει:

$$F_y = \frac{\varepsilon_l E}{2(1+\nu)} A = \varepsilon_l G A : \text{Full bridge}$$

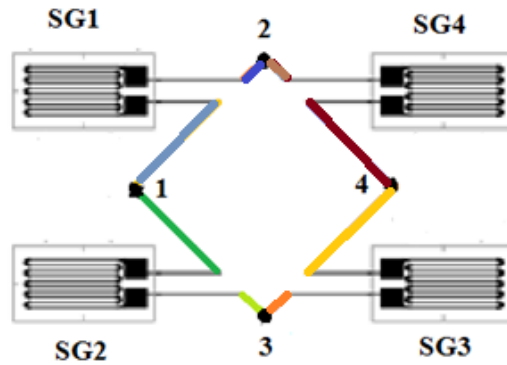
$$F_y = \frac{\varepsilon_l E}{(1+\nu)} A = 2\varepsilon_l G A : \text{Half bridge}$$

$$F_y = \frac{\varepsilon_l E}{2} A = \varepsilon_l G (1 + \nu) A : \text{Diagonal bridge}$$

$$F_y = \varepsilon_l E A : \text{Quarter bridge}$$

2.4.2.1.2 Σχεδίαση Κυκλώματος για Full Bridge

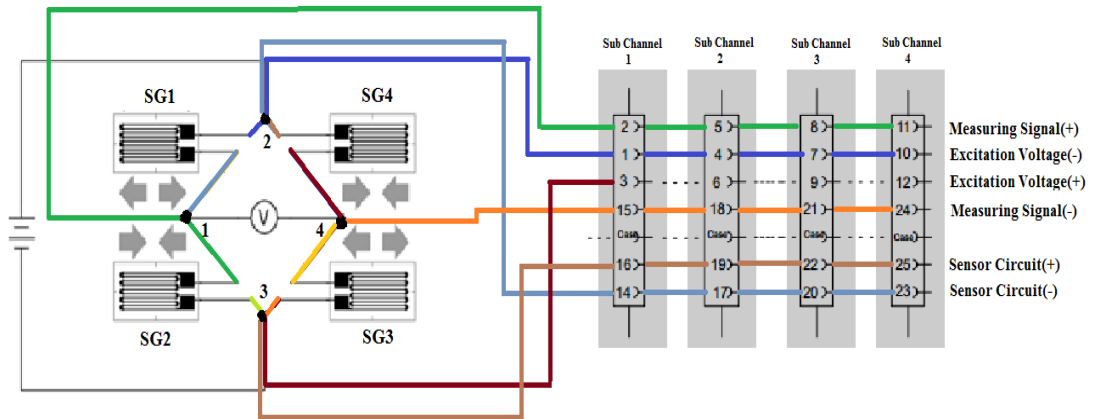
Μετά την τοποθέτηση των strain gauges, έγινε η δημιουργία του κατάλληλου κυκλώματος ακολουθώντας την αρίθμηση στα strain gauges που δόθηκε στο αρχικό σχήμα παρουσίασης της διάταξης για μέτρηση των αξονικών δυνάμεων.



Εικόνα 2.4-4: Σύνδεση Κυκλώματος σε Full Bridge

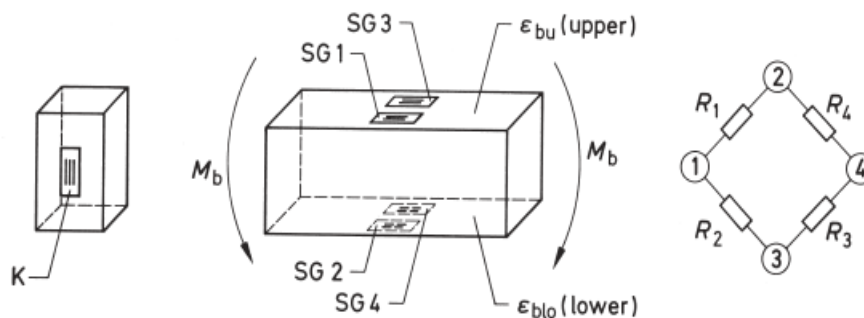
2.4.2.1.3 Σύνδεση με το MGC-plus

Για να συνδεθεί ο αισθητήρας με το MGC χρησιμοποιήθηκε καλώδιο Ethernet που ένωνε το κύκλωμα full bridge με εξωτερικό αντάπτορα. Ο αντάπτορας αυτό εν συνεχεία συνδεόταν με μέσω διαύλου με το καταγραφικό και ενωνόταν με μια υποδοχή AP810i ή AP815i ανάλογα με τις διαθέσιμες υποδοχές του καταγραφικού. Η σύνδεση της γέφυρας Wheatstone με τον αντάπτορα απεικονίζεται στην εικόνα 2.4-5, όπου έγινε με την βοήθεια καλωδίου Ethernet. Οι θύρες τοποθέτησης των άκρων του καλωδίου Ethernet διαφέρουν ανάλογα με τον αριθμό του υποκαναλιού που έχει επιλεγεί. Ο αριστερά αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στο κανάλι 5.4 του καταγραφικού ενώ ο δεξιά αισθητήρας στο κανάλι 5.6.



Εικόνα 2.4-5: Σύνδεση Κυκλώματος σε Full Bridge με το MGCplus

2.4.2.2 Μέτρηση Καμπτικών Παραμορφώσεων



Εικόνα 2.4-6: Διάταξη Επιμηκυνσιόμετρων για Μέτρηση Καμπτικών Παραμορφώσεων

Στην εικόνα 2.4-6, φαίνεται η διάταξη σε full-bridge για την μέτρηση της καμπτικής ροπής που ασκείται σε μια δοκό. Για την περίπτωση που ακολουθηθεί διάταξη μισής γέφυρας (half bridge) αρκεί να χρησιμοποιούνται μόνο τα επιμηκυνσιόμετρα 1 και 2. Βέβαια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες διατάξεις όπως η γέφυρα τετάρτου (quarter bridge-επιμηκυνσιόμετρο 1) και η διαγώνια γέφυρα (diagonal bridge - επιμηκυνσιόμετρο 1 και 3) .

2.4.2.2.1 Υπολογισμός Ροπών μέσω των Μετρήσεων

Η τάση σ που ασκείται στη δοκό είναι, ανάλογα με την διάταξη που έχει επιλεχτεί:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_l E}{4} : \text{Full bridge}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_l E}{2} : \text{Half bridge}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_l E}{2} : \text{Diagonal bridge}$$

$$\sigma = \varepsilon_l E : \text{Quarter bridge}$$

όπου ε είναι η παραμόρφωση και E το μέτρο ελαστικότητας του άξονα.

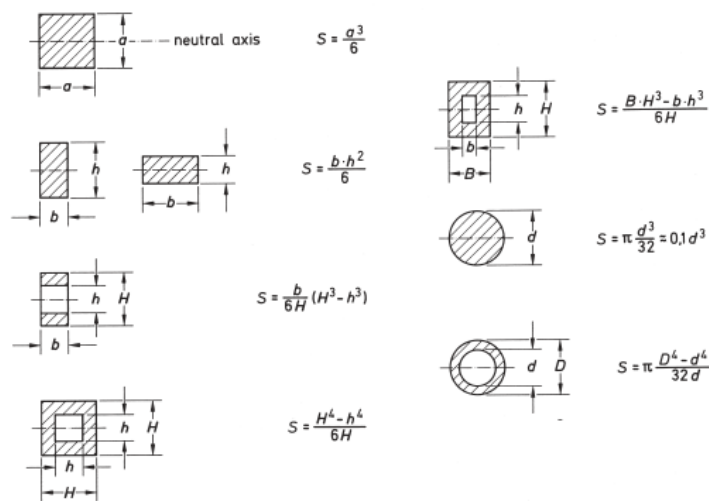
Η ροπή που ασκείται στον άξονα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$M_2 = \sigma S$$

όπου S είναι ένα γεωμετρικό μέγεθος εξαρτημένο από το σχήμα της διατομής.

Κλάδος Γέφυρας	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	Τελική Εξίσωση
Εξίσωση Γέφυρας	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_i$				
Γέφυρα Τετάρτου (Quarter Bridge)	SG1	R _c	R _c	R _c	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$
	SG2	R _c	R _c	R _c	$\varepsilon_i = \varepsilon_{lo}$
Γέφυρα Τετάρτου με ένα Επιμηκυνσιόμετρο για Αντιστάθμιση της Θερμοκρασίας (Compensation Strain Gauge)	SG1	K	R _c	R _c	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$
	SG2	K	R _c	R _c	$\varepsilon_i = \varepsilon_{lo}$
Μισή Γέφυρα (Half Bridge)	SG1	SG2	R _c	R _c	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_b$
Διαγώνια Γέφυρα (Diagonal Bridge)	SG1	R _c	SG3	R _c	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{bu}$
	SG2	R _c	SG4	R _c	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{lo}$
Διαγώνια Γέφυρα με δύο Επιμηκυνσιόμετρα για αντιστάθμιση της θερμοκρασίας (Compensation Strain Gauges)	SG1	K	SG3	K	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{bu}$
	SG2	K	SG4	K	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{lo}$
Πλήρης Γέφυρα (Full Bridge)	SG1	SG2	SG3	SG4	$\varepsilon_i = 4\varepsilon_b$

Πίνακας 2.4-2: Διατάξεις Μέτρησης Καμπτικών Παραμορφώσεων



Εικόνα 2.4-7: Διάφορες Τιμές S για διάφορα Σχήματα Φόρτισης

Συνεπώς, η καμπτική ροπή προκύπτει:

$$M = \frac{\varepsilon_l E}{4} S: \text{ Full bridge}$$

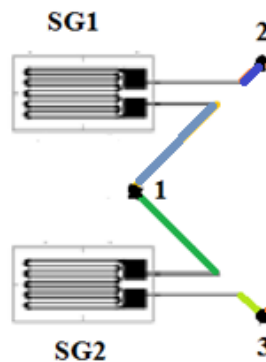
$$M = \frac{\varepsilon_l E}{2} S: \text{ Half bridge}$$

$$M = \frac{\varepsilon_l E}{2} S: \text{ Diagonal bridge}$$

$$M = \varepsilon_l E S: \text{ Quarter bridge}$$

2.4.2.2.2 Σχεδίαση Κυκλώματος για Half Bridge

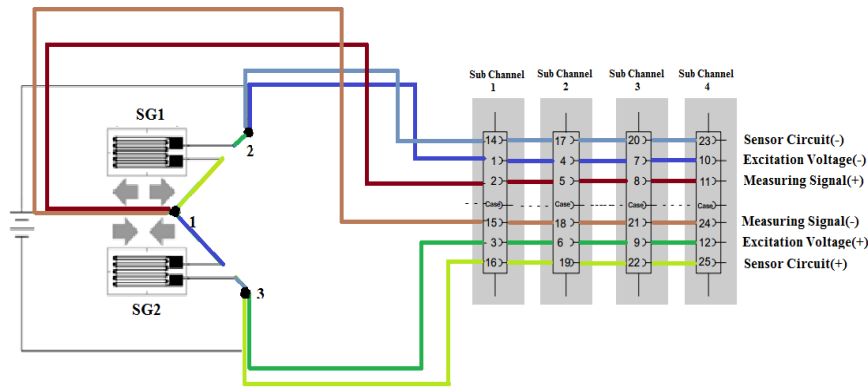
Μετά την τοποθέτηση των strain gauges, έγινε η δημιουργία του κατάλληλου κυκλώματος ακολουθώντας την αρίθμηση στα strain gauges που δόθηκε στο αρχικό σχήμα παρουσίασης της διάταξης για μέτρηση των διατμητικών δυνάμεων.



Εικόνα 2.4-8: Σύνδεση Κυκλώματος σε Half Bridge

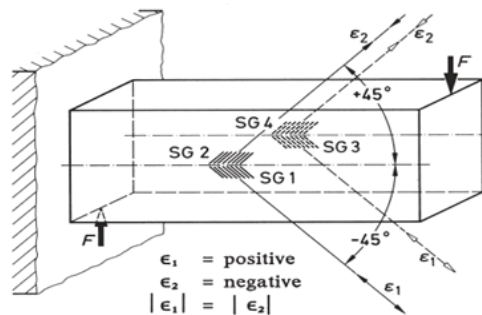
2.4.2.2.3 Σύνδεση με το MGC-plus

Για να συνδεθεί ο αισθητήρας με το MGC χρησιμοποιήθηκε καλώδιο Ethernet που ένωνε το κύκλωμα full bridge με εξωτερικό αντάπτορα. Ο αντάπτορας αυτό εν συνεχεία συνδεόταν με μέσω διαύλου με το καταγραφικό και ενωνόταν με μια υποδοχή AP810i ή AP815i ανάλογα με τις διάθεσιμες υποδοχές του καταγραφικού. Η σύνδεση της γέφυρας Wheatstone με τον αντάπτορα απεικονίζεται στην εικόνα 2.4-9, όπου έγινε με την βοήθεια καλωδίου Ethernet. Οι θύρες τοποθέτησης των άκρων του καλωδίου Ethernet διαφέρουν ανάλογα με τον αριθμό του υποκαναλιού που έχει επιλεχτεί. Ο αριστερά αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στο κανάλι 6.1 του καταγραφικού ενώ ο δεξιά αισθητήρας στο κανάλι 6.3.



Εικόνα 2.4-9: Σύνδεση Κυκλώματος σε Half Bridge με το MGCplus

2.4.2.3 Μέτρηση Διατμητικών Παραμορφώσεων



Εικόνα 2.4-10: Διάταξη Επιμηκυνσιόμετρων για τη Μέτρηση Διατμητικών Παραμορφώσεων

Στο εικόνα 2.4-10, φαίνεται η διάταξη σε full-bridge για την υπολογισμό των διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται σε μια δοκό. Για την περίπτωση που ακολουθηθεί διάταξη half bridge αρκεί να χρησιμοποιούνται μόνο τα επιμηκυνσιόμετρα 1 και 2 ή τα 3 και 4.

2.4.2.3.1 Υπολογισμός Διατμητικών Δυνάμεων

Η διατμητική τάση τ που εφαρμόζεται στην δοκό είναι:

$$\tau = \gamma G$$

οπου γ είναι η γωνιακή παραμόρφωση και G το μέτρο διάτμησης του άξονα.

Η διατμητική παραμόρφωση ϵ_{45} που υπολογίζεται από κάθε ζεύγος strain gauge είναι:

$$\epsilon_{45} = \frac{\gamma}{2} = \frac{\tau}{2G}$$

Επιλύοντας την τελευταία σχέση ως προς τ προκύπτει:

$$\tau = 2\epsilon_{45}G$$

Δεδομένου ότι έχουμε σχηματίσει full-bridge με τα δύο ζεύγη strain gauge προκύπτει τελικά :

$$\tau = \frac{1}{2} \varepsilon_i G.$$

Ενώ για την περίπτωση που έχουμε διάταξη half bridge:

$$\tau = \varepsilon_i G.$$

όπου ε_i η συνολική μέτρηση που παίρνουμε από τα strains gauges.

Για την μετατροπή των τάσεων σε δυνάμεις χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\tau = \frac{F}{A} c_A$$

όπου A η διατομή του άξονα σε εκείνο το σημείο και c_A ο συντελεστής σχήματος που αντιστοιχεί στον δακτυλιοειδή άξονα, όπου σύμφωνα με την βιβλιογραφία ο συντελεστής σχήματος είναι:

$$c_A = 2$$

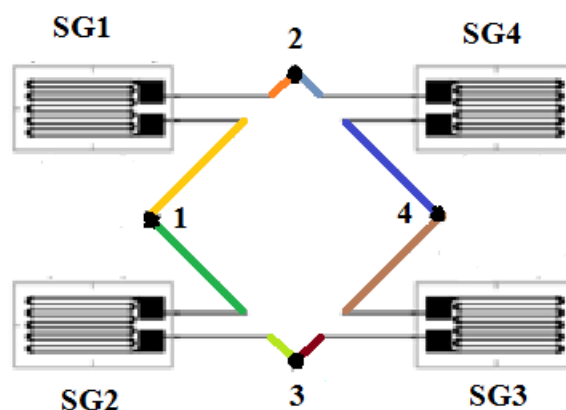
Τελικά οι διατμητικές δυνάμεις προκύπτουν:

$$F = \frac{\varepsilon_i G A}{2 c_A} : \text{Full bridge}$$

$$F = \frac{\varepsilon_i G A}{c_A} : \text{Half bridge.}$$

2.4.2.3.2 Σχεδίαση Κυκλώματος για Full Bridge

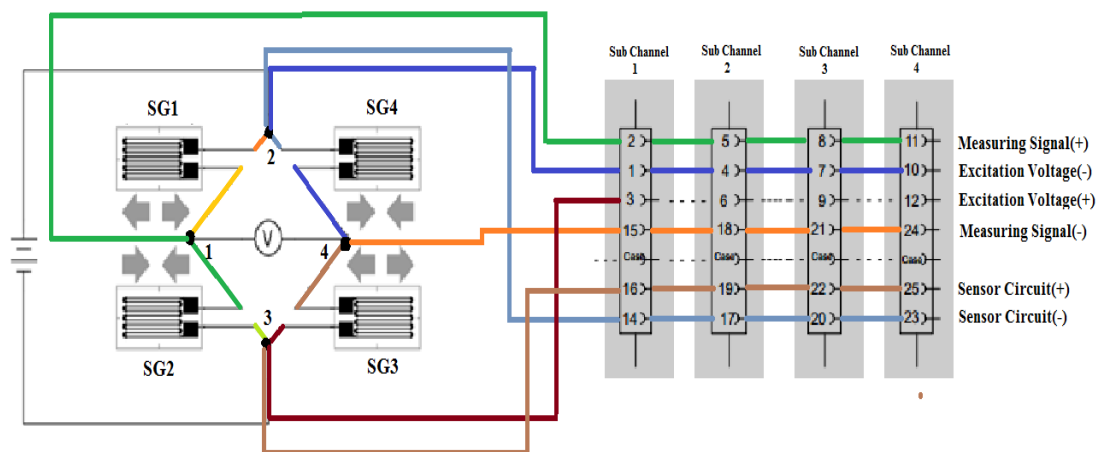
Μετά την τοποθέτηση των strain gauges, έγινε η δημιουργία του κατάλληλου κυκλώματος ακολουθώντας την αρίθμηση στα strain gauges που δόθηκε στο αρχικό σχήμα παρουσίασης της διάταξης για μέτρηση των διατμητικών δυνάμεων.



Εικόνα 2.4-11: Σύνδεση Κυκλώματος σε Full Bridge

2.4.2.3.3 Σύνδεση με το MGC-plus

Για να συνδεθεί ο αισθητήρας με το MGC χρησιμοποιήθηκε καλώδιο Ethernet που ένωνε το κύκλωμα full bridge με εξωτερικό αντάπτορα. Ο αντάπτορας αυτό εν συνεχεία συνδεόταν με μέσω διαύλου με το καταγραφικό και ενωνόταν με μια υποδοχή AP810i ή AP815i ανάλογα με τις διαθέσιμες υποδοχές του καταγραφικού. Η σύνδεση της γέφυρας Wheatstone με τον αντάπτορα απεικονίζεται στο παρακάτω εικόνα 2.4-12, όπου έγινε με την βοήθεια καλωδίου Ethernet. Οι θύρες τοποθέτησης των άκρων του καλωδίου Ethernet διαφέρουν ανάλογα με τον αριθμό του υποκαναλιού που έχει επιλεχτεί. Ο αριστερά αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στο κανάλι 5.2 του καταγραφικού ενώ ο δεξιά αισθητήρας στο κανάλι 5.5.



Εικόνα 2.4-12: Σύνδεση Κυκλώματος σε Full Bridge με το MGCplus

2.5 Αισθητήρας HF-500C

2.5.1 Αρχή Λειτουργίας

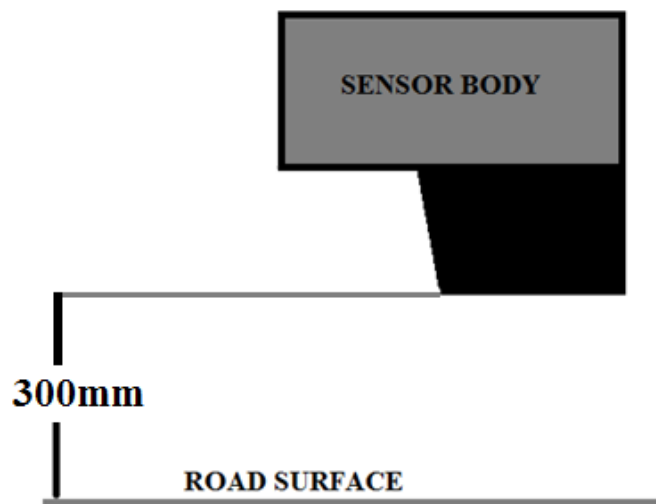
Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στην αρχή της οπτικής τριγωνοποίησης. Ένα ορατό κοκκίνο laser είναι εστιασμένο στην επιφάνεια του δρόμου. Το φως που αντανακλάται ευθυγραμμίζεται σε μια διάταξη συζευγμένου φορτίου (CCD array-charged coupled device: ένας καταχωρητής ολίσθησης, μια πολύ μικρή πλάκα πάνω στην οποία βρίσκονται διατεταγμένα έως και μερικά εκατομμύρια στοιχεία ενός ημιαγωγικού υλικού ευαίσθητου στο φως και χρησιμεύει για τη λήψη ειδώλων). Η απόσταση από το αντικείμενο υπολογίζεται από την θέση της κουκίδας φωτός και τελικά το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι ακριβώς ανάλογο του μετρούμενου ύψους.



Εικόνα 2.5-1: Αισθητήρας HF-500C

2.5.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- Εταιρία Κατασκευής: Corrsys
- Εύρος Μετρήσεων: 125-625mm
- Τοποθέτηση: 375mm από το έδαφος



Εικόνα 2.5-2: Θέση Τοποθέτησης HF-500C

- Ανάλυση: 0,2mm
- Γραμμικότητα: $\pm 0,2\%$
- Μέγιστος Ρυθμός Δειγματοληψίας: 1kHz
Σε περίπτωση επιφάνειας με υψηλά επίπεδα αντανάκλασης μπορεί να φτάσει και μέχρι 8kHz.
- Πηγή Φωτός: Laser
- Ισχύς Laser: <5mW
- Τάξη Laser: 3R (IEC 60825-1)
- Μήκος Κύματος: 660 nm(red)
- Προσεγγιστικό μέγεθος στίγματος: 1mm×2mm
- Έξοδοι: Αναλογικό σήμα μέσω RS232

- Προδιαγραφές Συστήματος:
 Τάση Εξόδου : 0-10V
 Τάση Εισόδου: 9-18V (125mA @ 12V DC)
- Εύρος Θερμοκρασιών:
 Σε λειτουργία : -5 – 60°C
 Εκτός Λειτουργίας: -10 – 70°C
- Σύστημα Προστασίας Αισθητήρα: IP 67
- Βάρος: 155gr
- Διαστάσεις Αισθητήρα: 100mm × 200mm × 40mm

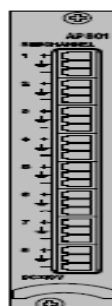
2.5.3 Εφαρμογές

Ο αισθητήρας είναι σχεδιασμένος για εφαρμογές σε δυναμικές και στατικές μετρήσεις οχημάτων. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ύψους, της μετατόπισης του οχήματος, τον καθορισμό της γωνίας κύλισης και της γωνίας camber με κατάλληλη διάταξη και τέλος την μετατόπιση και την ανύψωση των τροχών.

2.5.4 Σύνδεση με MGC-plus

Για την σύνδεση των αισθητήρων με το σύστημα συλλογής μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η κάρτα AP801 όπου το σήμα ενισχυόταν μέσω εσωτερικών ενισχυτών στο MGC-plus κατηγορίας ML801B.

AP801
for 8 DC voltage sources



Εικόνα 2.5-3: Κάρτα Σύνδεσης Αισθητήρα με το MGCplus

2.6 Αισθητήρας Correvit L-CE

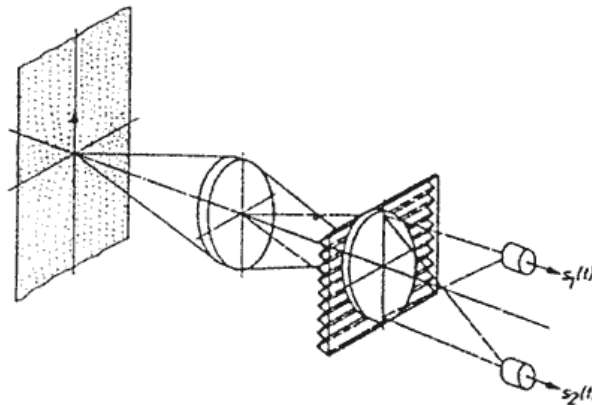
2.6.1 Αρχή Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέθοδο οπτικής συσχέτισης χωρικών συχνοτήτων μέσω ενός φίλτρου. Η δομή της επιφάνειας αναπαράγεται στο φίλτρο αυτό σε ένα φάσμα. Ο φακός είναι

τοποθετημένος πίσω από το πλέγμα και συσσωρεύει φως σε ένα φωτοηλεκτρικό ανιχνευτή. Ένα κινούμενο, κάθετα στις γραμμές πλέγματος, αντικείμενο παράγει μια διαμόρφωση του φωτορεύματος. Η συχνότητα του εισερχόμενου σήματος είναι ανάλογη της ταχύτητας. Η ταχύτητα αυτή είναι η ταχύτητα κίνησης του πεδίου στο οποίο σχηματίζεται το είδωλο και βαζίζεται στον τύπο:

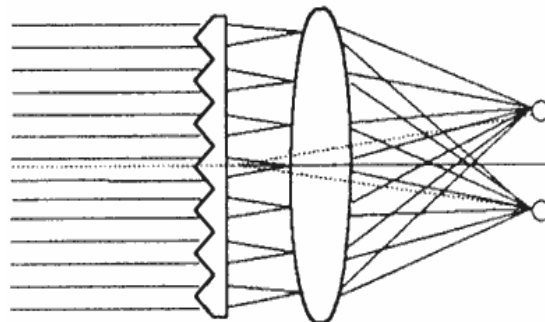
$$f = \frac{M}{g} v$$

όπου M η κλίμακα προβολής των οπτικών, g η σταθερά του πλέγματος, f η συχνότητα του σήματος και v η ταχύτητα του αντικειμένου. Η διαμόρφωση του φωτορεύματος είναι υπερτίθεται με ένα φωτορέυμα μεγαλύτερου μέτρου. Ένας χαμηλής συχνότητας και σταθερός όρος του φωτός δημιουργείται στο σήμα από την δομή του αντικειμένου. Ο όρος αυτός είναι μεγαλύτερος από το μισό σταθερό φάσμα του ανιχνευτή. Ο περιορισμός του όρου αυτού επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός πρίσματος μέσω της μεθόδου push-pull. Το φως που πέφτει στις γραμμές του πλέγματος συσσωρεύεται σε δυο φωτοηλεκτρικούς ανιχνευτές από τους φακούς.



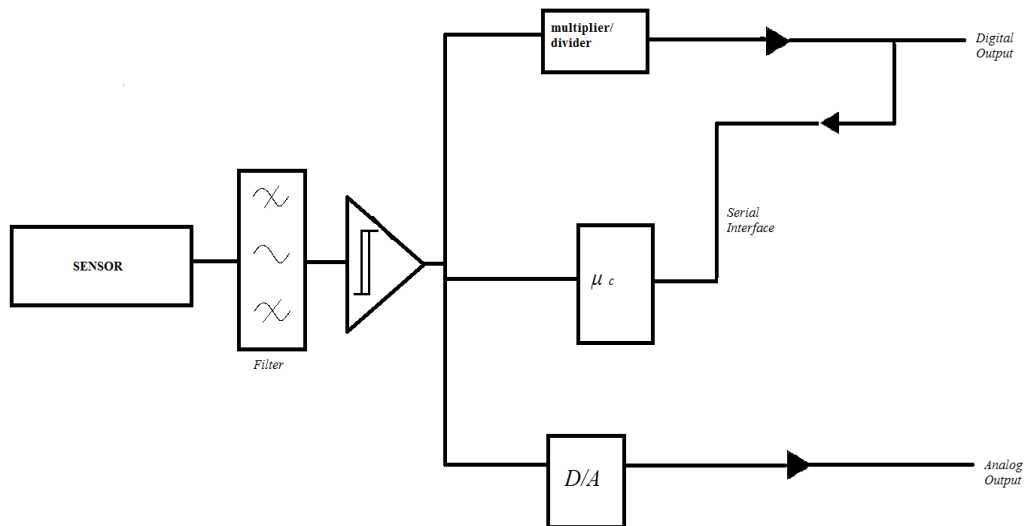
Εικόνα 2.6-1: Δύο Καταγραφικά Σήματος

Κάθε ανιχνευτής δέχεται το φως από ακτίνες που έχουν την ίδια κλίση. Έτσι, δημιουργούνται δύο σήματα με διαφορά φάσης 180° και με αυτόν τον τρόπο η εναλλαγή στο σήμα μειώνει τις παρεμβολές από τον χαμηλής συχνότητας όρο.



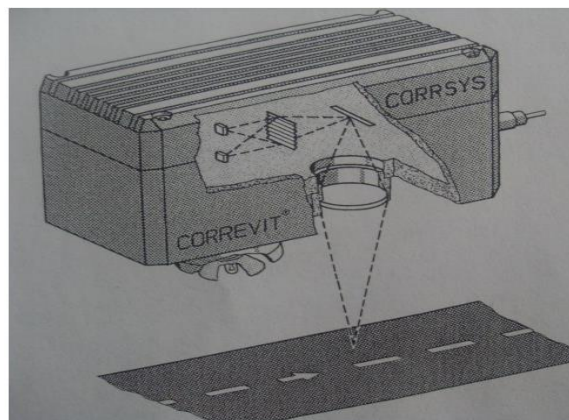
Εικόνα 2.6-2: Δύο Σήματα με Διαφορά Φάσης 180°

Σύμφωνα με το δομικό διάγραμμα του αισθητήρα για τον υπολογισμό της ταχύτητας και της απόστασης, παρατηρείται το οπτικό τμήμα με έξοδο την συχνότητα, το φίλτρο που επιτρέπει την διέλευση της επιθυμητής συχνότητας, τα περιφερειακά στοιχεία (τους πολλαπλασιαστές, τον ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα και τους διαιρέτες για την ρύθμιση του συντελεστή βαθμονόμησης) και τον μικρο-ελεγκτή για τον έλεγχο των εισόδων και τον εξόδων. Λόγω της ύπαρξης δύο καναλιών, ο αισθητήρας δέχεται δύο συχνότητες.



Εικόνα 2.6-3: Δομικό Διαγράμμα του Αισθητήρα

Η διαφορά των συχνοτήτων αυτών οφείλεται στην περιστροφή του αισθητήρα ως προς την επιφάνεια μέτρησης. Στην συνέχεια, ο μικρο-ελεγκτής υπολογίζει το εγκάρσιο και το διαμήκες διάνυσμα της ταχύτητας μέσω της σύγκρισης των συχνοτήτων και σαν έξοδο δίνει το μέτρο και την διεύθυνση της ταχύτητας.



Εικόνα 2.6-4: Κάρτα Σύνδεσης Αισθητήρα με το MGCplus

2.6.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- Εταιρία Κατασκευής: Corrsys
- Εύρος Ταχύτητας: 0,5 – 400 kph, βέλτιστο 600 kph

- Πέδηση: 0,1 kph
- Ανάλυση: 2,2mm
- Περιοχή Λειτουργίας του Αισθητήρα: 300±60mm
- Σφάλμα Μέτρησης: < ±0,1%
- Ισχύς: <5mW
- Έξοδοι:
1 Αναλογική στην διαμήκη κατεύθυνση: Τάση 0-10V
1-2 Ψηφιακές μέσω RS485: 0.1bits 460/340pulses/m
- Εύρος Θερμοκρασιών:
Σε λειτουργία : -25 – 50°C
Εκτός Λειτουργίας: -40 – 85°C
- Σύστημα Προστασίας Αισθητήρα: IP 67
- Βάρος: 1,5 kg
- Διαστάσεις Αισθητήρα: 164mm × 78mm × 84mm

Το αναλογικό σήμα της ταχύτητας είναι ρυθμισμένο στα 25mV/kph. Με την ευαισθησία του αισθητήρα σ' αυτά τα επίπεδα, η μέγιστη ταχύτητα που μπορούμε να μετρήσουμε είναι τα 400kph.



Εικόνα 2.6-5: Correvit L-CE

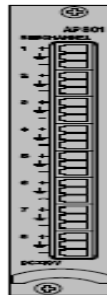
2.6.3 Εφαρμογές

Ο αισθητήρας αυτός επιτρέπει την μέτρηση της ταχύτητας και της απόστασης του υπο μελέτη αντικειμένου. Επίσης με την κατάλληλη τοποθέτηση του αισθητήρα αυτού μπορεί να μετρηθεί και η επιτάχυνση, η επιβράδυνση και η ολίσθηση κατά την οδήγηση.

2.6.4 Σύνδεση με MGC-plus

Για την σύνδεση των αισθητήρων με το σύστημα συλλογής μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η κάρτα AP801 όπου το σήμα ενισχυόταν μέσω εσωτερικών ενισχυτών στο MGC-plus κατηγορίας ML801B.

AP801
for 8 DC voltage sources

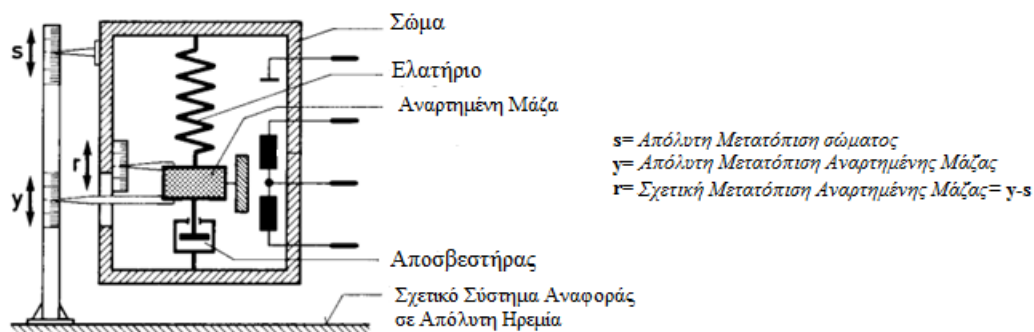


Εικόνα 2.6-6: Κάρτα Σύνδεσης Αισθητήρα με το MGCplus

2.7 Επιταχυνσιόμετρα HBM B12

2.7.1 Αρχή Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των επιταχυνσιομέτρων της HBM βασίζεται σ' ένα διαμήκες σύστημα δονήσεων που αποτελείται από μια αναρτημένη μάζα συνδεδεμένη με το σώμα μέσω ενός αποσβεστήρα.



Εικόνα 2.7-1: Διαμήκες Σύστημα Δονήσεων

Το σύστημα μέτρησης, που φαίνεται στην εικόνα 2.7-1, είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με ένα σχετικό σύστημα αναφοράς σε απόλυτη ηρεμία. Η επιτάχυνση του σώματος μεταφέρεται μέσω του ελατηρίου στην αναρτημένη μάζα και με αυτό τον τρόπο τίθεται σε κίνηση. Η κίνηση της μάζας μεταβάλλει την απόσταση y , που μετριέται ως προς φανταστικό σύστημα αναφοράς) και την απόσταση r , που μετριέται ως προς το σώμα.

Σε κατάλληλο εύρος συχνοτήτων, η σχετική μετατόπιση της μάζας ($r = y - s$) είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Αυτή η σχέση μεταξύ της επιτάχυνσης που θα μετρηθεί και της σχετικής μετατόπισης της αναρτημένης μάζας μπορεί να προκύψει μέσω των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος ταλάντωσης που μελετήθηκε. Με την εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης που ασκείται στο σώμα του επιταχυνσιόμετρου, το σύστημα μπορεί να αναλυθεί μέσω μιας μη-ομογενούς γραμμικής διαφορικής εξίσωσης.

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + k \frac{dr}{dt} + cr = -m \frac{d^2 s}{dt^2} = -ma$$

όπου m =αναρτημένη μάζα [kg]

k =σταθερά απόσβεσης [$\frac{Nsec}{cm}$]

c =σταθερά ελατηρίου [$\frac{N}{cm}$]

Ο πρώτος όρος αφορά τις αδρανειακές δυνάμεις, ο δεύτερος την δύναμη λόγω της απόσβεσης και τέλος ο τρίτος όρος την δύναμη του ελατηρίου. Αντικαθιστώντας στον τύπο τις σχέσεις για την σταθερά του ελατηρίου και τον συντελεστή απόσβεσης:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

$$D = \frac{k}{2m\omega_0}$$

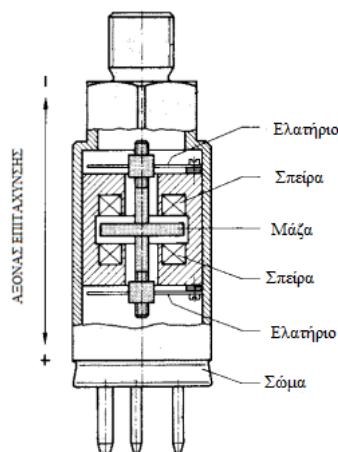
προκύπτει:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + 2D\omega_0 \frac{dr}{dt} + \omega_0^2 r = -\frac{d^2 s}{dt^2} = -a$$

Για την μέτρηση της επιτάχυνσης, το σύστημα που προαναφέρθηκε χαρακτηρίζεται από ένα σκληρό ελατήριο και μια ιδιαίτερα χαμηλή σταθερά απόσβεσης, με αποτέλεσμα οι πρώτοι όροι να μπορούν να απαλειφθούν και να προκύψει ότι η επιτάχυνση της αναρτημένης μάζας είναι ανάλογη της σχετική μετατόπισης της.

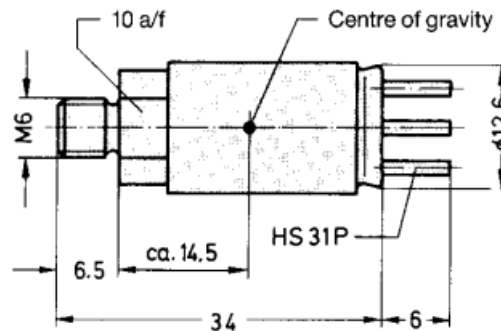
$$\omega_0^2 r = -a$$

Το σύστημα ταλάντωσης, που αναλύθηκε, αποτελεί τον μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για την μέτρηση της επιτάχυνσης και η αντιστοίχιση των συστημάτων που αναφέρθηκαν στο εσωτερικό του επιταχυνσιόμετρου φαίνονται στην εικόνα 2.7-2.



Εικόνα 2.7-2: Εσωτερικό Επιταχυνσιόμετρου HBM B12

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι σπείρες στο εσωτερικό του επιταχυνσιόμετρου μετατρέπουν την σχετική μετατόπιση της μάζας σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο μεταφέρεται στον ενισχυτή για επεξεργασία. Αυτό συμβαίνει γιατί η μετατόπιση της αναρτημένης μάζας παράγει αντίθετες μεταβολές στην επαγωγή των σπειρών, οι οποίες μαζί δημιουργούν μια επαγωγική γέφυρα που μετατρέπεται σε Wheatstone bridge μέσω των ενισχυτών. Η γέφυρα που έχει δημιουργηθεί «χάνει» την ισορροπία της με την μετατόπιση της αναρτημένης μάζας και παράγει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της σχετικής μετατόπισης της αναρτημένης μάζας και κατ' επέκταση ανάλογο της επιτάχυνσης.



Εικόνα 2.7-3: Σκαρίφημα Επιταχυνσιόμετρου HBM B12

2.7.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- Εταιρία Κατασκευής: HBM
- Χαρακτηριστική Συχνότητα: 200Hz
- Εργαζόμενη Συχνότητα: 100Hz
- Συντελεστής Απόσβεσης: $0.6 \pm 0.1\text{mm}$
- Ονομαστική Επιτάχυνση: $\pm 200 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- Ευαισθησία: $< \pm 80 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$



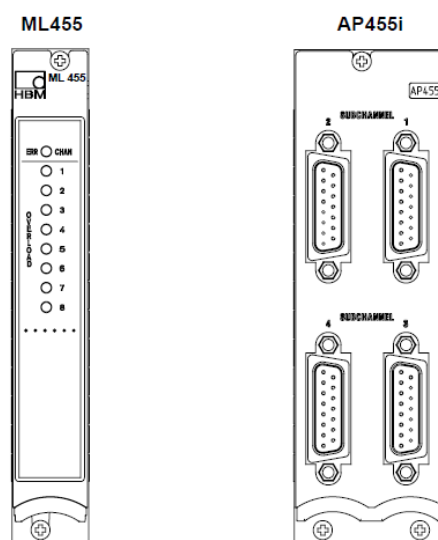
Εικόνα 2.7-4: Επιταχυνσιόμετρα HBM B12 Μετρώντας (α) Διαμήκη Επιτάχυνση (β)Εγκάρσια Επιτάχυνση

2.7.3 Εφαρμογές

Τα επιταχυνσιόμετρα της HBM χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν κραδασμούς, παλμικές επιταχύνσεις καθώς και συνεχή επιτάχυνση. Το μέγεθός τους και το μικρό βάρος του επιτρέπει την τοποθέτησή τους σε οποιαδήποτε επιφάνεια και θέση.

2.7.4 Σύνδεση με MGC-plus

Για την σύνδεση των ενισχυτών με το σύστημα συλλογής μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η υποδοχή AP455i, όπου το σήμα που εισάγεται ενισχύεται μέσω του ML455 που αποτελεί ενισχυτή πολλαπλών καναλιών.



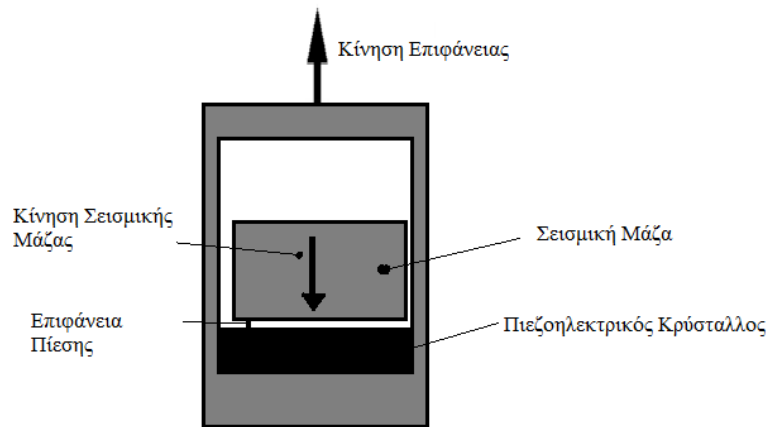
Εικόνα 2.7-5: Εσωτερικός Ενισχυτής του MGCplus (α)ML455 που αντιστοιχεί στην κάρτα (β)AP 455i

Η χρήση του ενισχυτή ML455 της HBM προσεφέρει εξαιρετικές συνθήκες μέτρησης και μειώνει διαφόρων ειδών σφάλματα όπως ο «θόρυβος».

2.8 Επιταχυνσιομετρα Kistler 8704B

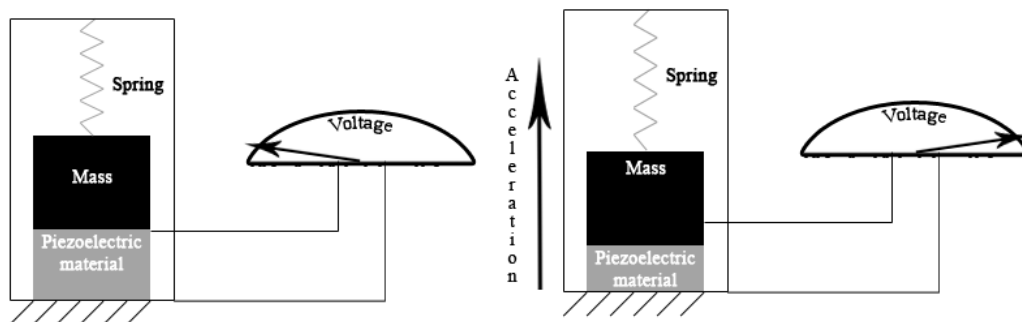
2.8.1 Αρχή Λειτουργίας

Τα επιταχυνσιόμετρα της Kistler αποτελούνται από ένα σταθερό εγκάρσιο πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο από κρύσταλλο quartz και μια μάζα που τίνει να κινηθεί αντίθετα από την κατεύθυνση της επιτάχυνσης λόγω αδράνειας και για αυτό ονομάζεται και σεισμική μάζα.



Εικόνα 2.8-1: Επιταχυνσιόμετρο Kistler 8704B

Δεδομένου ότι το επιταχυνσιόμετρο έχει τοποθετηθεί κάθετα σε κάποια επιφάνεια, η κίνηση της θα μεταφερθεί στην σεισμική μάζα και αυτή θα έρθει σε μόνιμη επαφή με το πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο. Έτσι θα εμφανιστεί μια αρχικά πίεση στο αισθητήριο και κατ' επέκταση, λόγω των τάσεων που θα παραχθούν, μια διατμητική δύναμη.



Εικόνα 2.8-2: Αρχή Λειτουργίας Επιταχυνσιόμετρου Kistler 8704B

Η ασκούμενη αυτή δύναμη προκαλεί το πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο να παράγει ηλεκτρική φόρτιση. Γνωρίζοντας από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ότι η ασκούμενη δύναμη είναι ανάλογη της επιτάχυνσης του σώματος, το παραγόμενο σήμα θα είναι και αυτό ανάλογο της επιτάχυνσης.

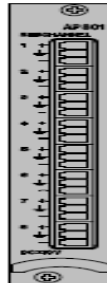
2.8.2 Εφαρμογές

Το επιταχυνσιόμετρο της Kistler είναι σχεδιασμένο για χρήση τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε εργαστηριακό περιβάλλον. Η χρήση του είναι εκτεταμένη στην αυτοκινητοβιομηχανία ενώ επίσης χρησιμοποιείται στο τυποποιημένο τεστ NVH (Noise Vibration Hardness) αλλά και στην μελέτη περιστρεφόμενων μηχανικών μερών.

2.8.3 Σύνδεση με MGC-plus

Για την σύνδεση των αισθητήρων με το σύστημα συλλογής μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η κάρτα AP801 όπου το σήμα ενισχυόταν μέσω εσωτερικών ενισχυτών στο MGC-plus κατηγορίας ML801B.

AP801
for 8 DC voltage sources



Εικόνα 2.8-3: Κάρτα Σύνδεσης Αισθητήρα με το MGCplus

2.9 Λογισμικό Catman

Το Catman 5 της HBM είναι ένα λογισμικό (softwork) για την εισαγωγή και την επεξεργασία μετρητικών δεδομένων με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το Catman 5 έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει συστήματα συλλογής δεδομένων, όπως το MGC-plus. Επιτρέπει τη σύνδεση συσκευών με διάφορες διασυνδέσεις (Ethernet, USB,, τον καθορισμό αναλογικών και ψηφιακών καναλιών εισόδου/εξόδου καθώς και την δυνατότητα διαμόρφωσης της μετρητικής αλυσίδας. Προσφέρει διάφορους τρόπους ανάκτησης, απεικόνισης και επεξεργασίας των δεδομένων των μετρήσεων τόσο κατά την διάρκεια των μετρήσεων (on line) όσο και μετά το πέρας τους (off line).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η διπλωματική αυτή δίνει έμφαση στην μελέτη και την υλοποίηση της μεθόδου υπολογισμού των δυνάμεων που ασκούνται στους ελαστικοφόρους τροχούς με την μέθοδο που βασίζεται στον υπολογισμό των διατμητικών παραμορφώσεων και στην ισορροπία των δυνάμεων του διαγράμματος του ελεύθερου σώματος του άξονα και των τροχών (Μέθοδος Α'). Η μέθοδος αυτή παρατίθεται πλήρως στο κεφάλαιο 1.2.4.1. Για να αναλυθεί σε βάθος έγινε ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων τόσο στο πλαίσιο του εργαστήριου του μαθήματος ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ II όσο και εκτός.

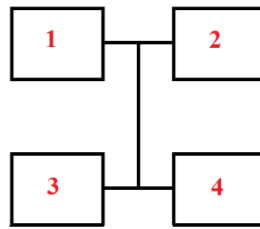
3.2 Πειραματικός Έλεγχος

Αρχικά, έγιναν τεστ με σκοπό τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της μεθόδου Α' κατά την διάρκεια βασικών συνθηκών οδήγησης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με συχνότητα δειγματοληψίας 1200Hz. Συγκεκριμένα έγιναν:

- Τεστ 1: Κατά την διάρκεια της **Επιτάχυνσης**
- Τεστ 2: Κατά την διάρκεια της **Δεξιάς Στροφής 180°**
- Τεστ 3: Κατά την διάρκεια της **Προσπέρασης Εμποδίου**
- Τεστ 4: Κατά την διάρκεια της **Οδήγησης σ' έναν Δρόμο με κλίση**

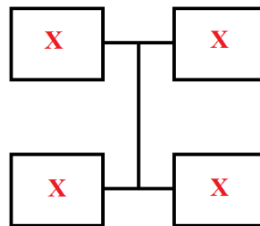
Πρέπει να τονισθεί ότι δεν έγιναν ξεχωριστά τεστ για τις περιπτώσεις της αριστερής στροφής και της επιβράδυνσης λόγω του ότι είναι συνθήκες οι οποίες περιλαμβάνονται στα άλλα τεστ. Η αριστερή στροφή όπως και η επιβράδυνση περιλαμβάνονται στο Τεστ 4. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ολοκληρωμένες διαδρομές περιέχοντας όλα τα επιμέρους Τεστ δεδομένου ότι χρειάστηκαν επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, δεξιές και αριστερές στροφές, προσπέραση εμποδίων και οδήγηση σε κεκλιμένο δρόμο. Τα τεστ πραγματοποιήθηκαν εντός της Πολυτεχνειούπολης. Στα τεστ αυτά αφαιρέθηκαν τα αμορτισέρ από διάφορες θέσεις με στόχο την ανάλυση της μεθόδου σε ακραίες συνθήκες. Οι μετρήσεις σ' αυτά τα τεστ έγιναν με συχνότητα δειγματοληψίας 800Hz.

3.2.1 Κατηγορίες



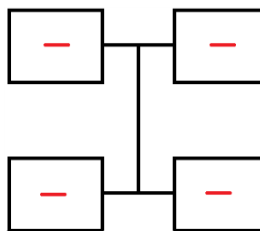
Εικόνα 3.2-1: Αρίθμηση Τροχών Οχήματος

- Τεστ 5: Κατηγορία 1 - **Όλα τα αμορτισέρ τοποθετημένα**



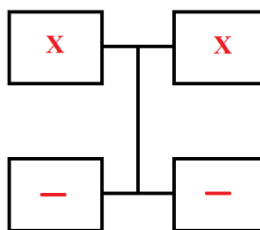
Εικόνα 3.2-2: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 1

- Τεστ 6: Κατηγορία 2 - **Χωρίς αμορτισέρ τοποθετημένα**



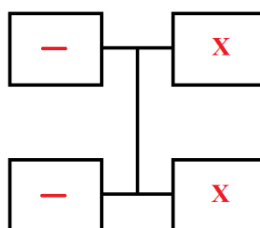
Εικόνα 3.2-3: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 2

- Τεστ 7: Κατηγορία 3 - **Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στις θέσεις 1 και 2**



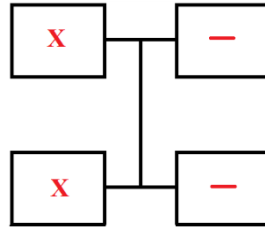
Εικόνα 3.2-4: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 3

- Τεστ 8: Κατηγορία 4 - **Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στις θέσεις 2 και 4**



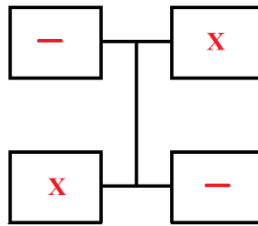
Εικόνα 3.2-5: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 4

- Τεστ 9: Κατηγορία 5 - Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στις θέσεις 1 και 3



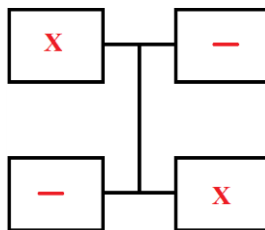
Εικόνα 3.2-6: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 5

- Τεστ 10: Κατηγορία 6 - Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στις θέσεις 2 και 3



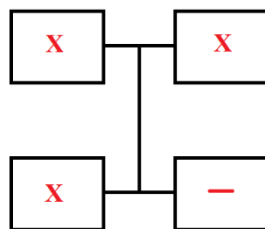
Εικόνα 3.2-7: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 6

- Τεστ 11: Κατηγορία 7 - Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στις θέσεις 1 και 4



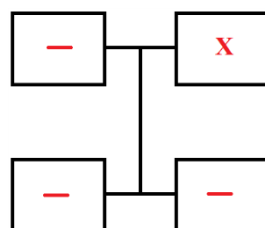
Εικόνα 3.2-8: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 7

- Τεστ 12: Κατηγορία 8 - Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στις θέσεις 1,2 και 3



Εικόνα 3.2-9: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 8

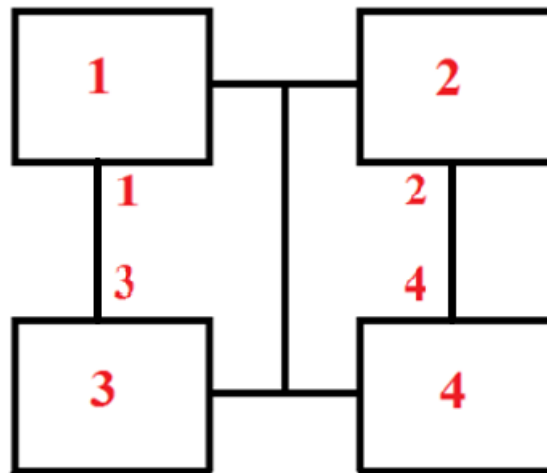
- Τεστ 13 : Κατηγορία 9 - Τοποθετημένα τα αμορτισέρ στη θέση 2



Εικόνα 3.2-10: Θέσεις Εναπομείναντων Αμορτισέρ Κατηγορίας 9

3.3 Ανάλυση Χρησιμοποιούμενων Μεγεθών

Το πρώτο στάδιο ανάλυσης της μεθόδου ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των διάφορων μετρούμενων μεγεθών. Για αυτό το σκοπό έγιναν συγκριτικά διαγράμματα είτε άνα μέγεθος, είτε άνα πλευρά του οχήματος. Βασικές συγκρίσεις που παρατίθενται παρακάτω είναι:



Εικόνα 3.3-1: Θέσεις Επιταχυνσιομέτρων στο Πλαίσιο και στους Τροχούς

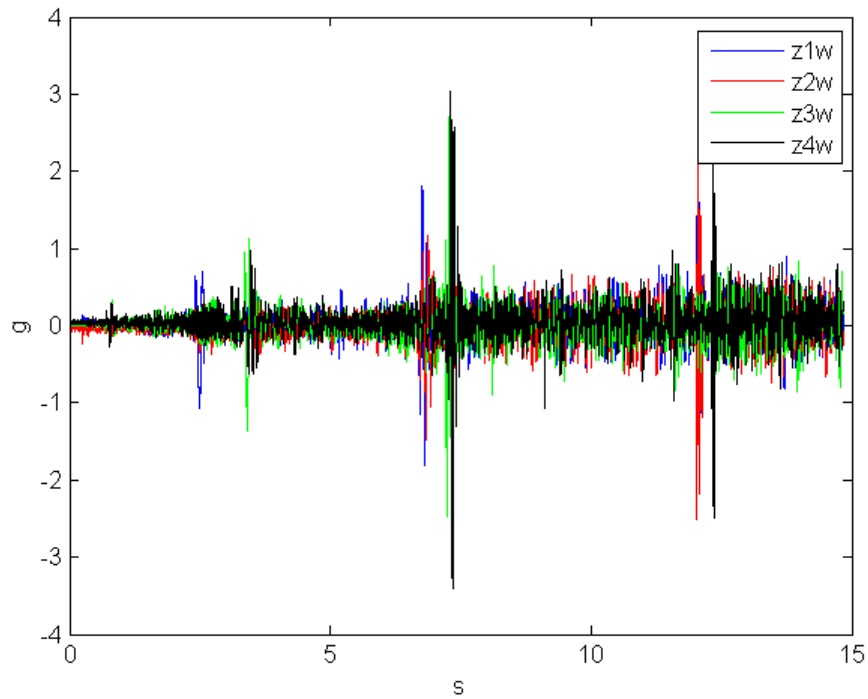
- μεταξύ των κάθετων επιταχύνσεων στους τροχούς σε όλες στις θέσεις ή άνα πλευρά,
- μεταξύ των κάθετων επιταχύνσεων του πλαισίου του οχήματος σ' όλες τις θέσεις ή άνα πλευρα,
- των παραμορφώσεων στους τροχούς άνα μέγεθος(καμπτική, διατμητική και αξονική) και πλευρά,
- των μετατοπίσεων του σώματος του οχήματος ως προς το έδαφος στις δύο πλευρές κ.α.

και παρουσιάζονται οι απαραίτητες κυματομορφές άναλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στα διαγράμματα αντιπροσωπεύουν τα ακόλουθα μεγέθη:

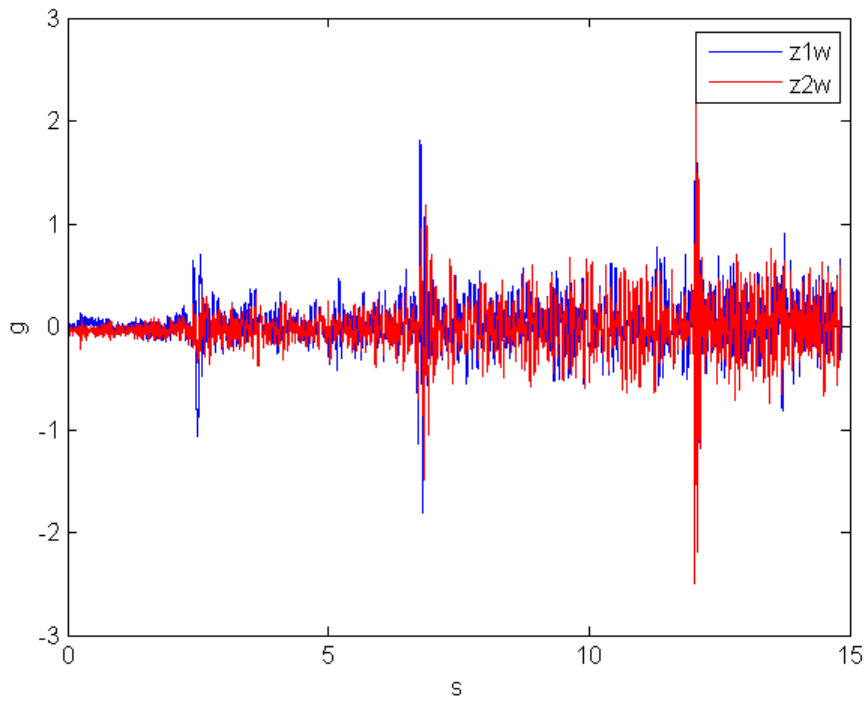
- **z1w**: κάθετη επιτάχυνση τροχού στην θέση 1
- **z2w**: κάθετη επιτάχυνση τροχού στην θέση 2
- **z3w**: κάθετη επιτάχυνση τροχού στην θέση 3
- **z4w**: κάθετη επιτάχυνση τροχού στην θέση 4
- **hl**: απόσταση του πλαισίου από το έδαφος στην αριστερή πλευρά
- **hr**: απόσταση του πλαισίου από το έδαφος στην δεξιά πλευρά
- **z1c**: κάθετη επιτάχυνση του πλαισίου στην θέση 1, αντίστοιχη με την θέση 1 του τροχού
- **z2c**: κάθετη επιτάχυνση του πλαισίου στην θέση 2, αντίστοιχη με την θέση 2 του τροχού
- **z3c**: κάθετη επιτάχυνση του πλαισίου στην θέση 3, αντίστοιχη με την θέση 3 του τροχού
- **z4c**: κάθετη επιτάχυνση του πλαισίου στην θέση 4, αντίστοιχη με την θέση 4 του τροχού
- **elba**: καμπτική παραμόρφωση του πίσω αριστερά άξονα
- **erba**: καμπτική παραμόρφωση του πίσω δεξιά άξονα

- **elsa:** διατμητική παραμόρφωση του πίσω αριστερά άξονα
- **ersa:** διατμητική παραμόρφωση του πίσω δεξιά άξονα
- **elaa:** αξονική παραμόρφωση του πίσω αριστερά άξονα
- **eraa:** αξονική παραμόρφωση του πίσω δεξιά άξονα

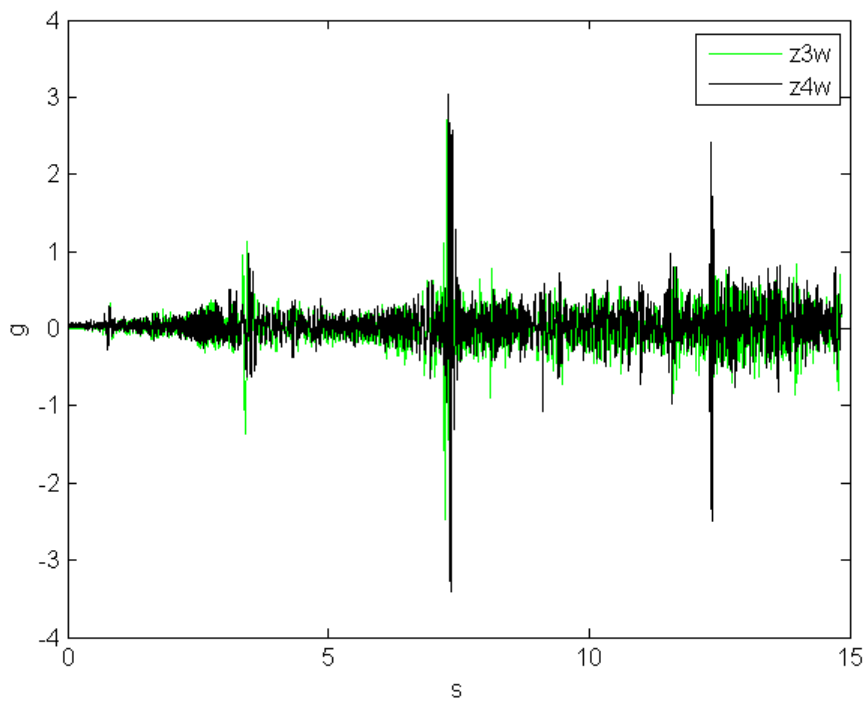
3.3.1 Τεστ 1- Επιτάχυνσης



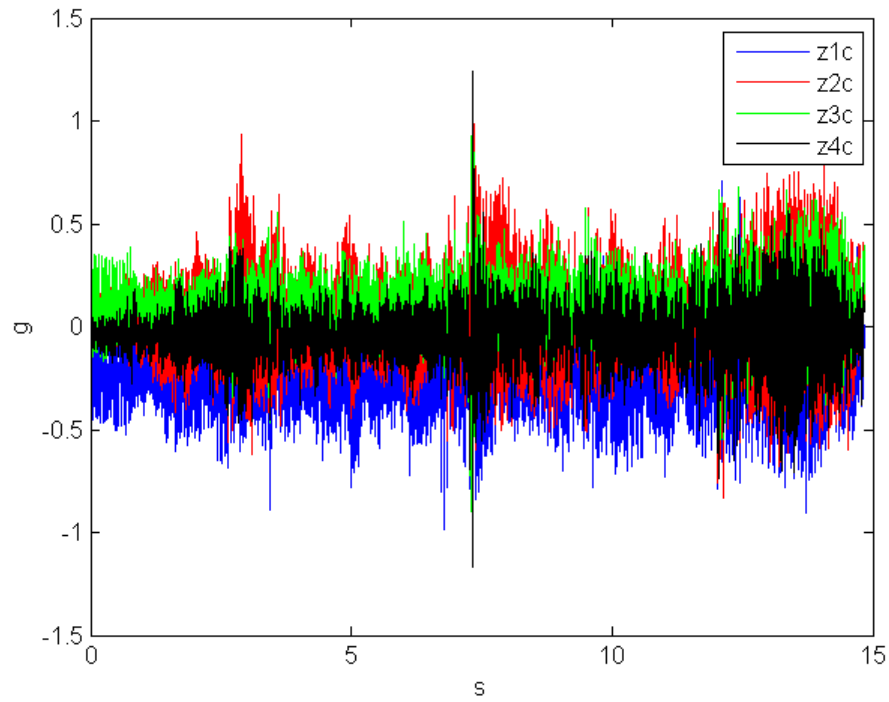
Διάγραμμα 3.3-1: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



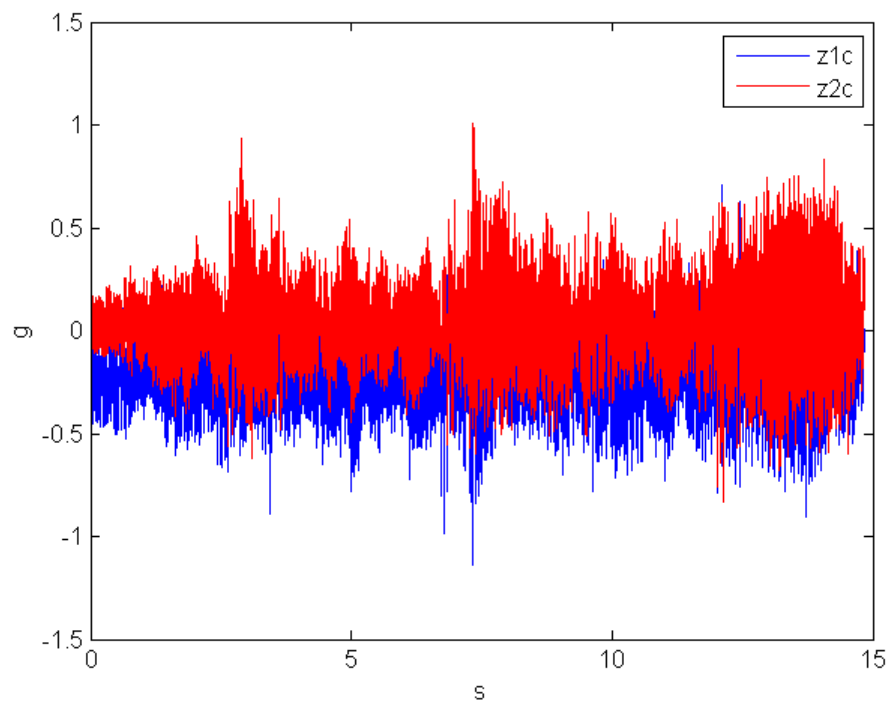
Διάγραμμα 3.3-2: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



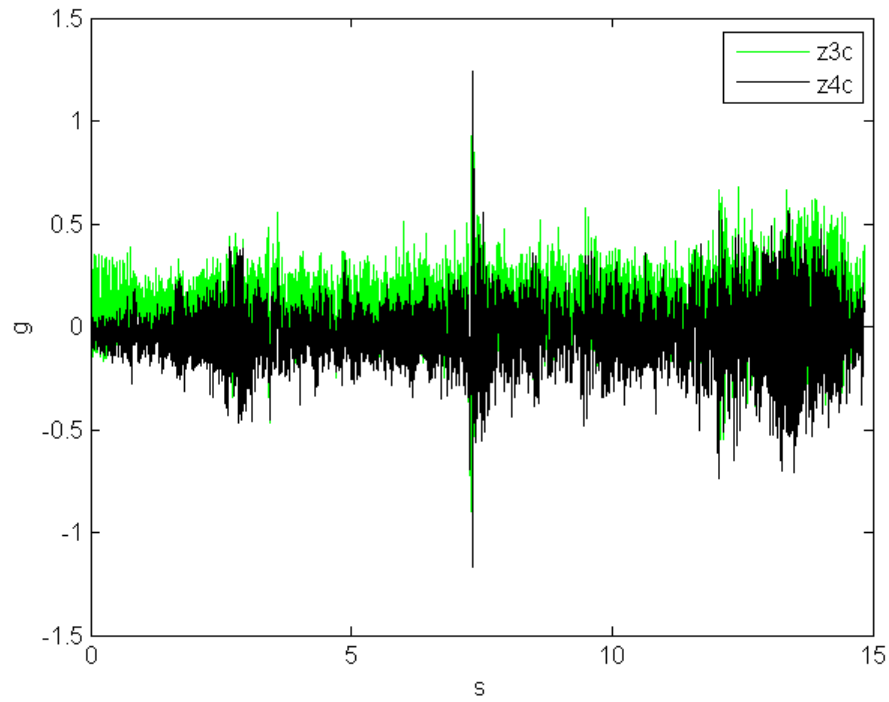
Διάγραμμα 3.3-3: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



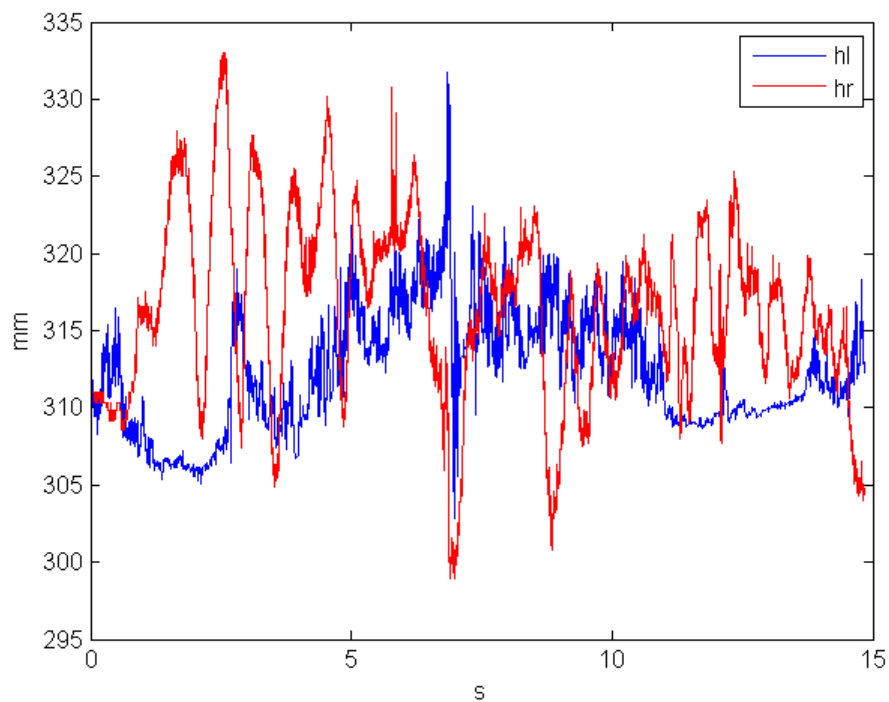
Διάγραμμα 3.3-4: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



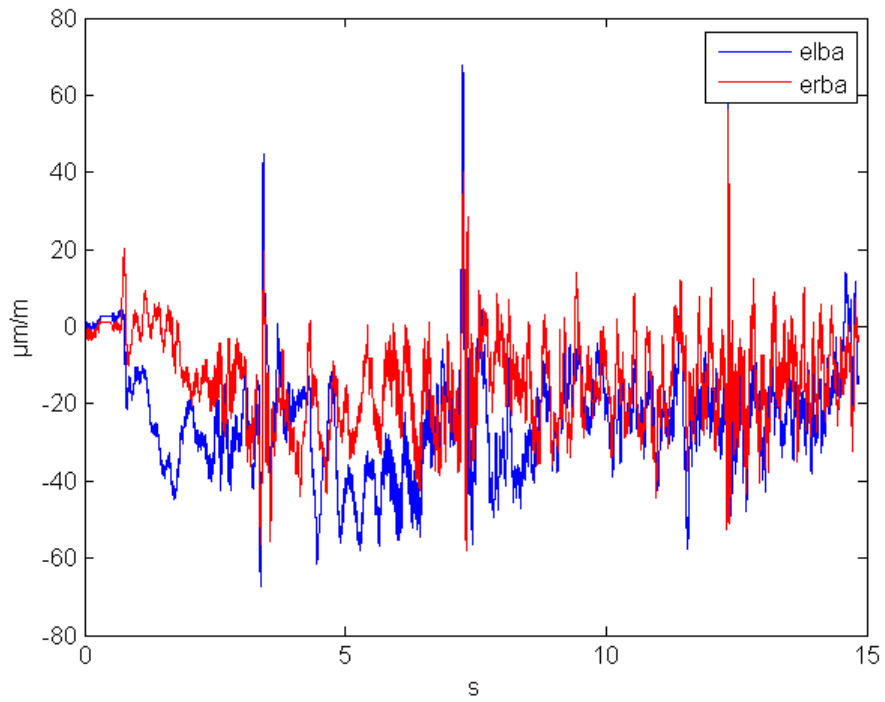
Διάγραμμα 3.3-5: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



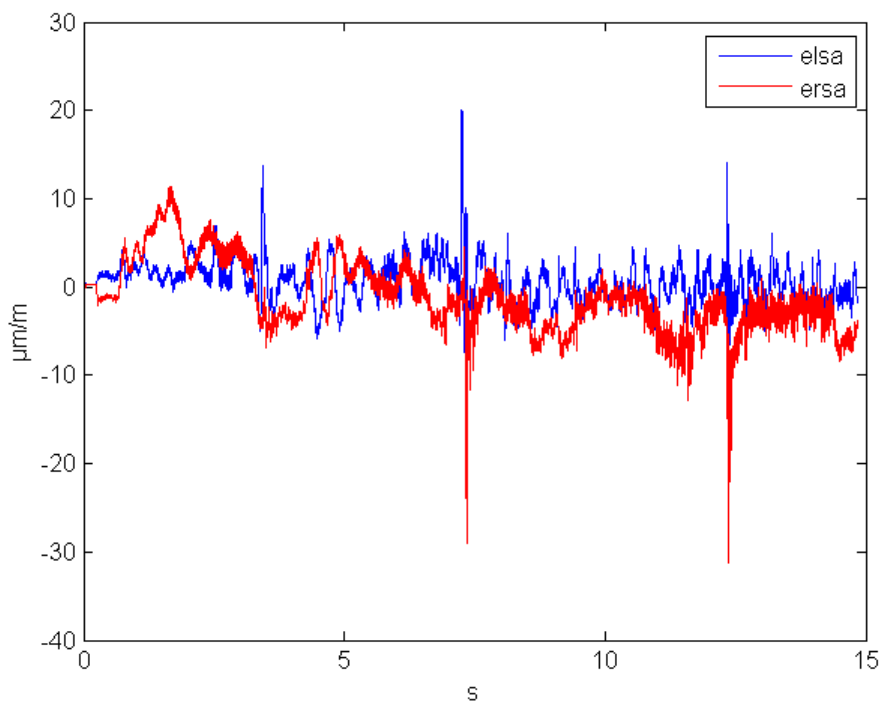
Διάγραμμα 3.3-6: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-7: Σύγκριση της Μετατόπισης του Σώματος του Οχήματος από το Έδαφος

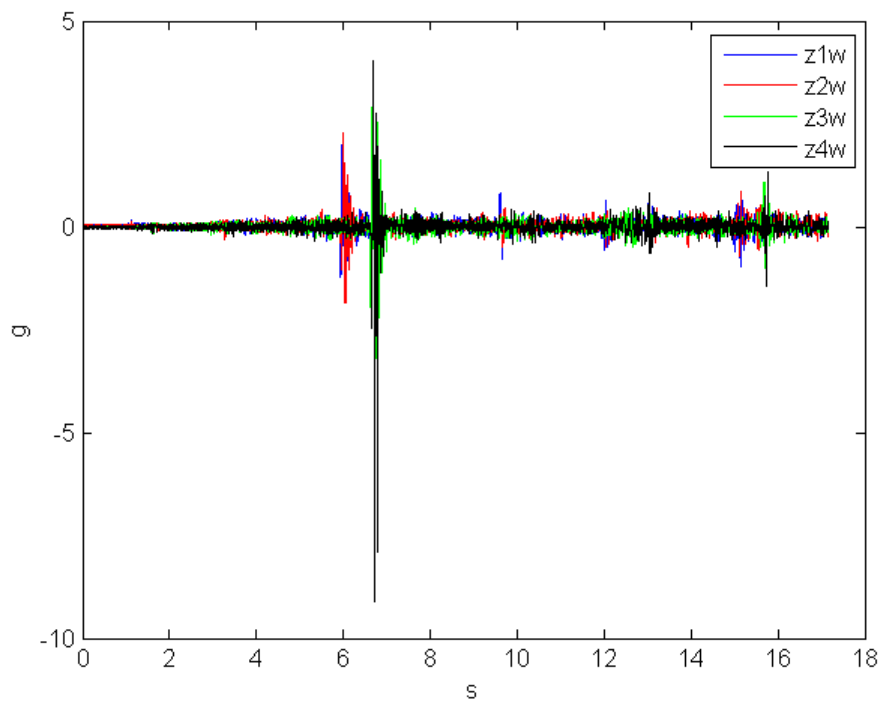


Διάγραμμα 3.3-8: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

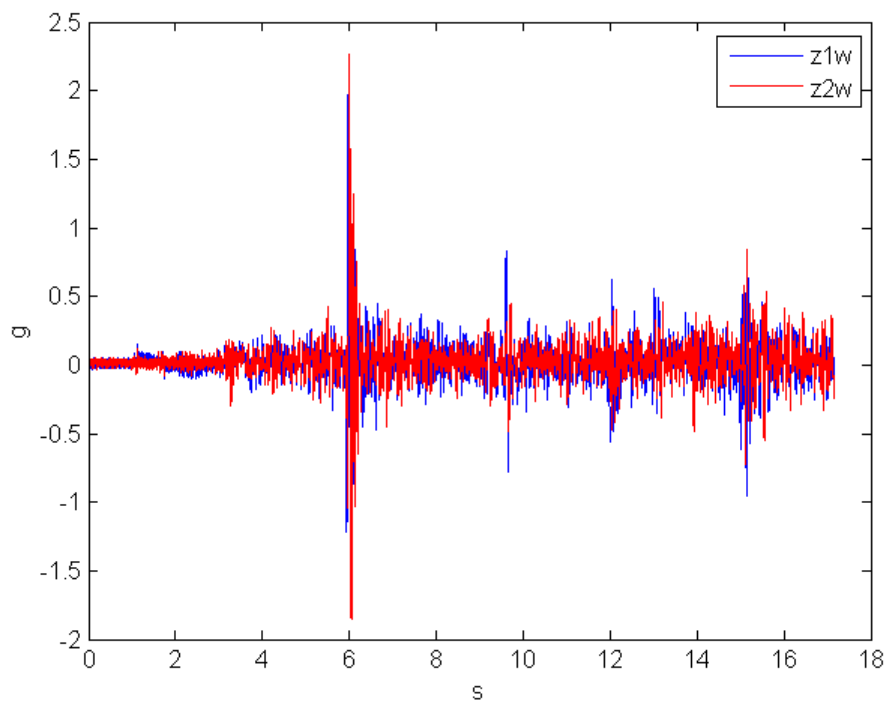


Διάγραμμα 3.3-9: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

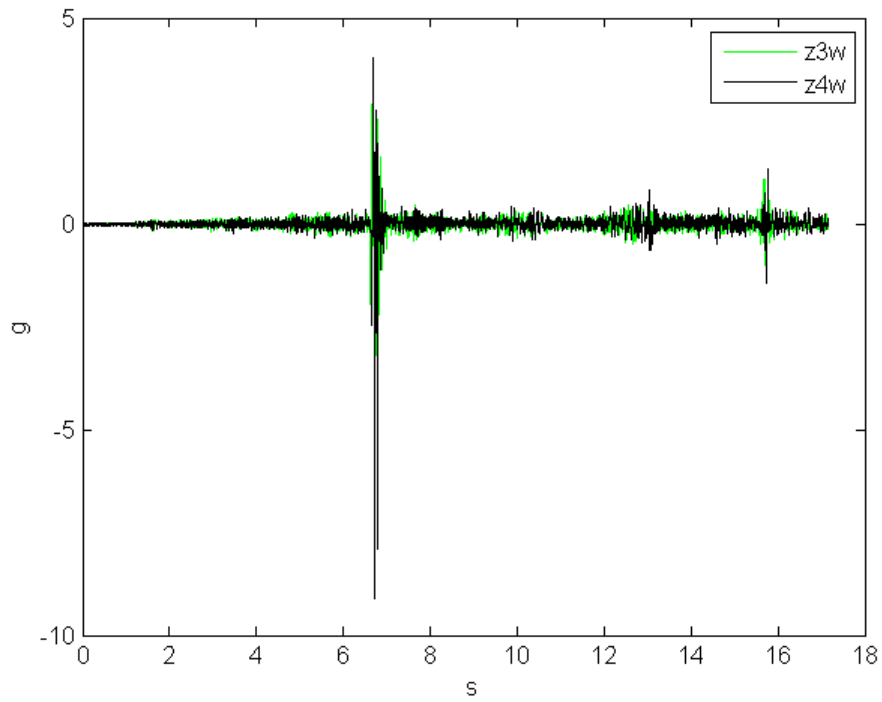
3.3.2 Τεστ 2- Δεξιάς Στροφής



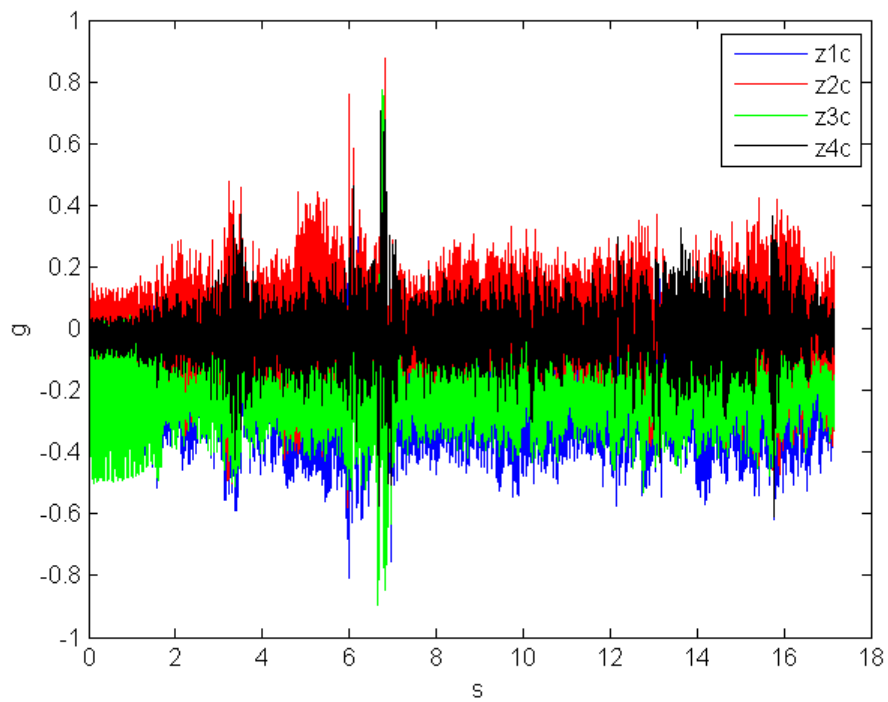
Διάγραμμα 3.3-10: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



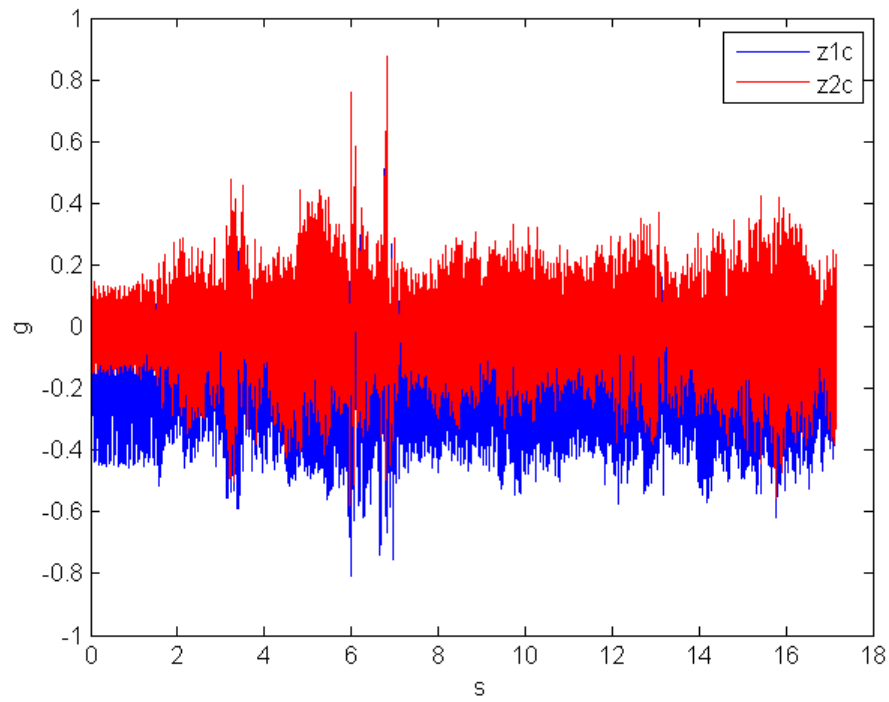
Διάγραμμα 3.3-11: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



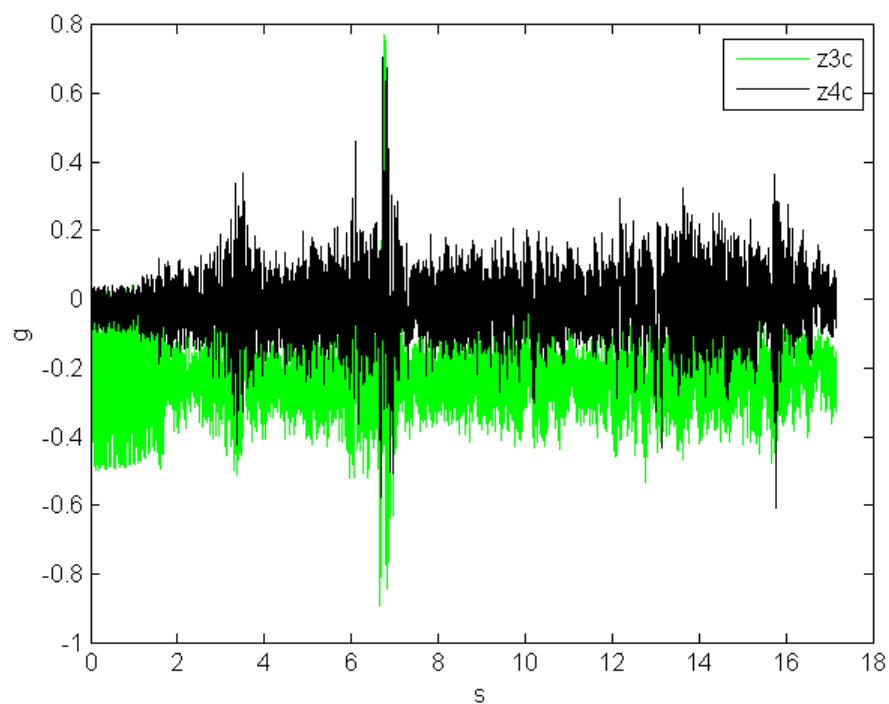
Διάγραμμα 3.3-12 : Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



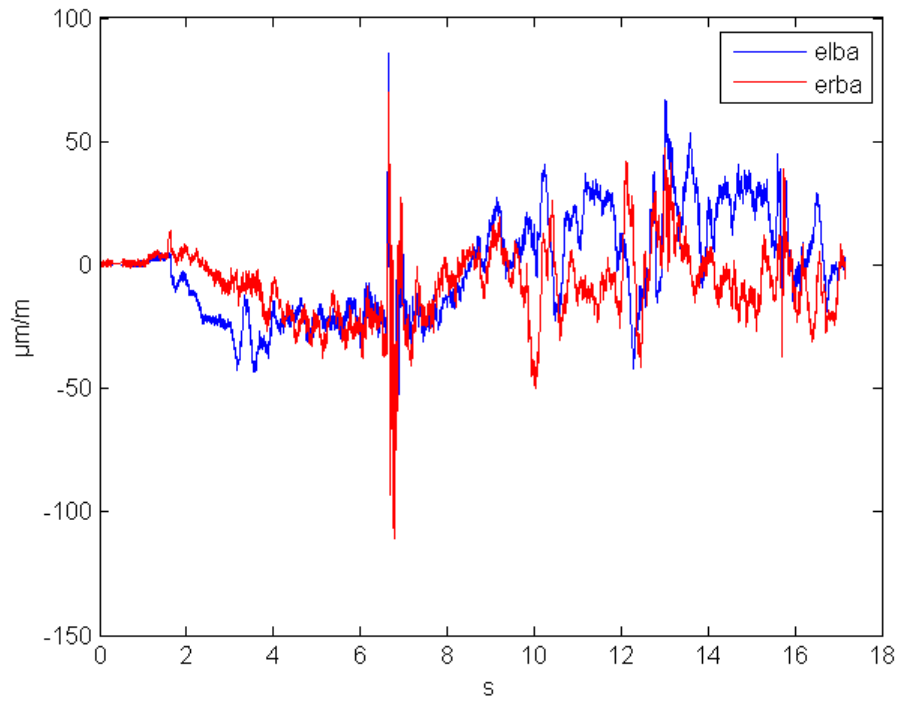
Διάγραμμα 3.3-13: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασί



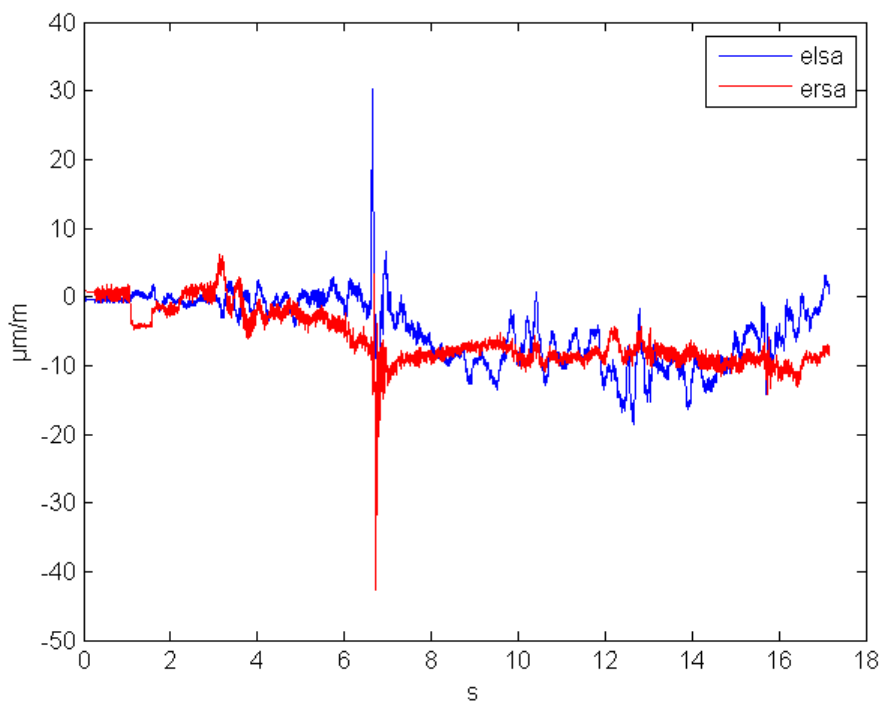
Διάγραμμα 3.3-14: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



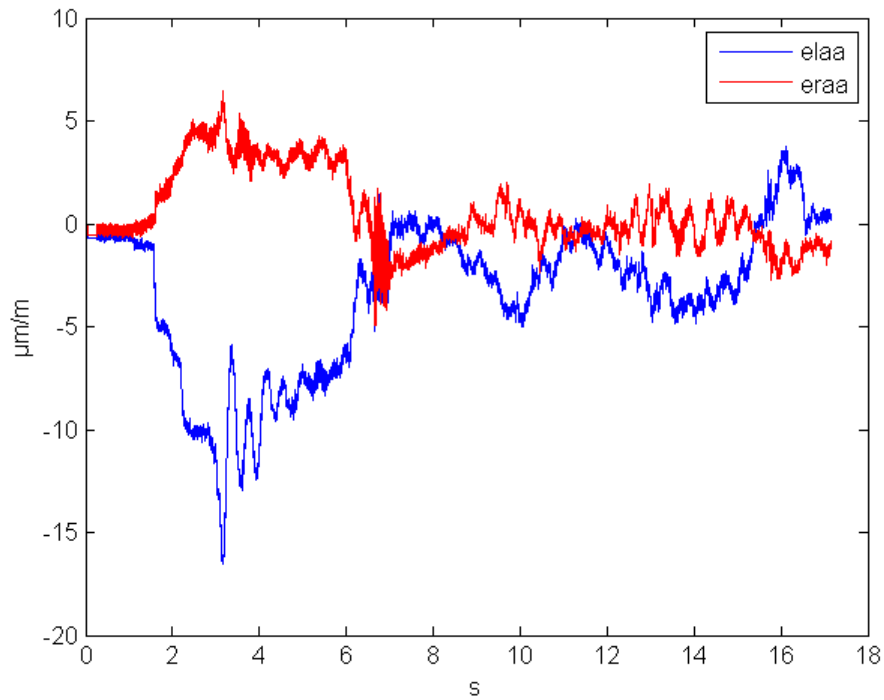
Διάγραμμα 3.3-15: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-16: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

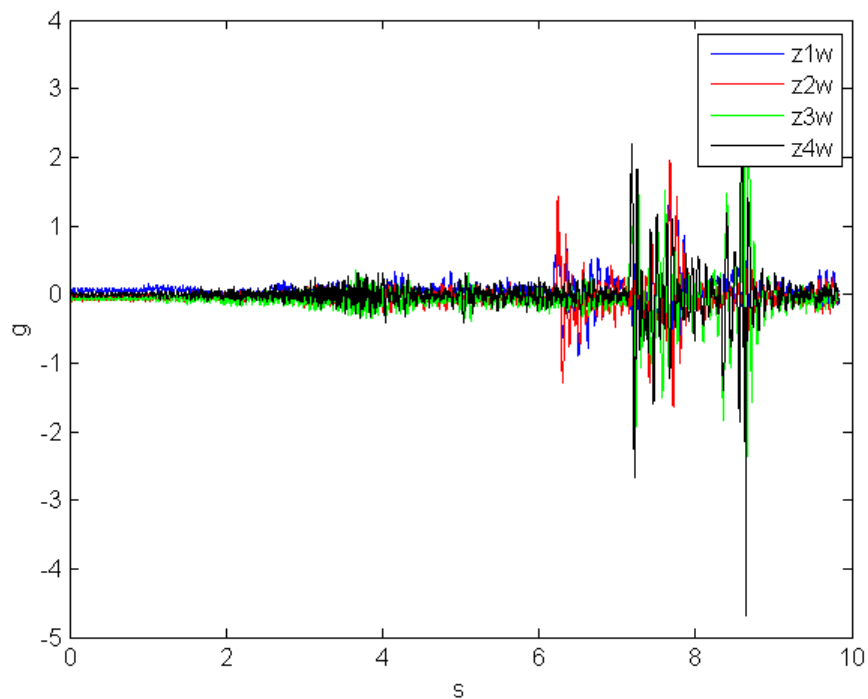


Διάγραμμα 3.3-17: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

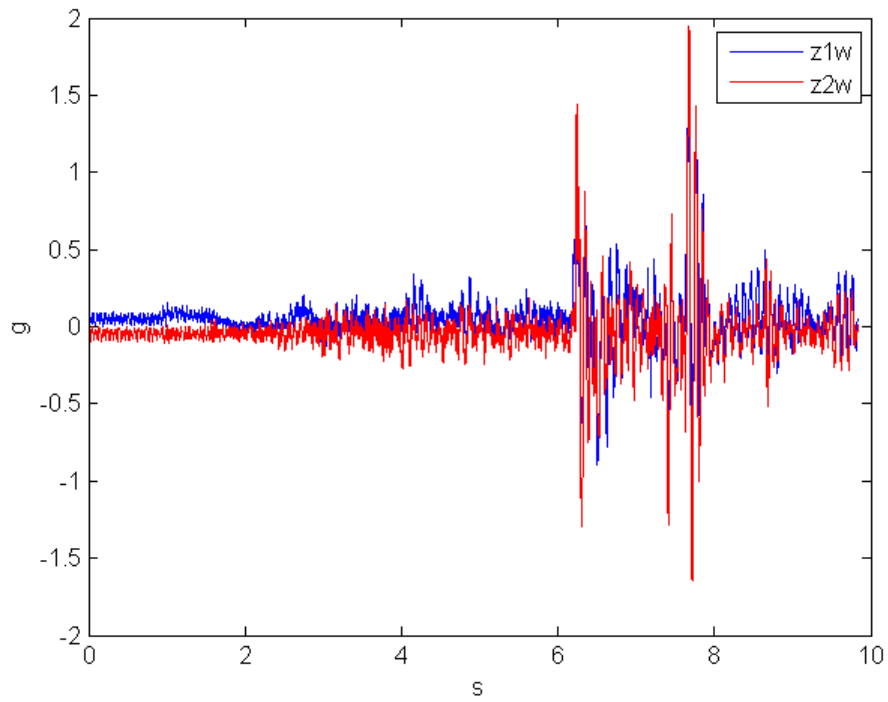


Διάγραμμα 3.3-18: Σύγκριση των Αξονικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

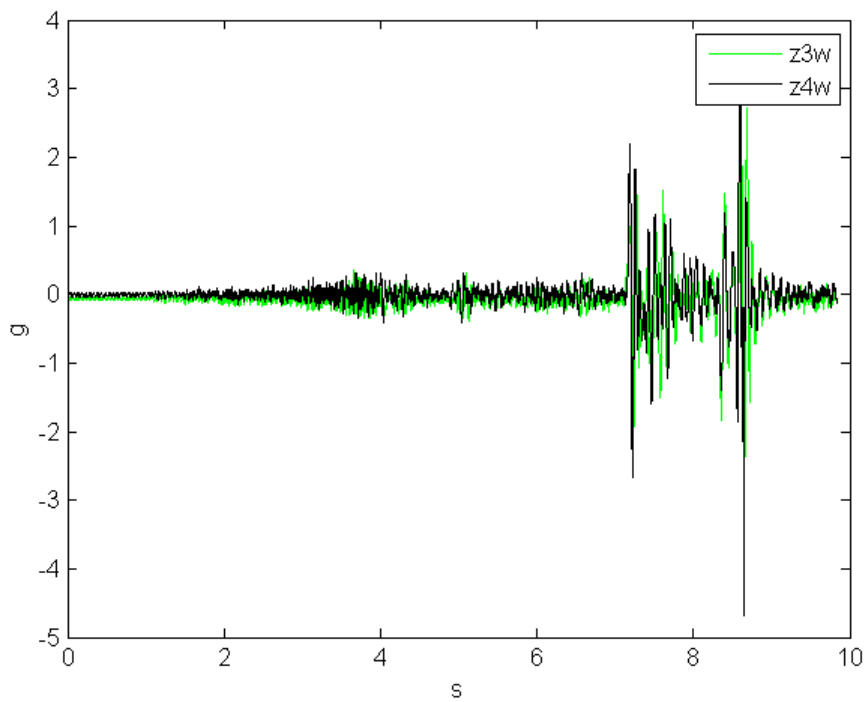
3.3.3 Τεστ 3- Βηματική Διέγερση



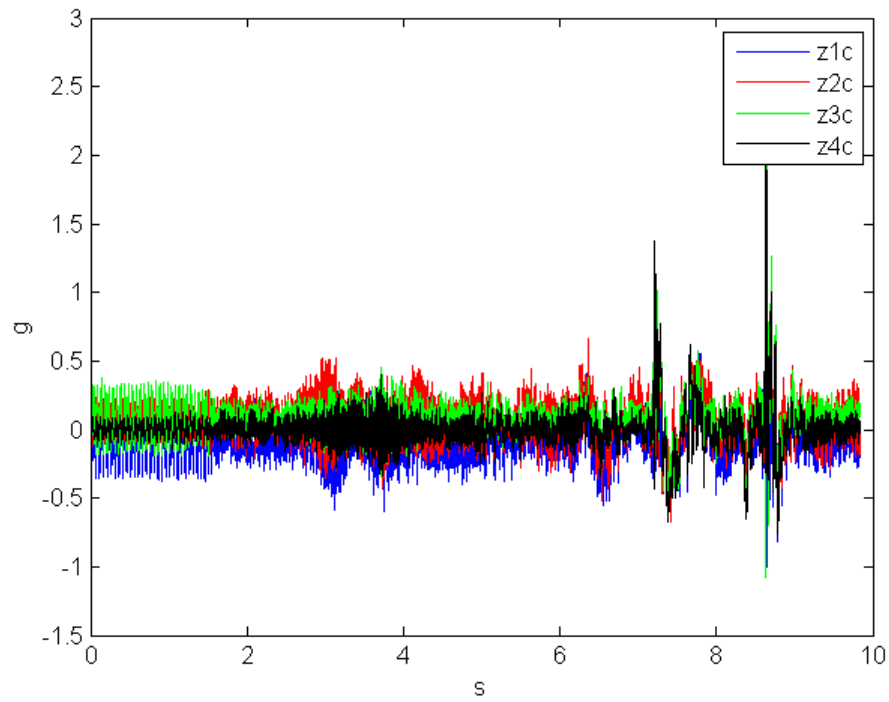
Διάγραμμα 3.3-19: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



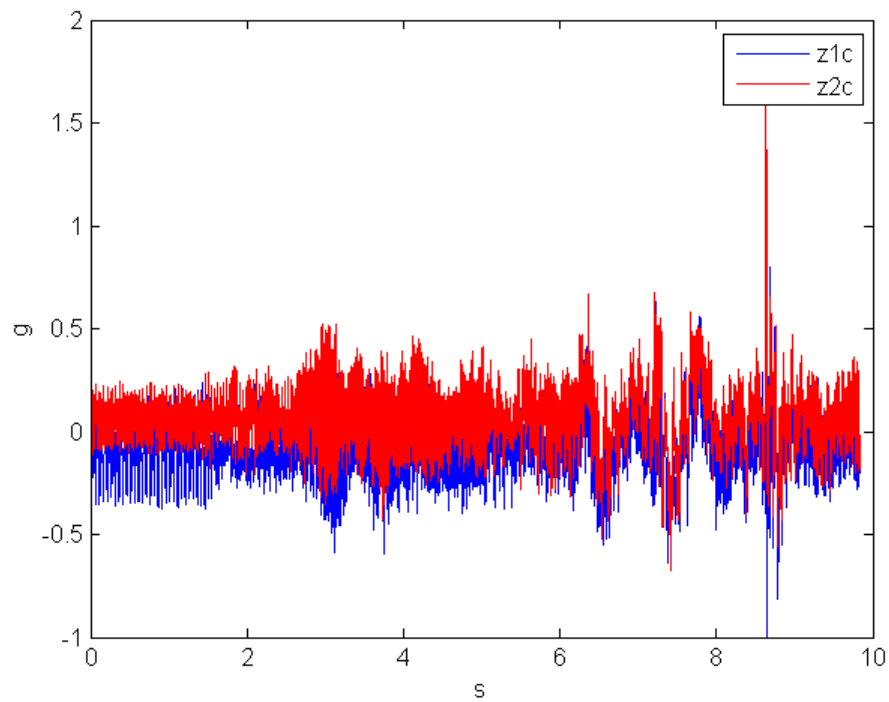
Διάγραμμα 3.3-20: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



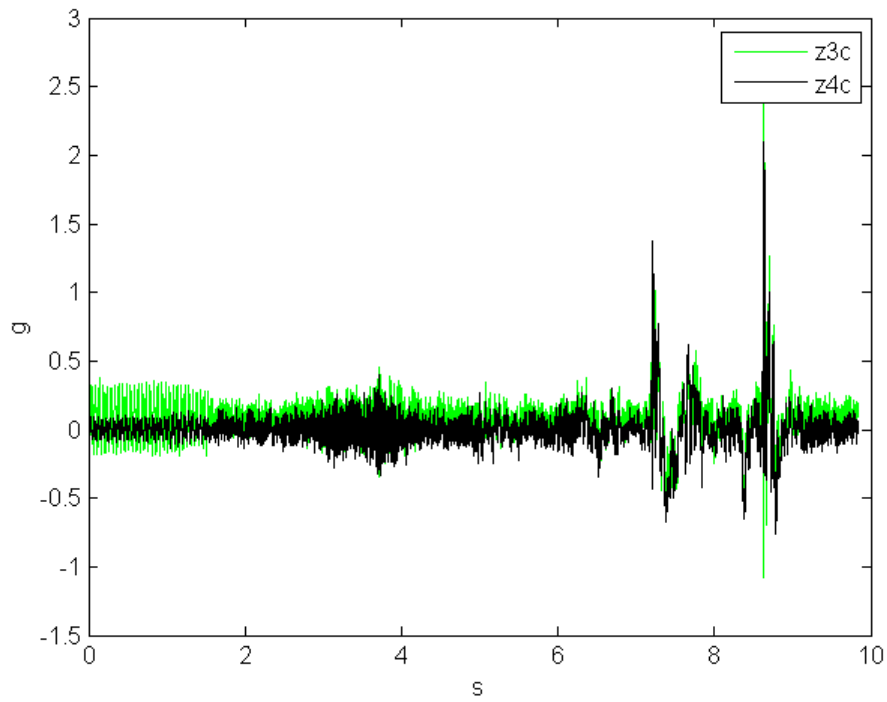
Διάγραμμα 3.3-21: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



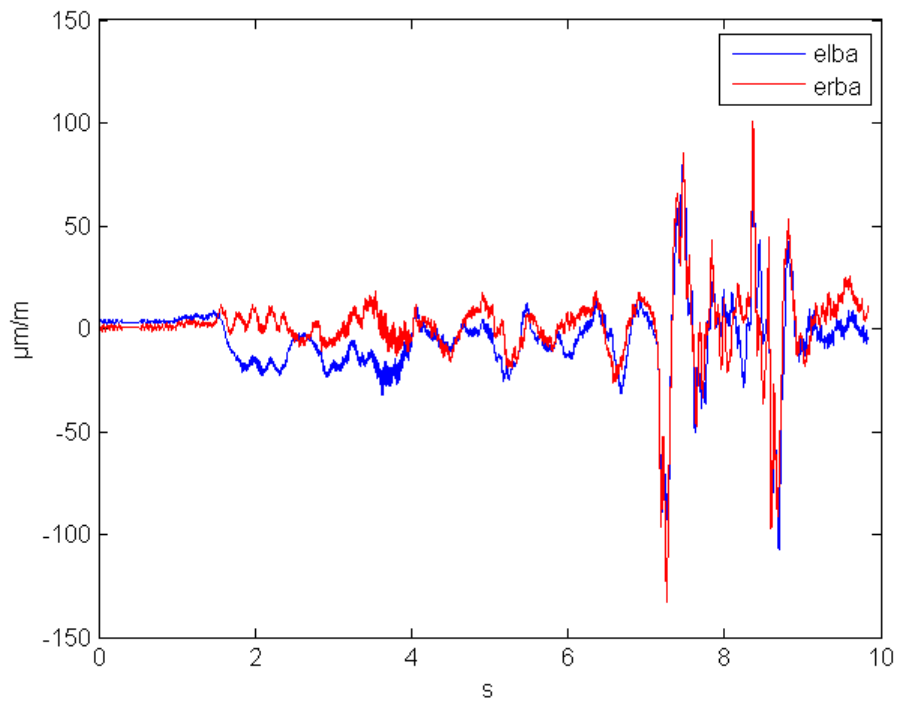
Διάγραμμα 3.3-22: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



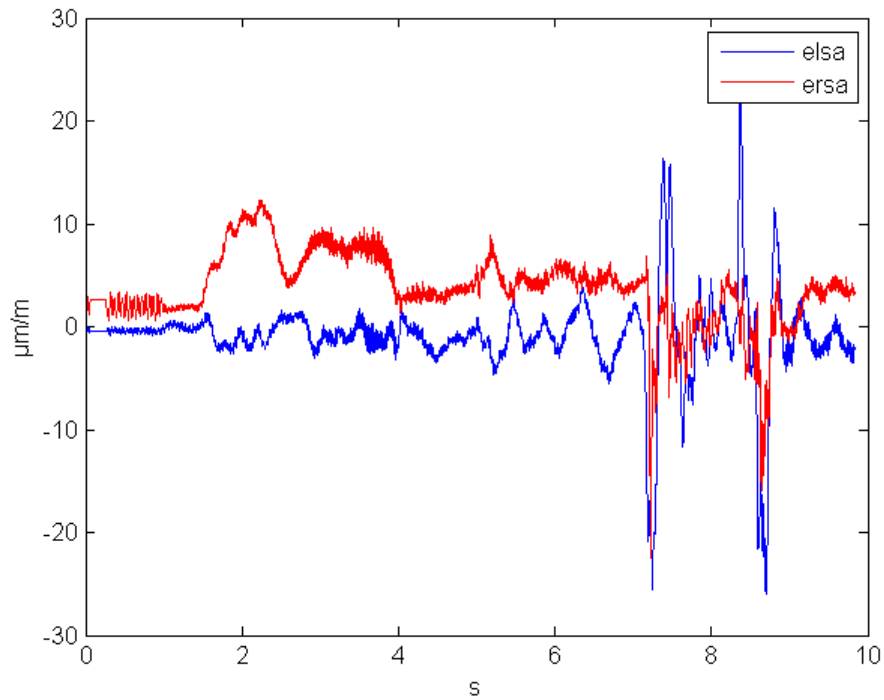
Διάγραμμα 3.3-23: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-24: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασί κατ’ αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς

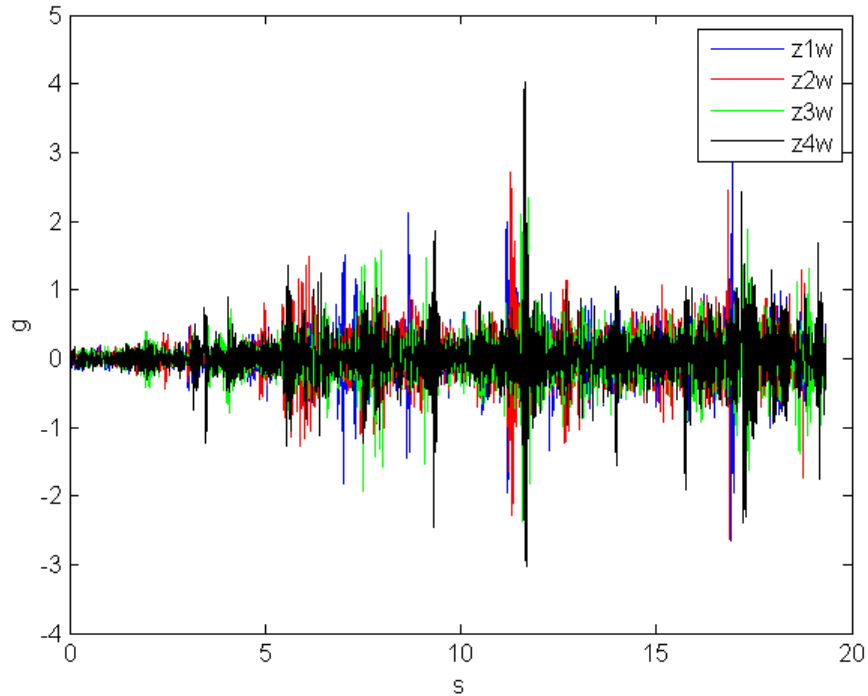


Διάγραμμα 3.3-25: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

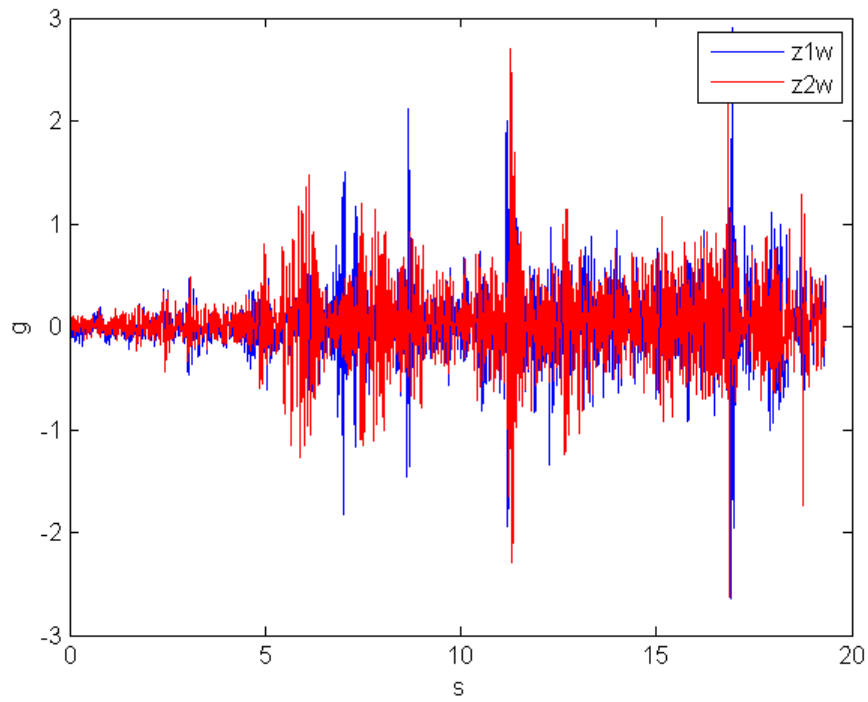


Διάγραμμα 3.3-26: Σύγκριση των Διατμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

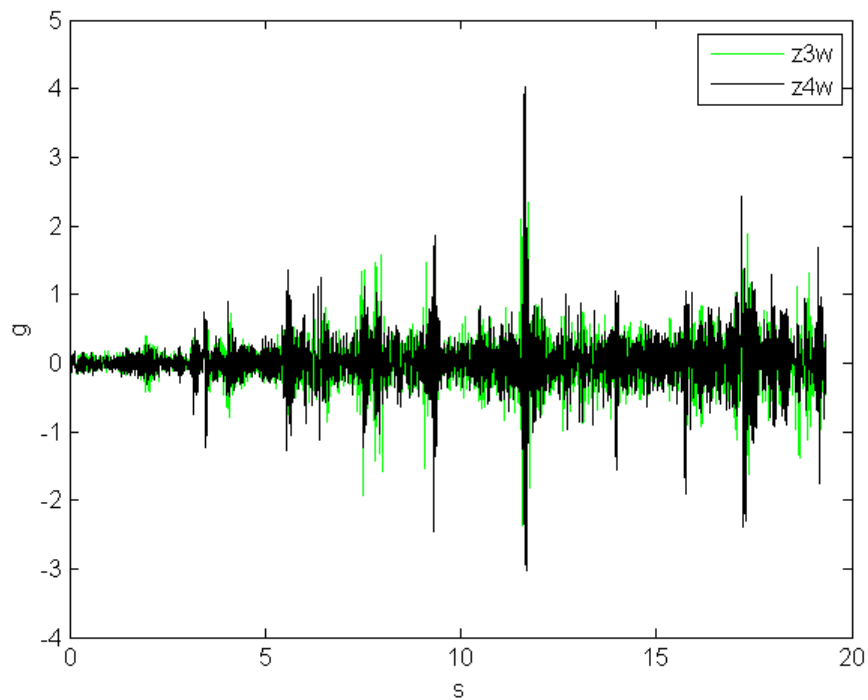
3.3.4 Τεστ 4- Δρόμος με Κλίση



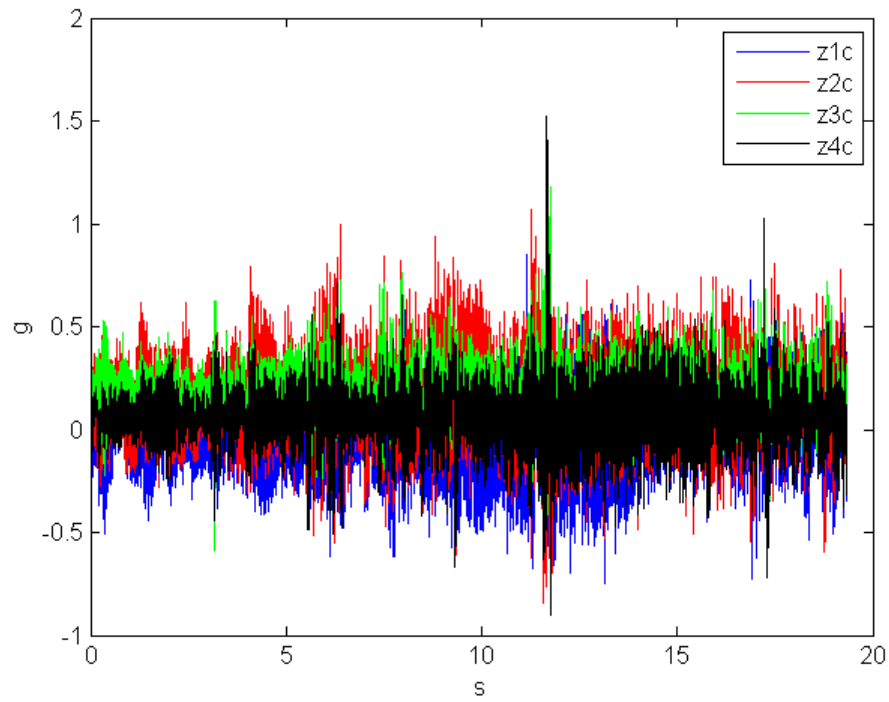
Διάγραμμα 3.3-27: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



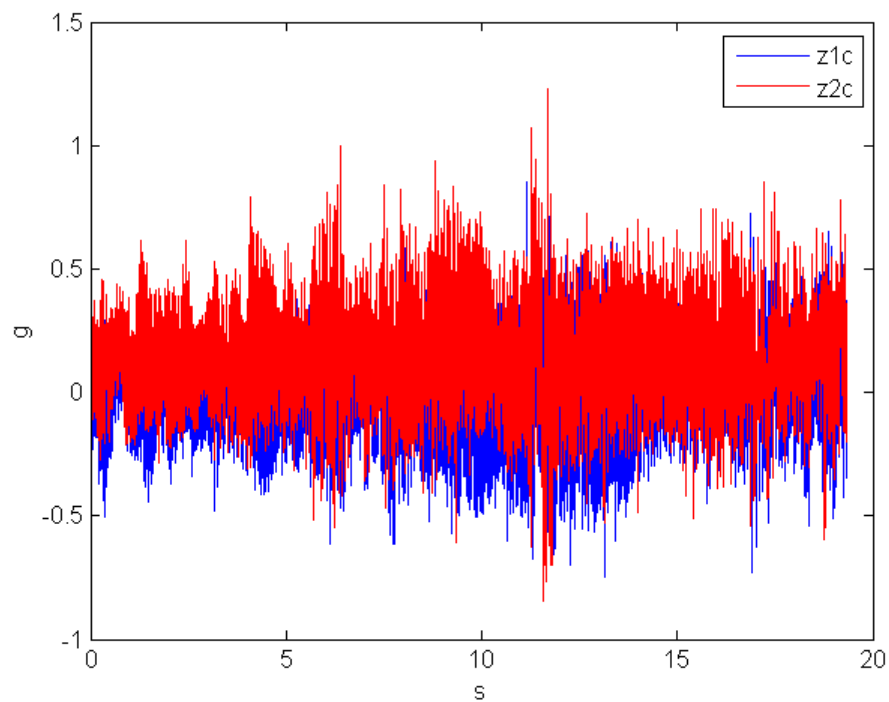
Διάγραμμα 3.3-28: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



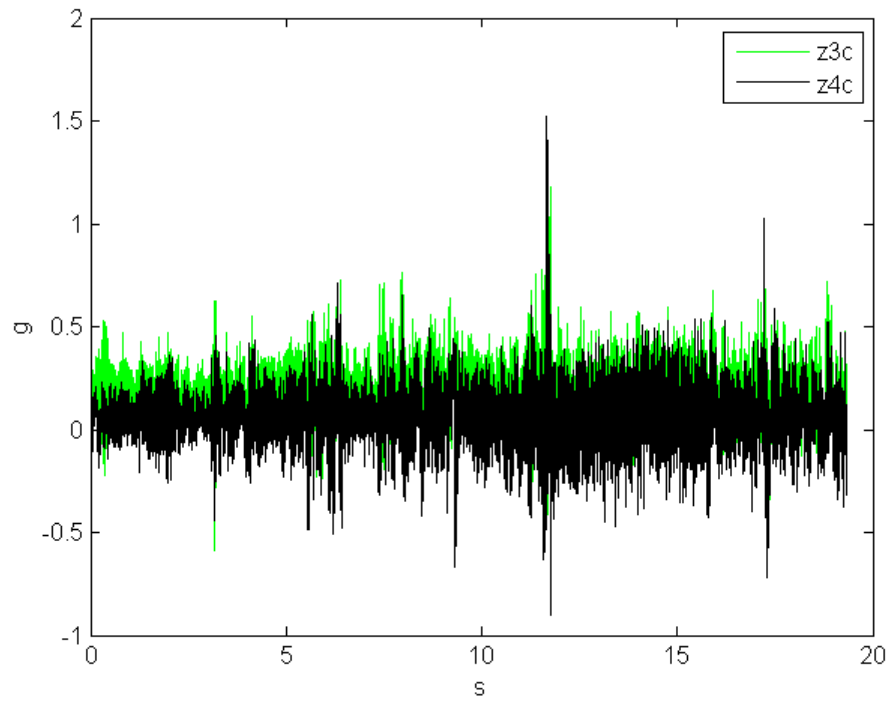
Διάγραμμα 3.3-29: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



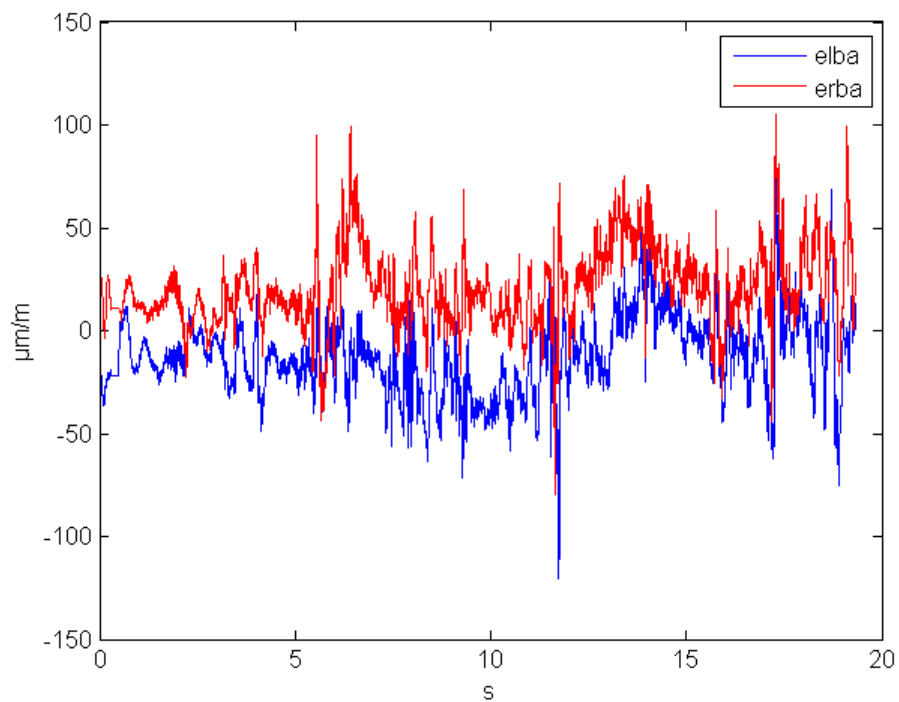
Διάγραμμα 3.3-30: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



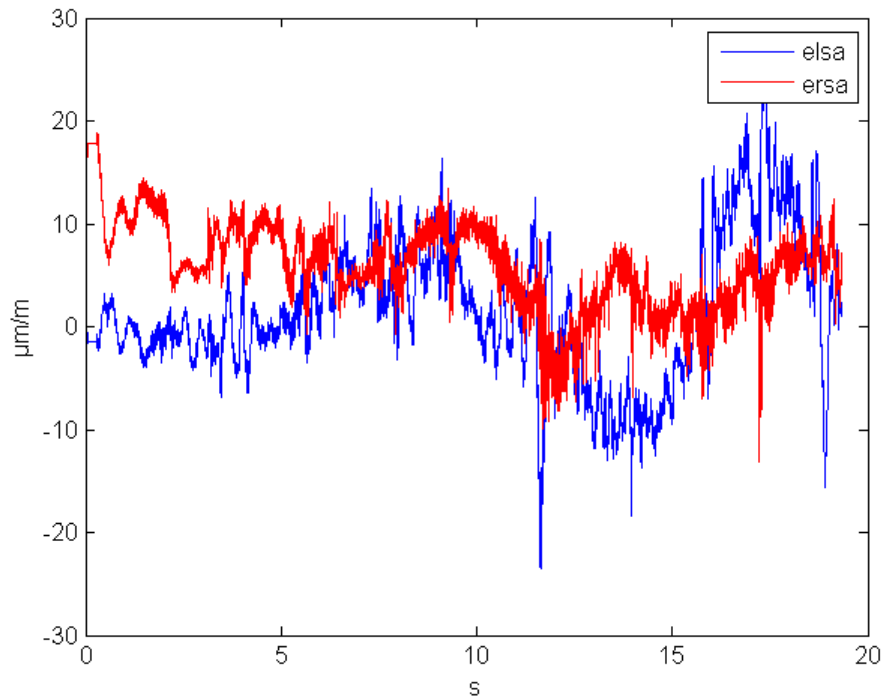
Διάγραμμα 3.3-31: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-32: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς

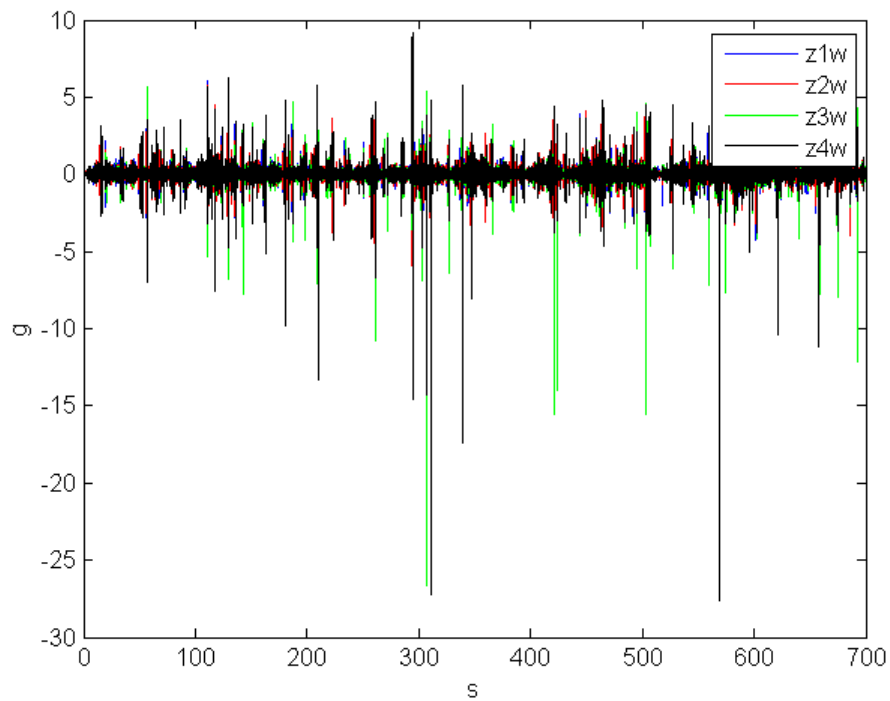


Διάγραμμα 3.3-33: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

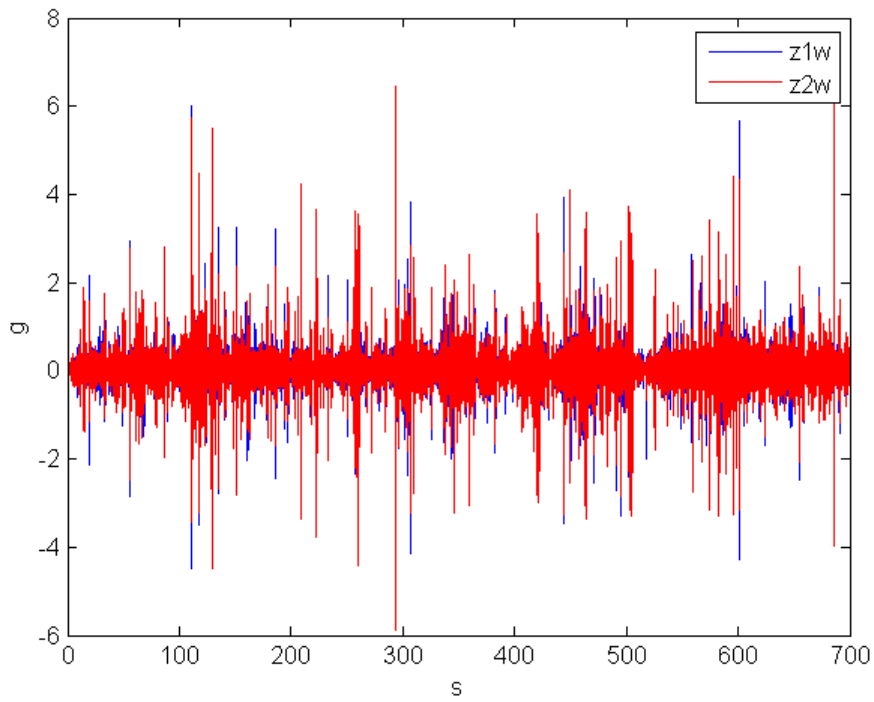


Διάγραμμα 3.3-34: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

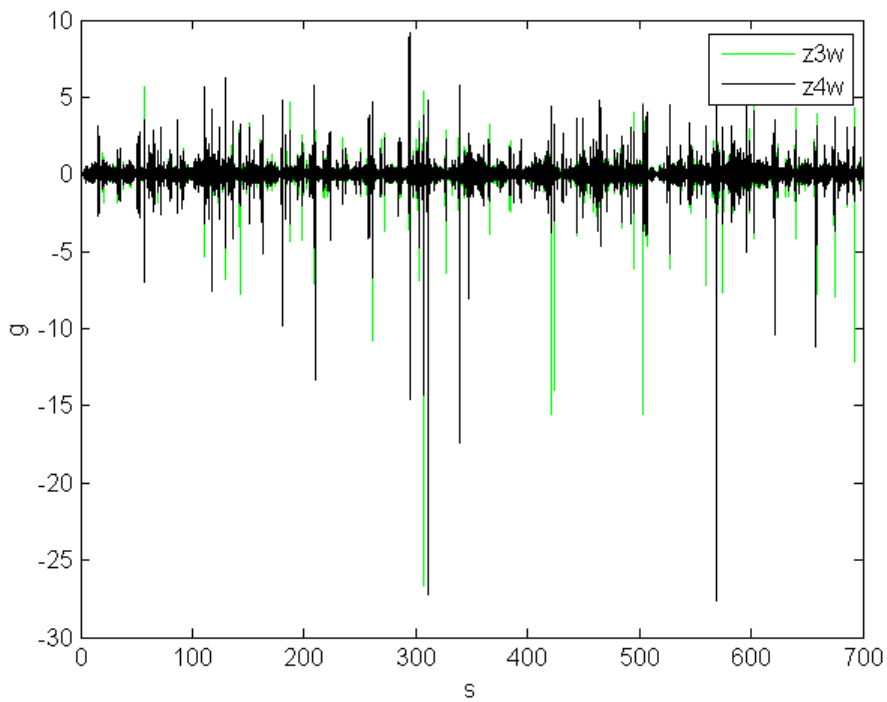
3.3.5 Τεστ 5- Κατηγορία 1



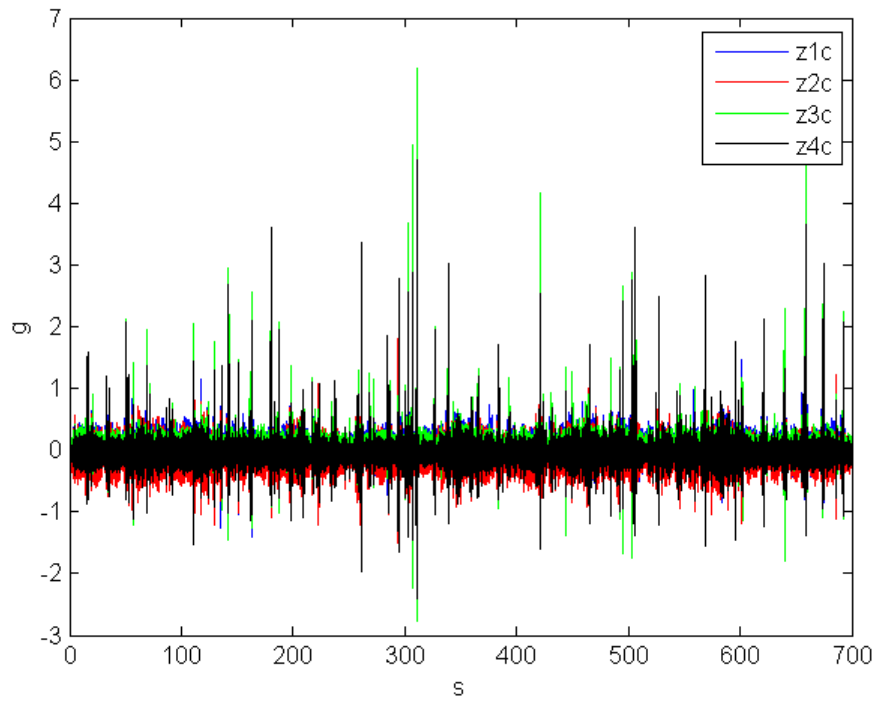
Διάγραμμα 3.3-35: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



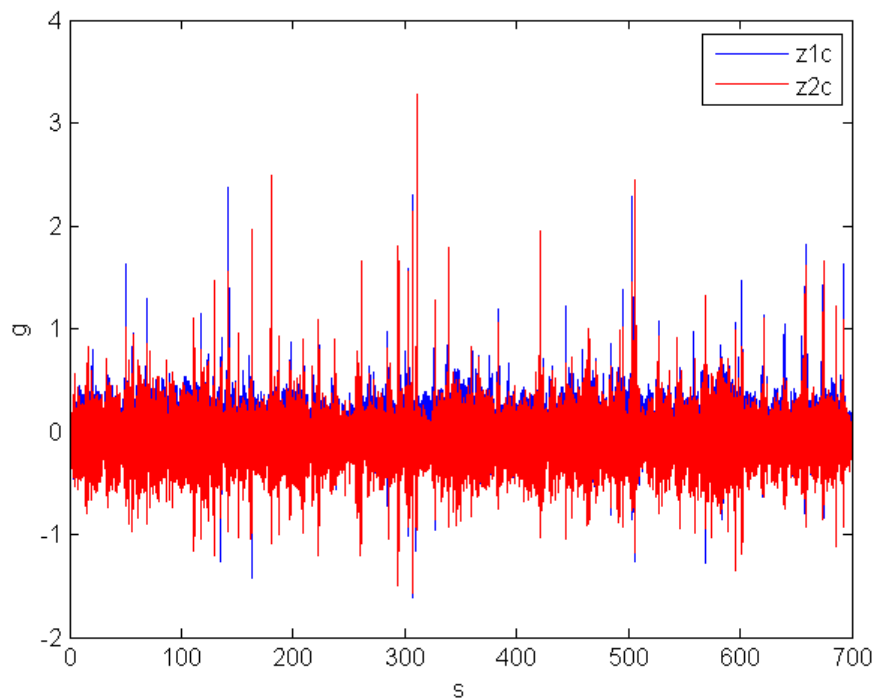
Διάγραμμα 3.3-36: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



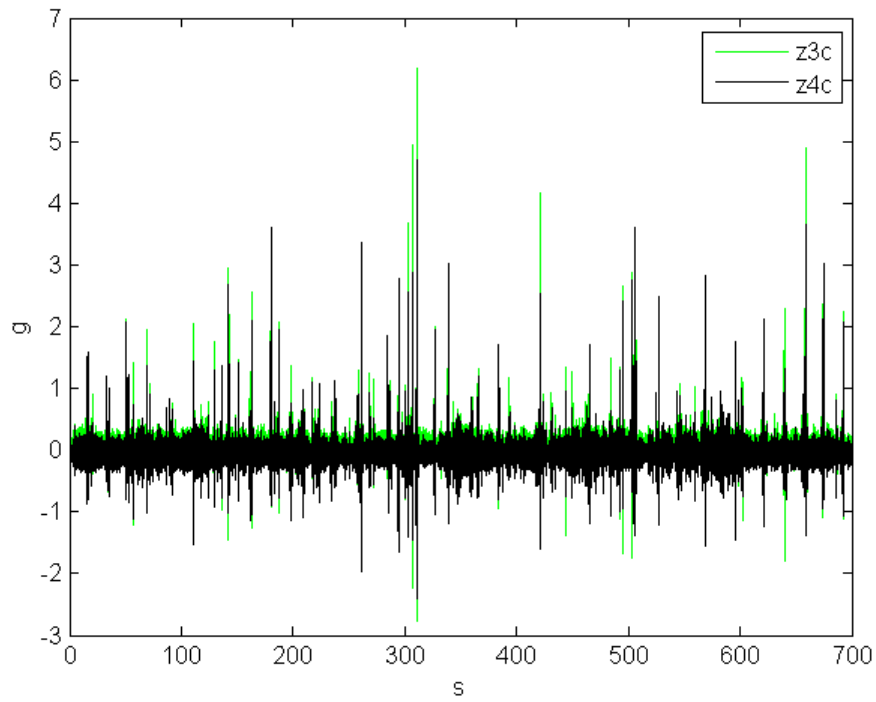
Διάγραμμα 3.3-37: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



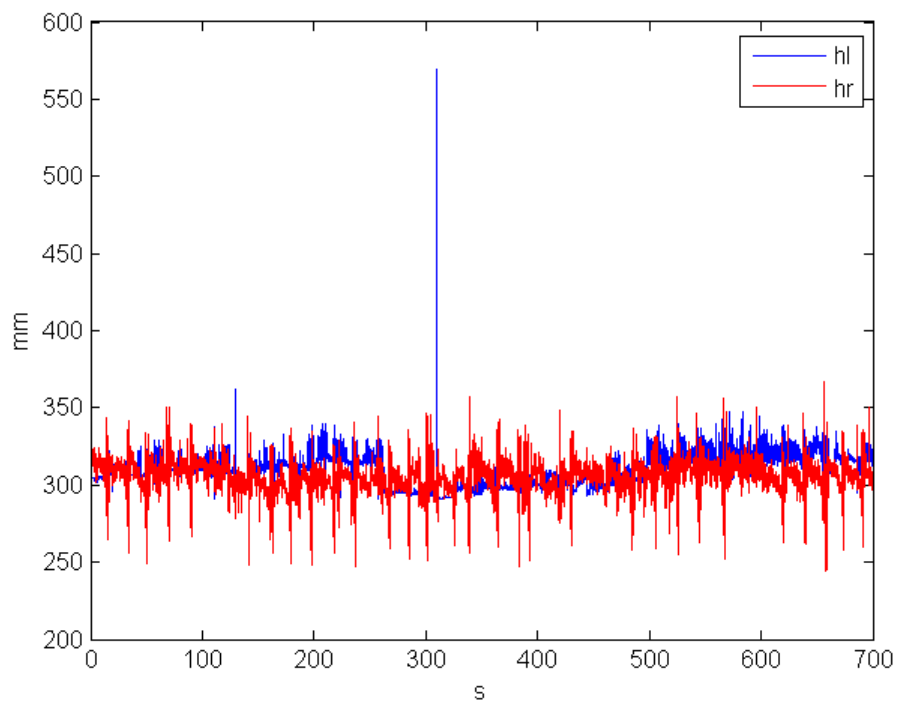
Διάγραμμα 3.3-38: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



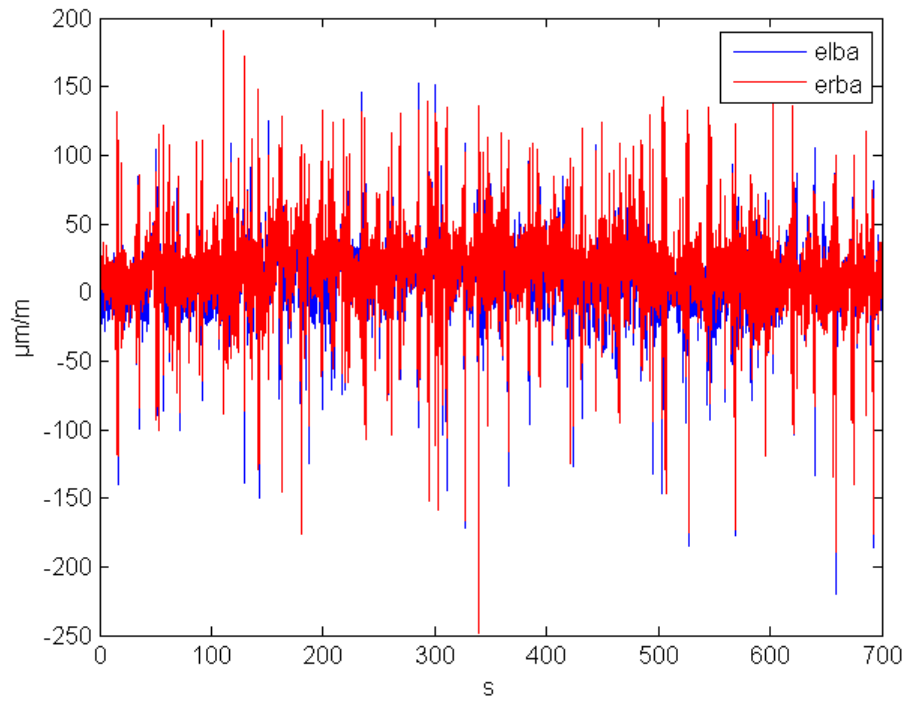
Διάγραμμα 3.3-39: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



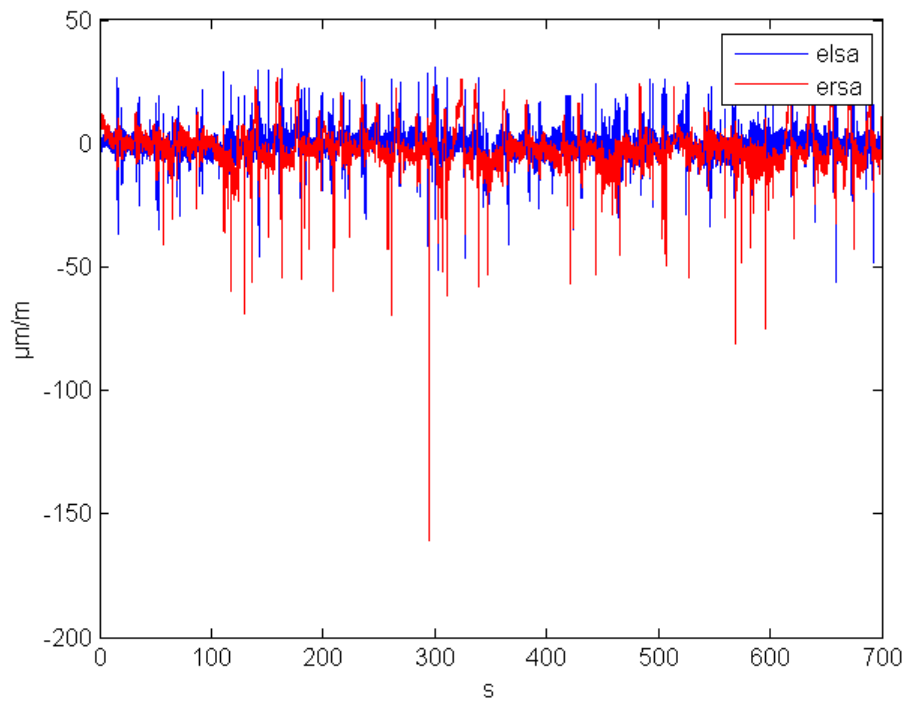
Διάγραμμα 3.3-40: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



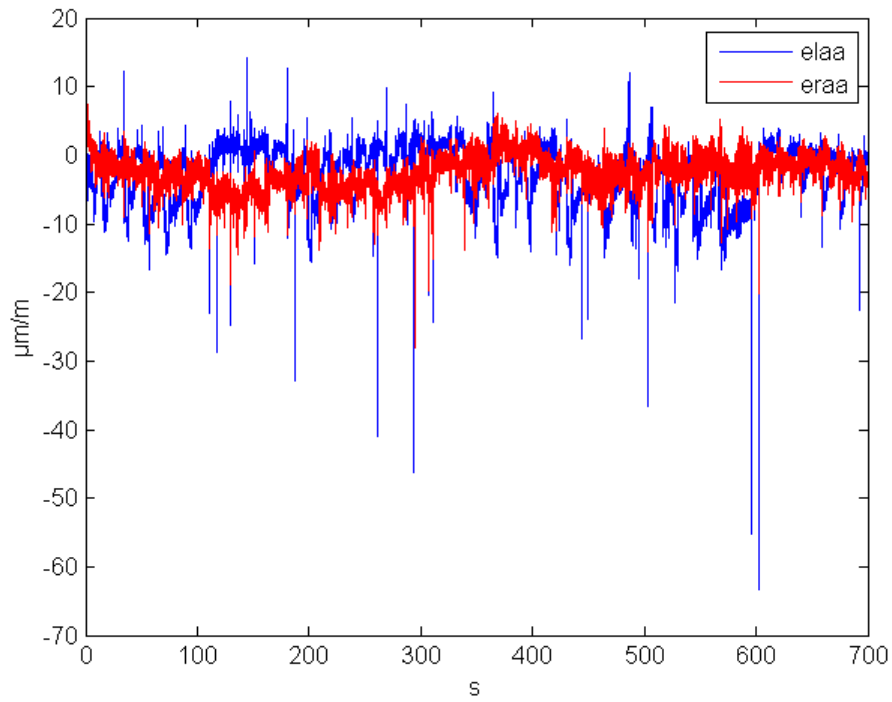
Διάγραμμα 3.3-41: Σύγκριση της Μετατόπισης του Σώματος του Οχήματος από το Έδαφος στις δύο πλευρές



Διάγραμμα 3.3-42: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

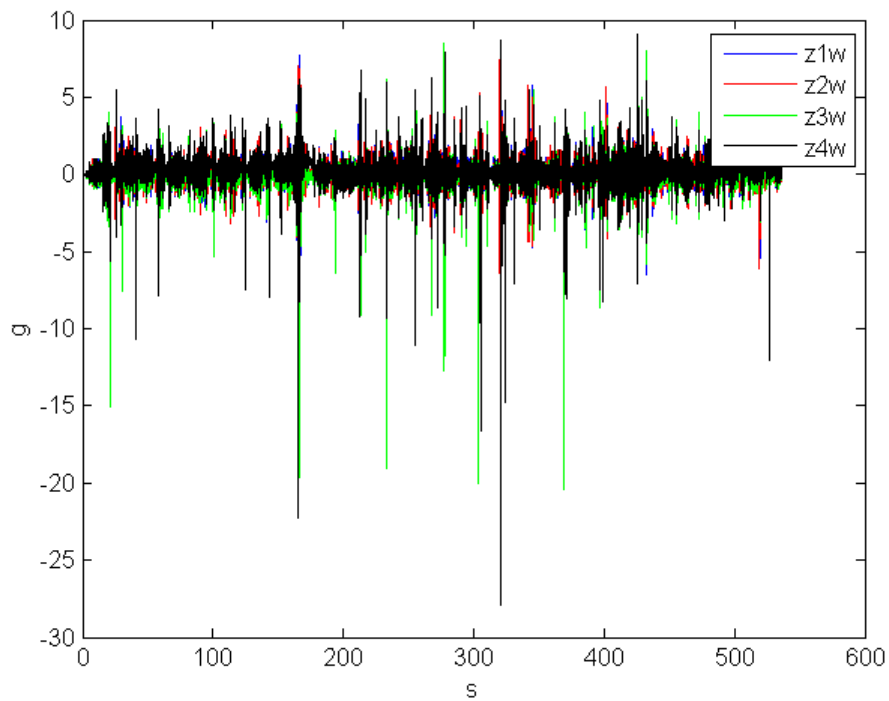


Διάγραμμα 3.3-43: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

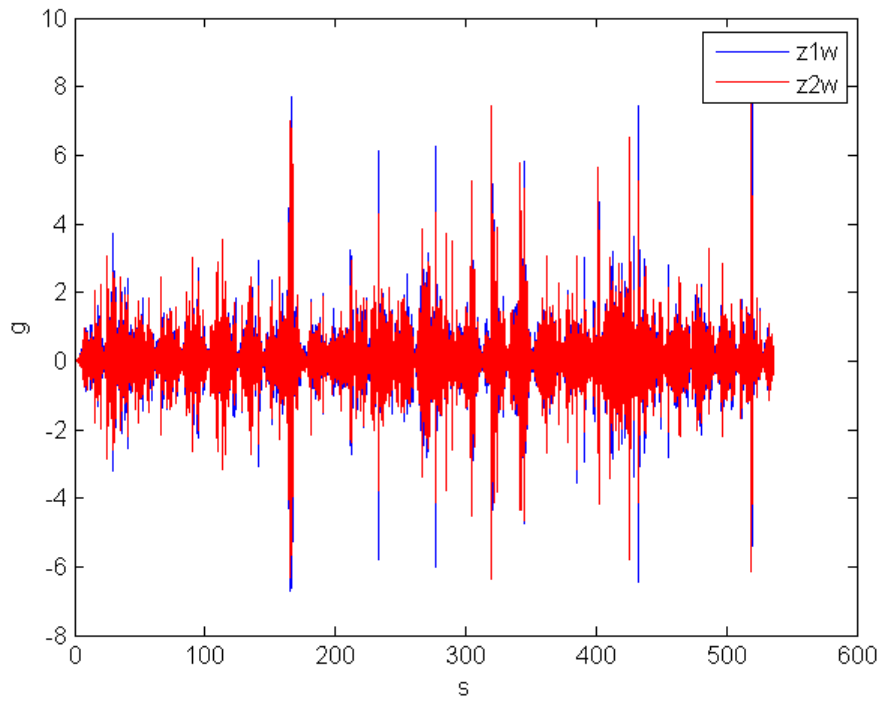


Διάγραμμα 3.3-44: Σύγκριση των Αξονικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

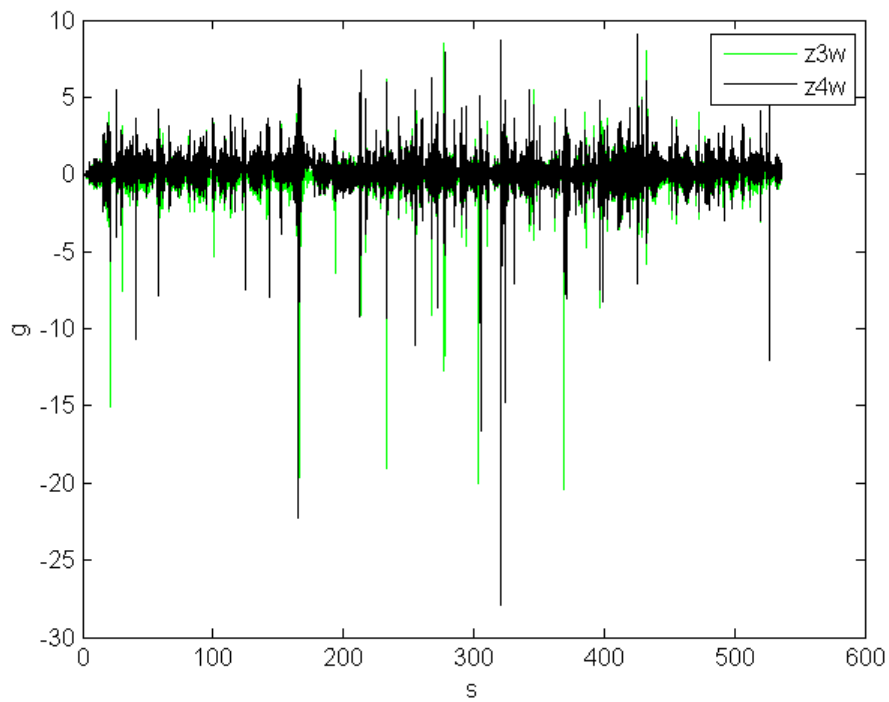
3.3.6 Τεστ 6- Κατηγορία 2



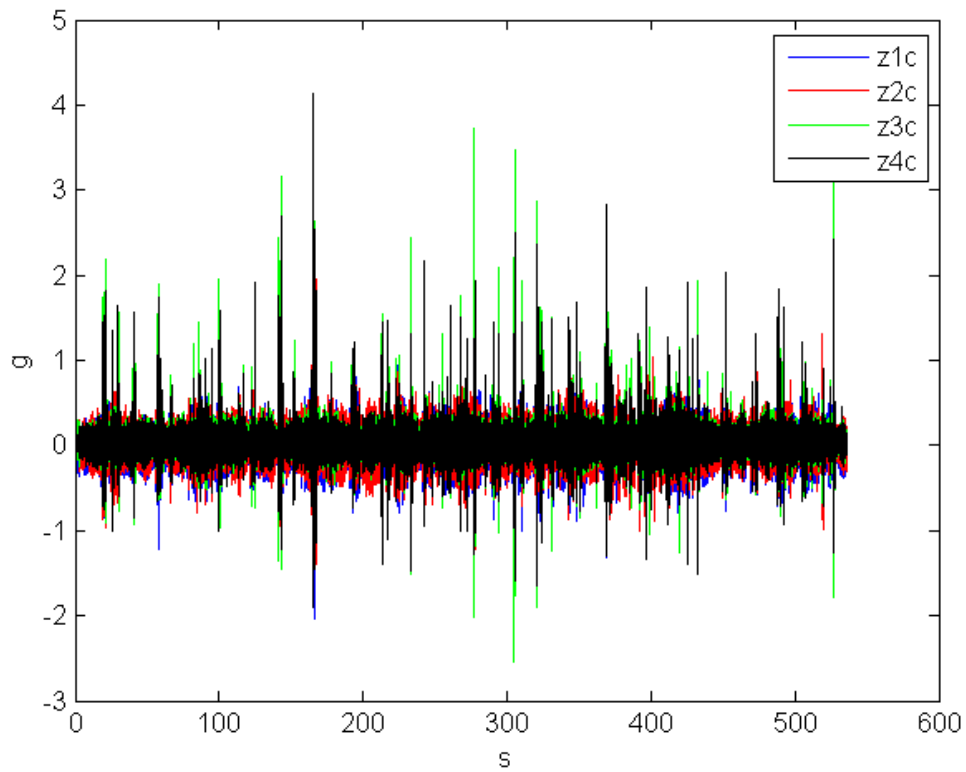
Διάγραμμα 3.3-45: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



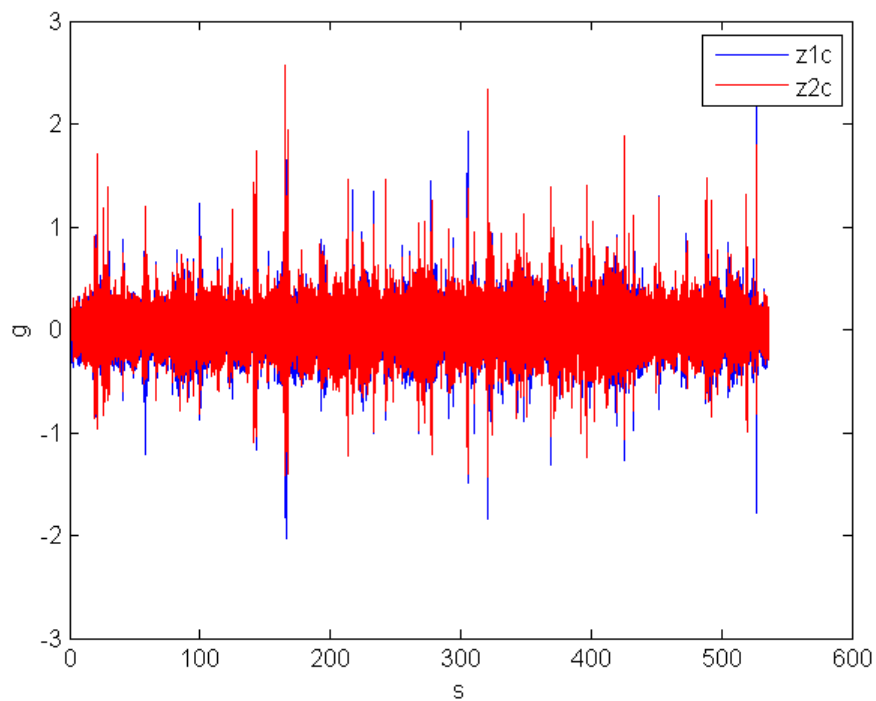
Διάγραμμα 3.3-46: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



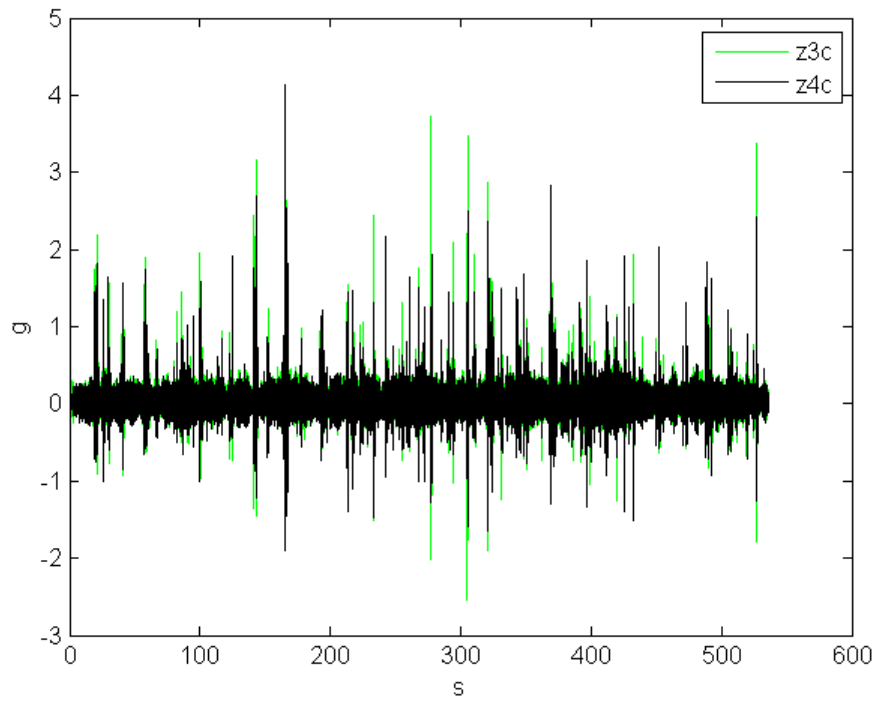
Διάγραμμα 3.3-47: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



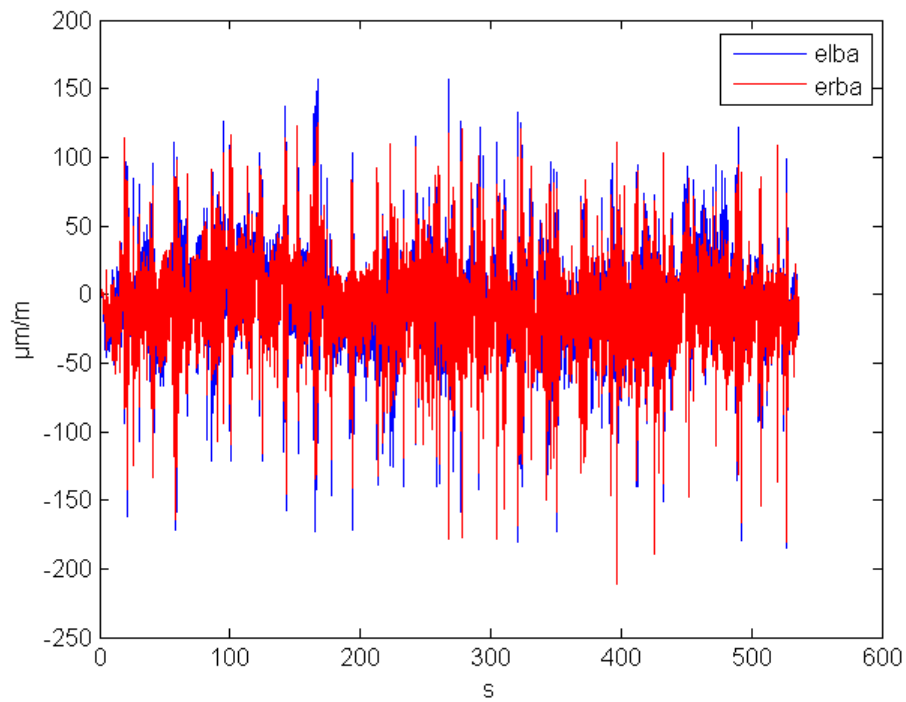
Διάγραμμα 3.3-48: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



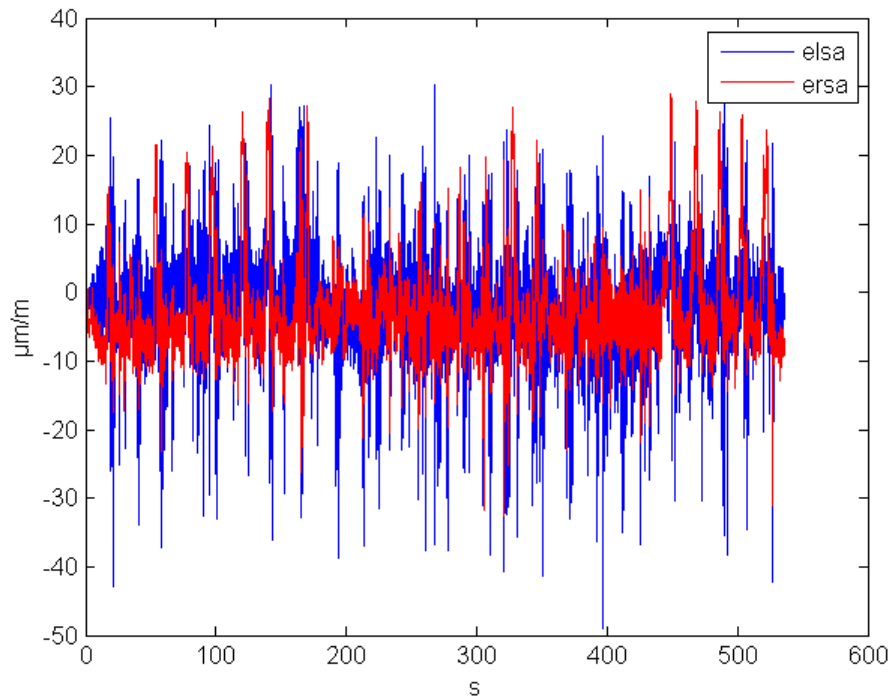
Διάγραμμα 3.3-49: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-50: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς

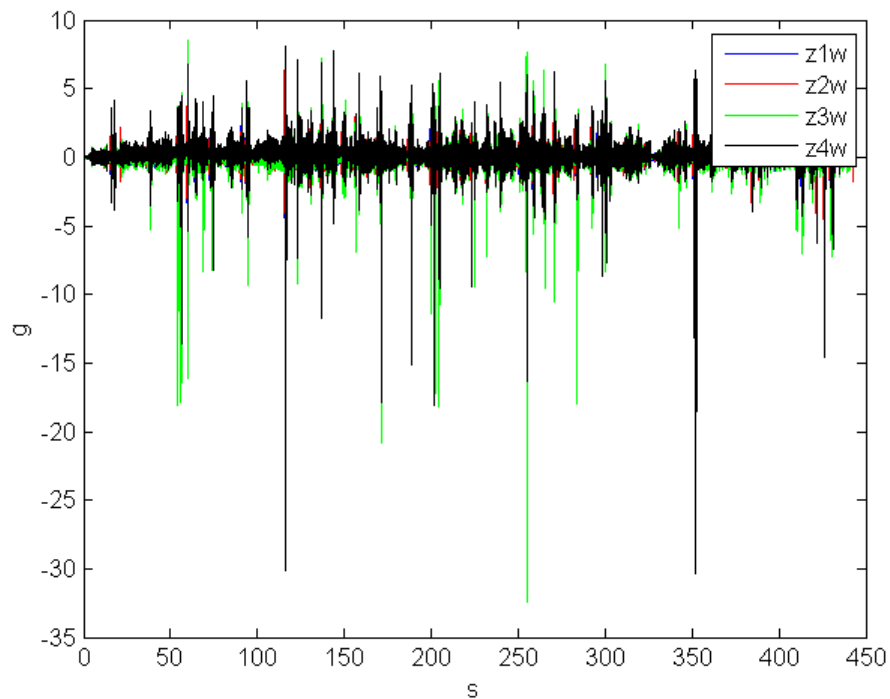


Διάγραμμα 3.3-51: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

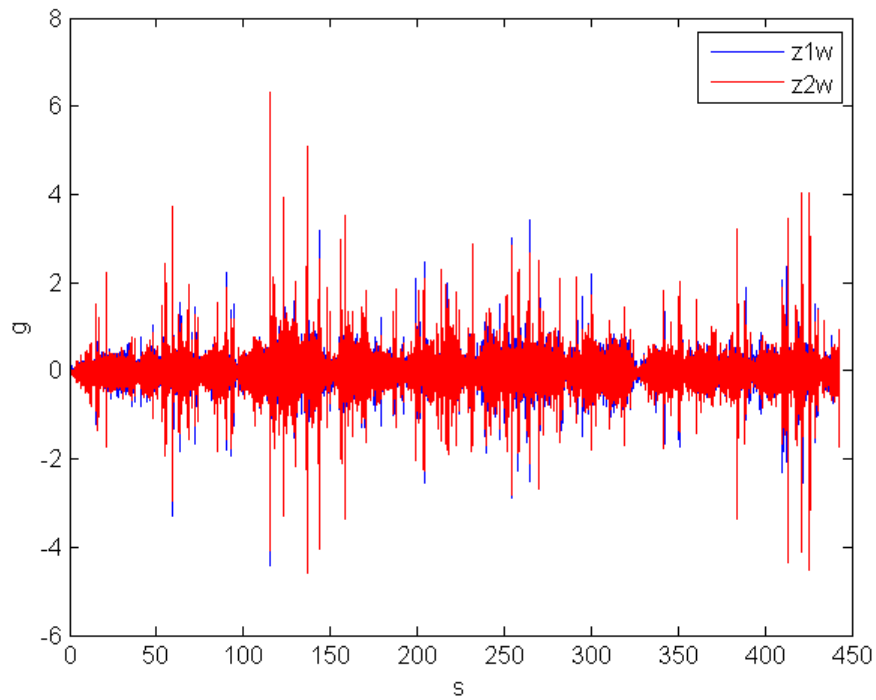


Διάγραμμα 3.3-52: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

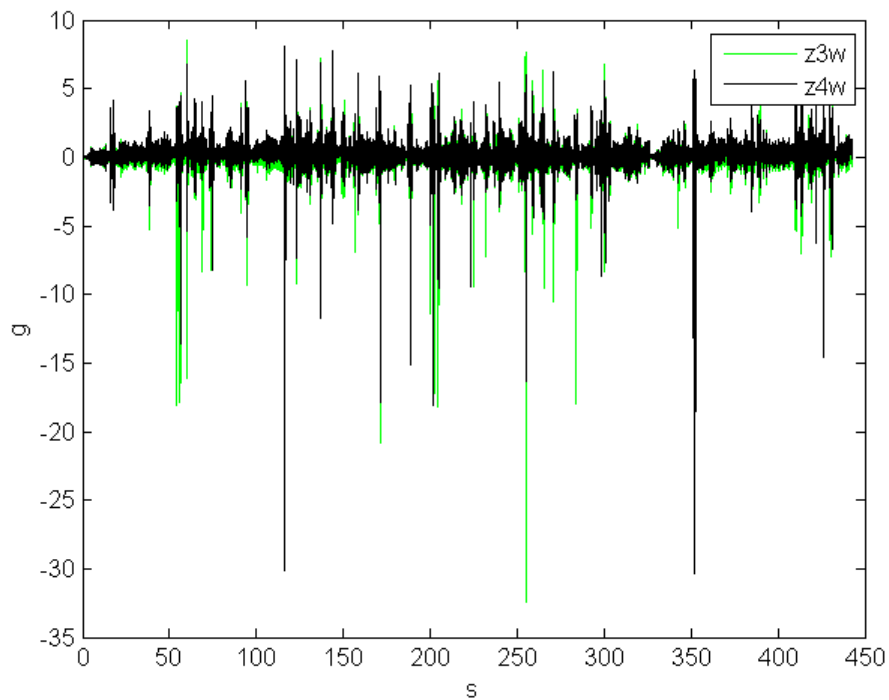
3.3.7 Τεστ 7- Κατηγορία 3



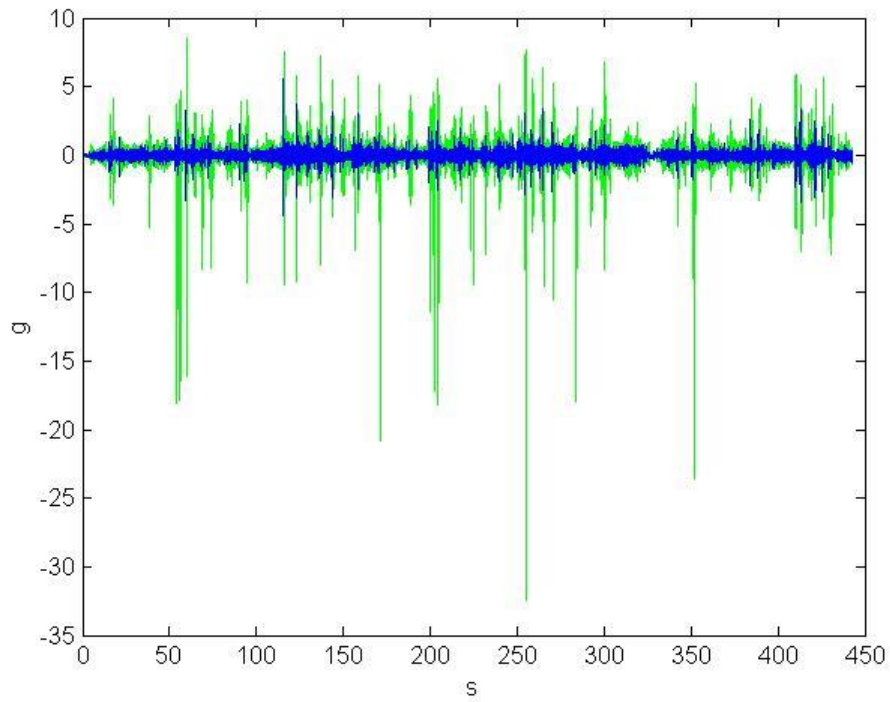
Διάγραμμα 3.3-53: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



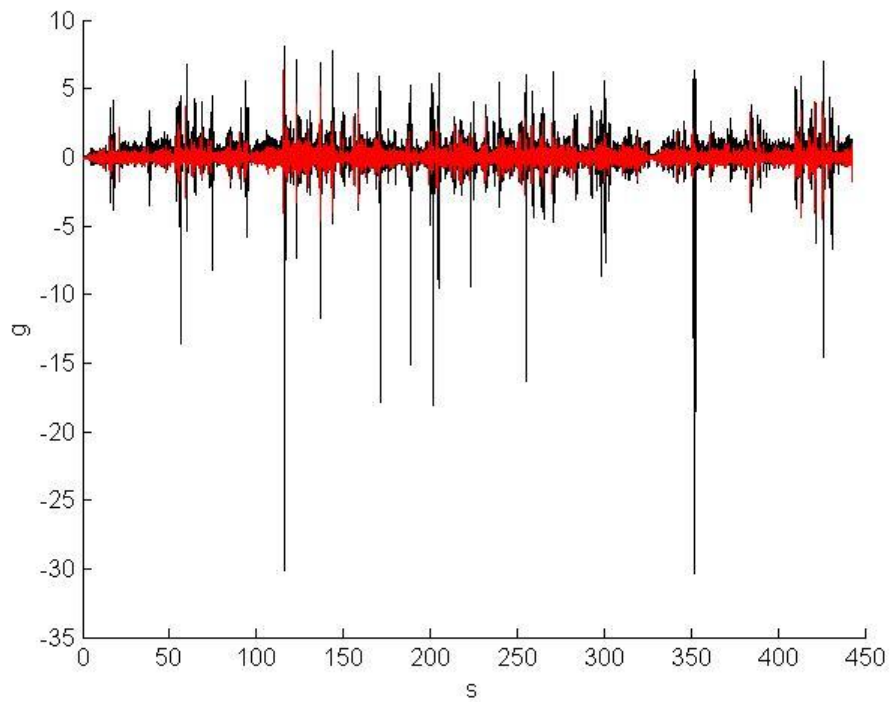
Διάγραμμα 3.3-54: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



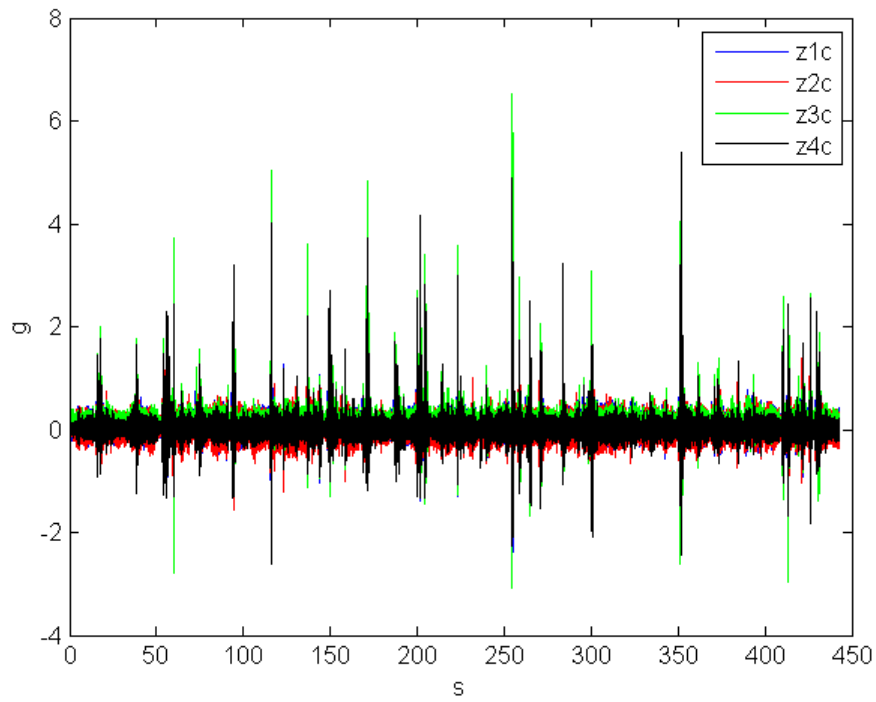
Διάγραμμα 3.3-55: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



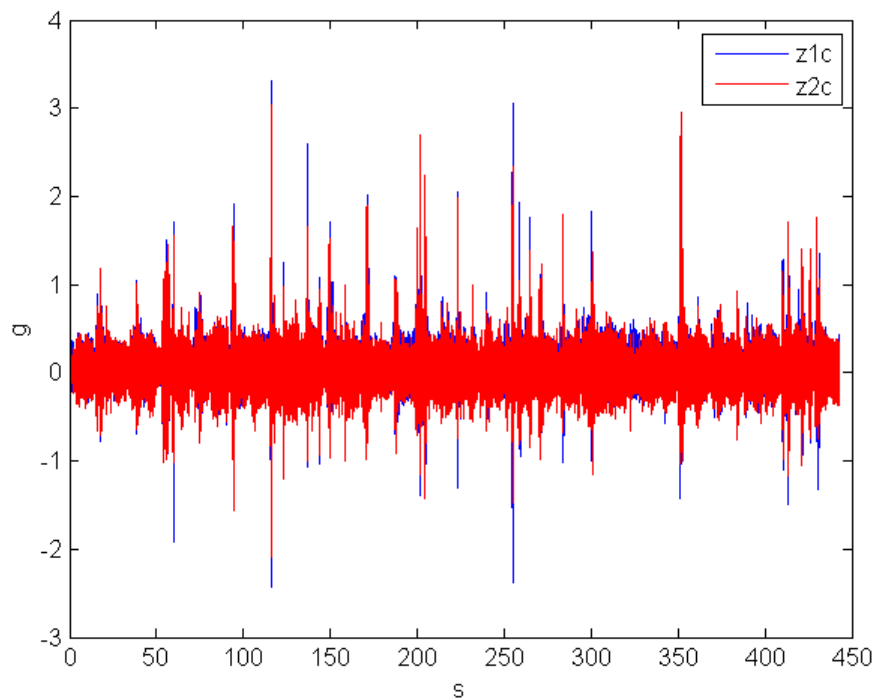
Διάγραμμα 3.3-56: Σύγκριση Κάθετων Επιταχύνσεων μεταξύ των Τροχών της Αριστερής Πλευράς



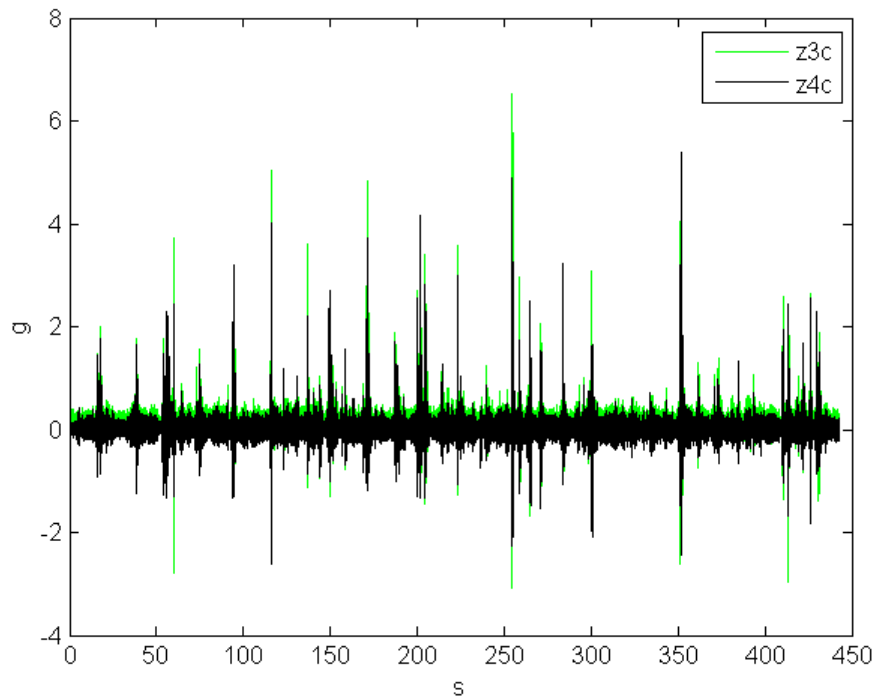
Διάγραμμα 3.3-57: Σύγκριση Κάθετων Επιταχύνσεων μεταξύ των Τροχών της Δεξιάς Πλευράς



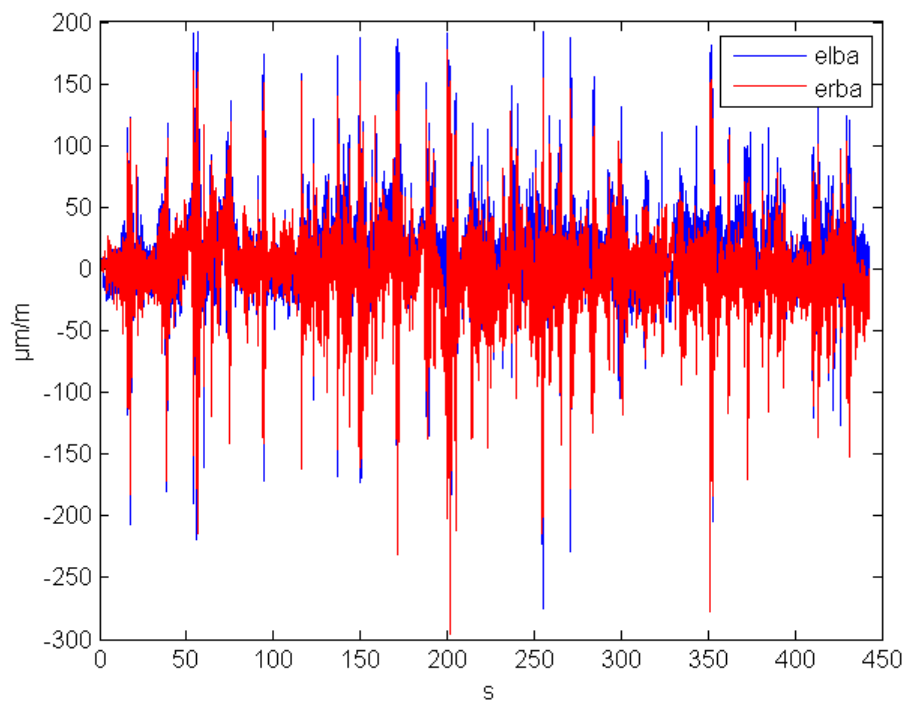
Διάγραμμα 3.3-58: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



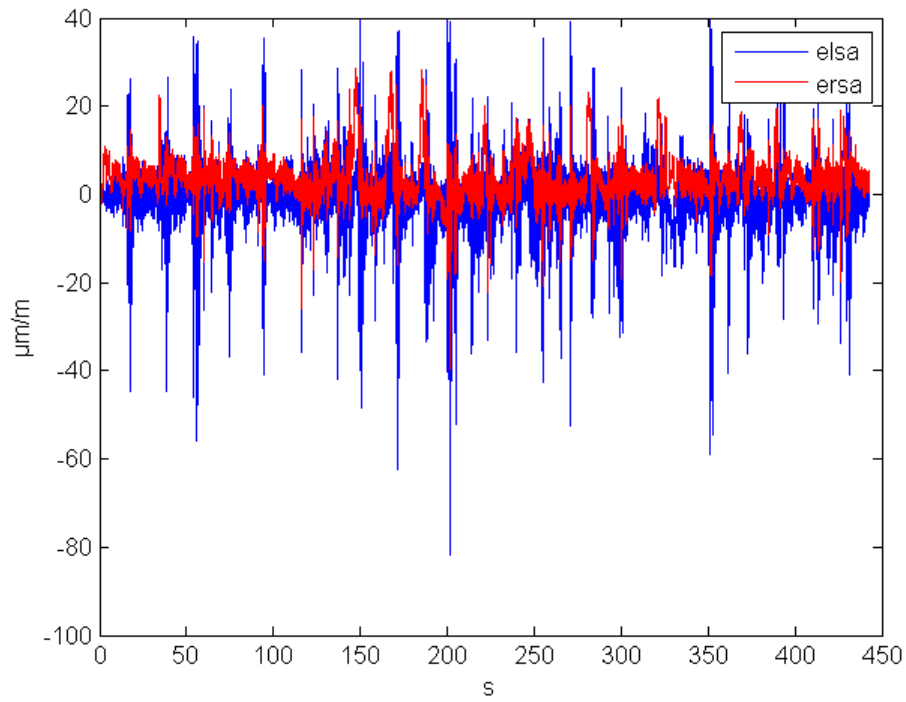
Διάγραμμα 3.3-59: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



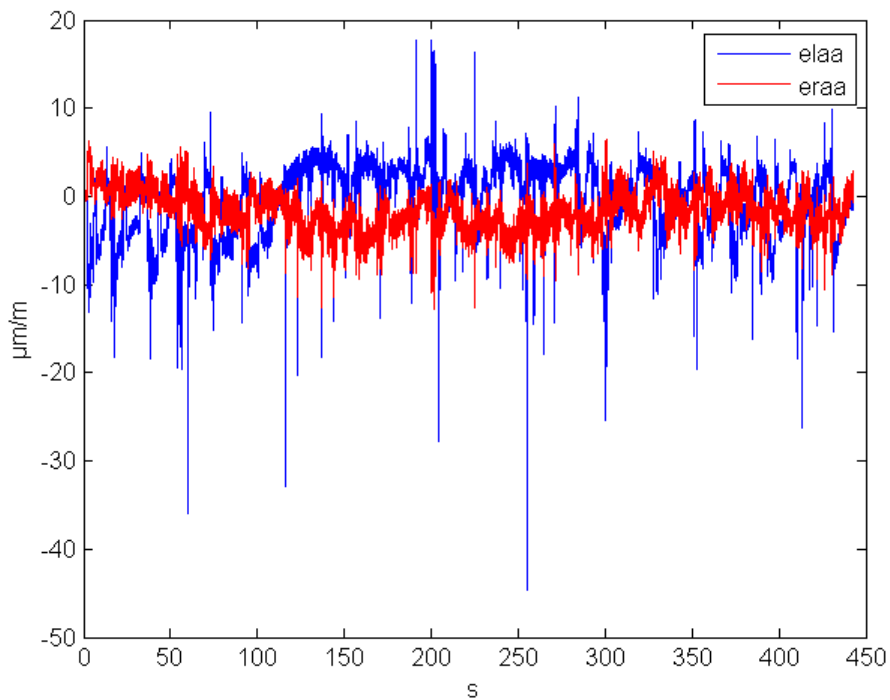
Διάγραμμα 3.3-60: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-61: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

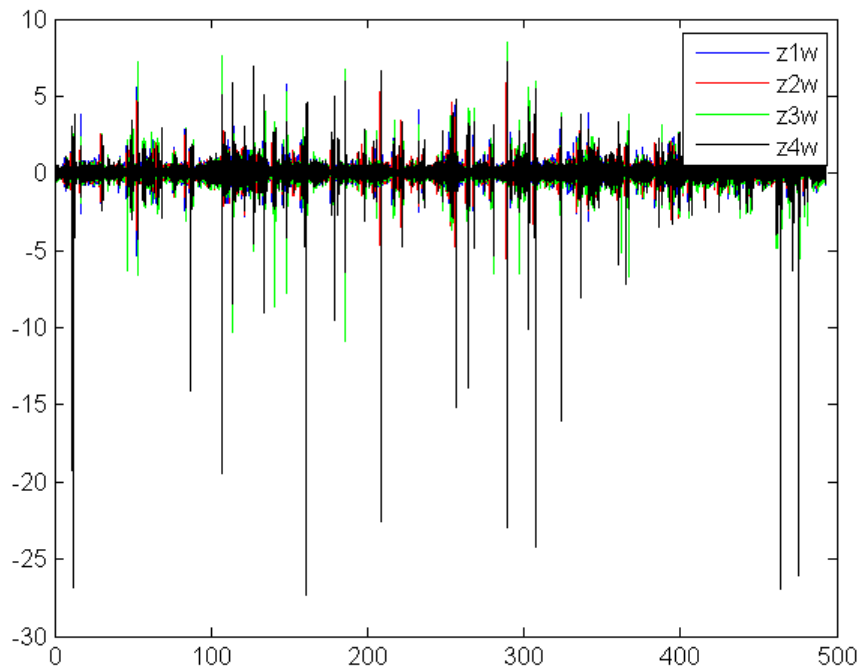


Διάγραμμα 3.3-62: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

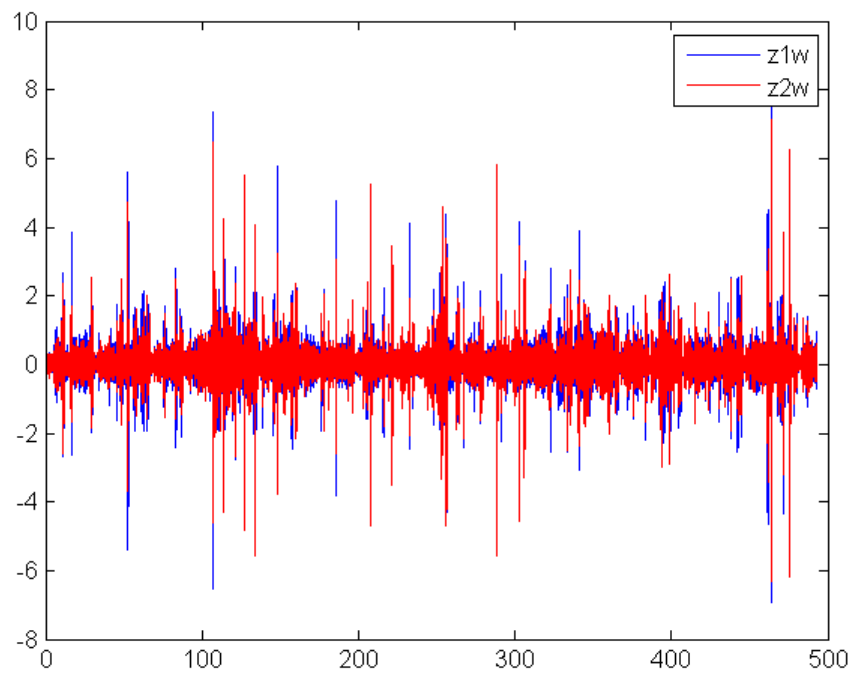


Διάγραμμα 3.3-63: Σύγκριση των Αξονικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

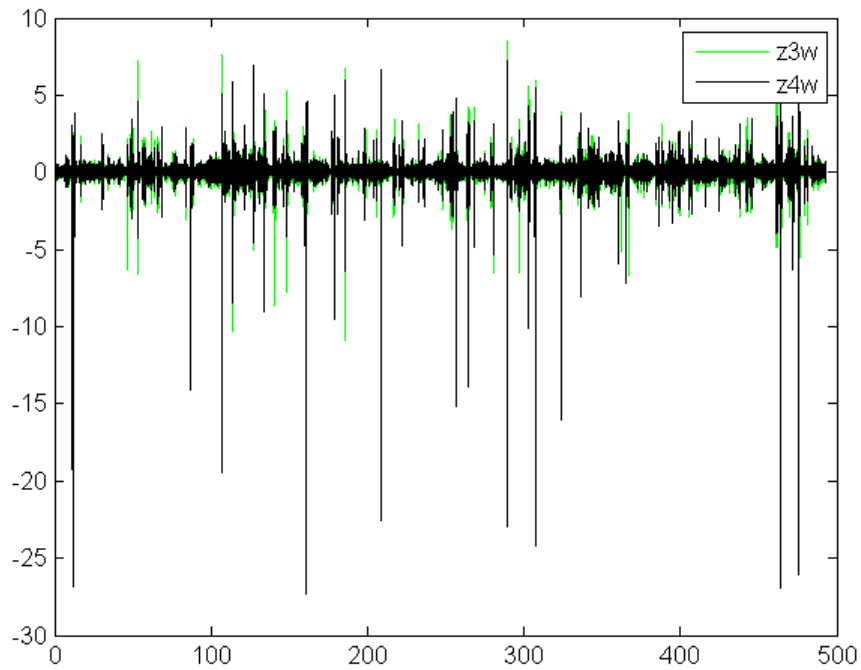
3.3.8 Τεστ 8- Κατηγορία 4



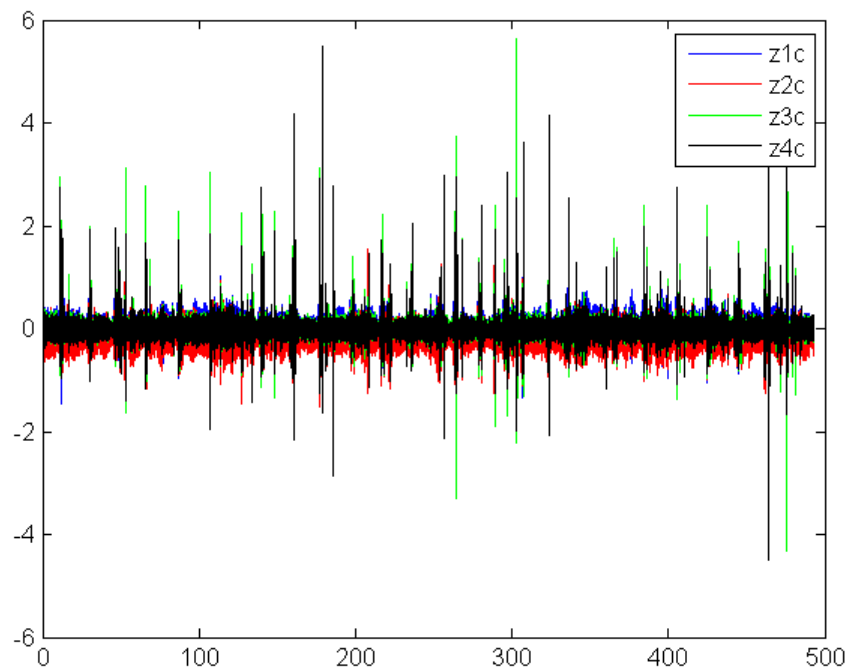
Διάγραμμα 3.3-64: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



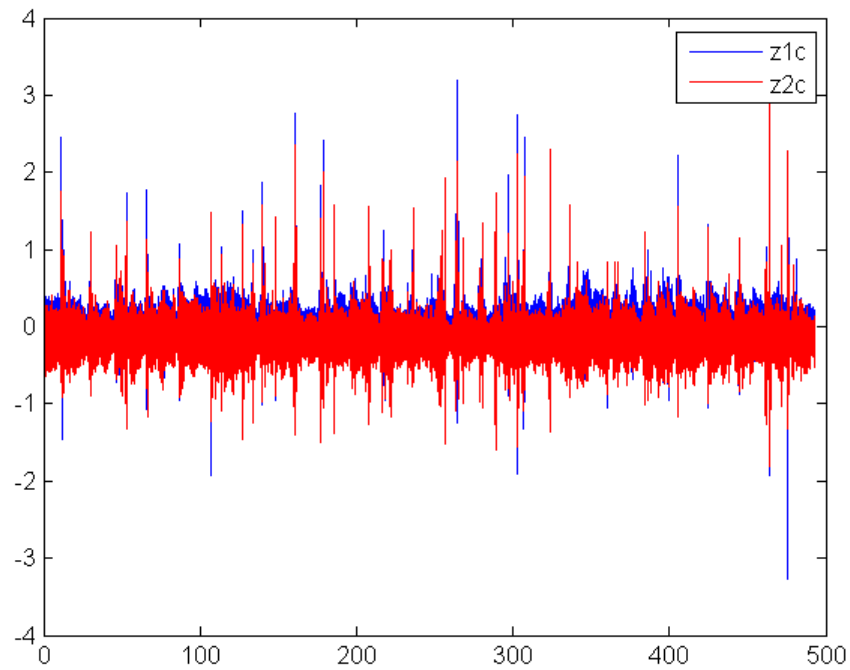
Διάγραμμα 3.3-65: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



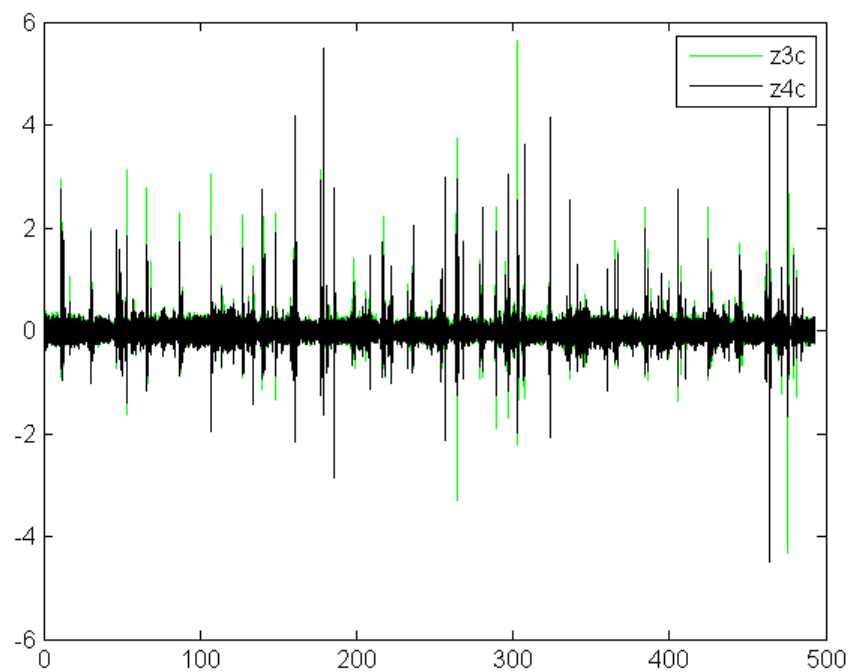
Διάγραμμα 3.3-66: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



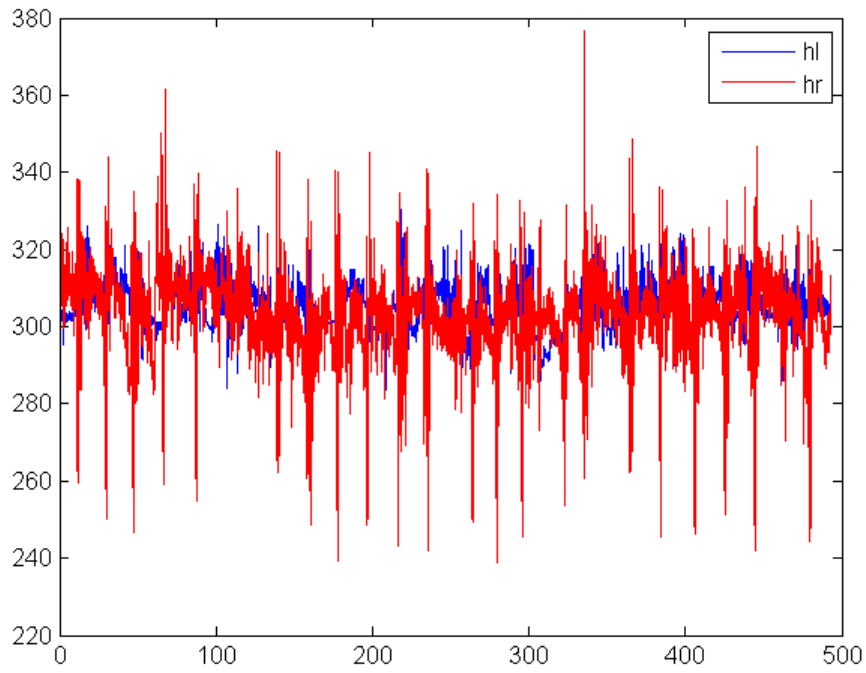
Διάγραμμα 3.3-67: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



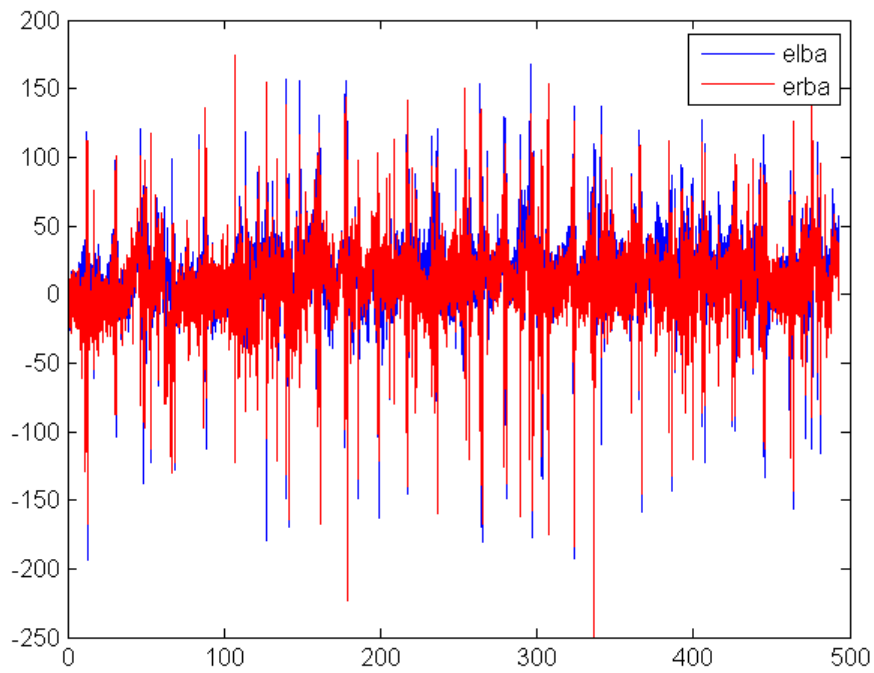
Διάγραμμα 3.3-68: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



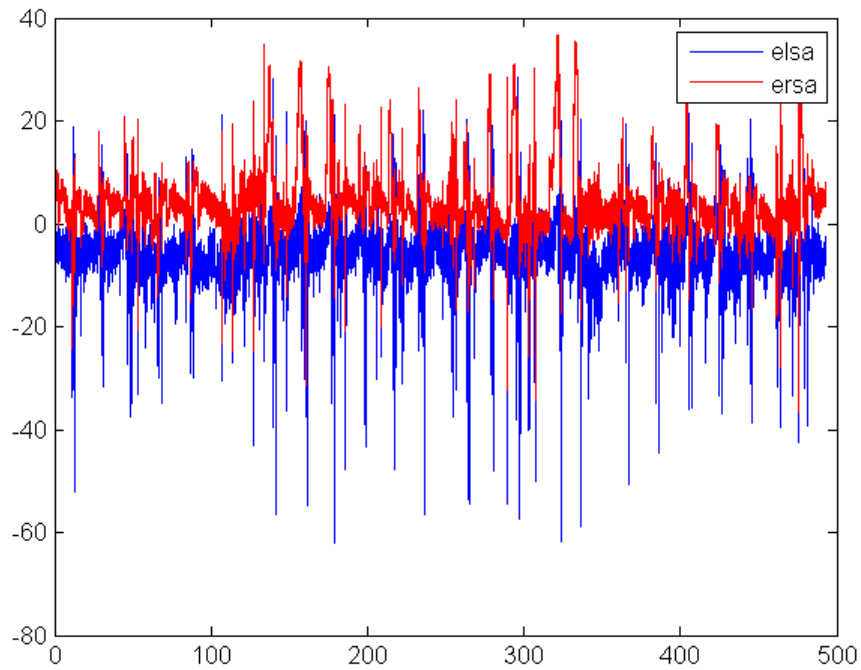
Διάγραμμα 3.3-69: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



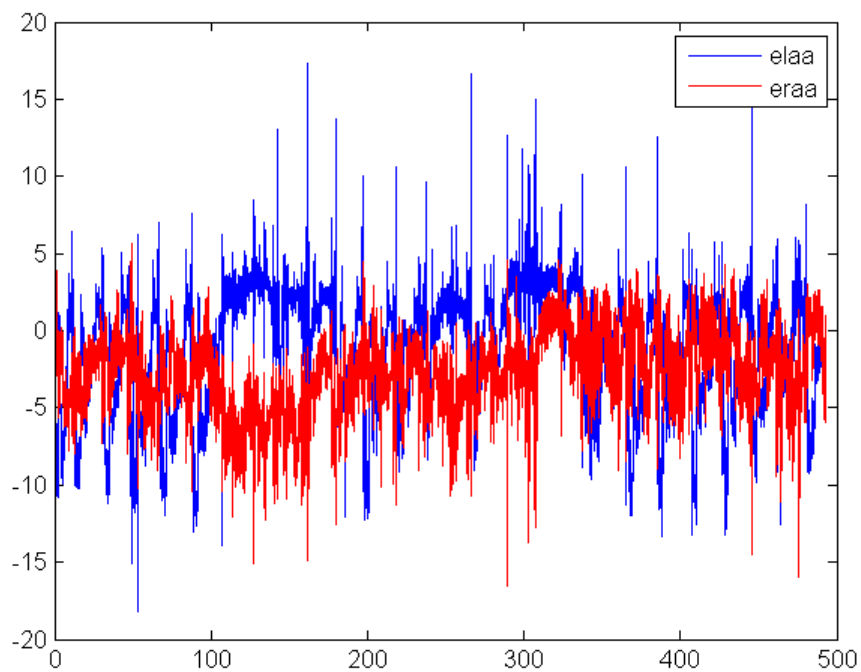
Διάγραμμα 3.3-70: Σύγκριση της Μετατόπισης του Σώματος του Οχήματος από το Έδαφος στις δύο πλευρές



Διάγραμμα 3.3-71: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

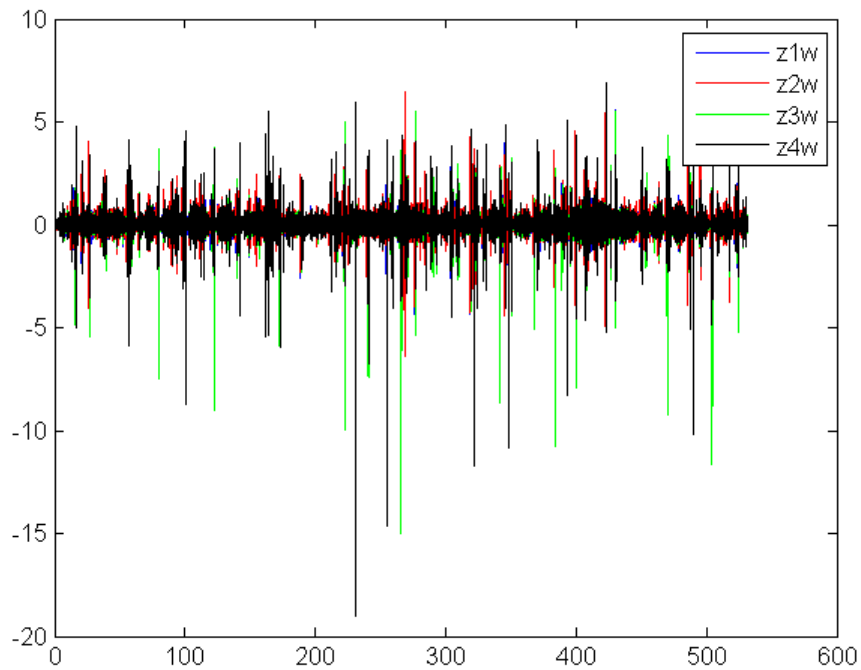


Διάγραμμα 3.3-72: Σύγκριση των Διατμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

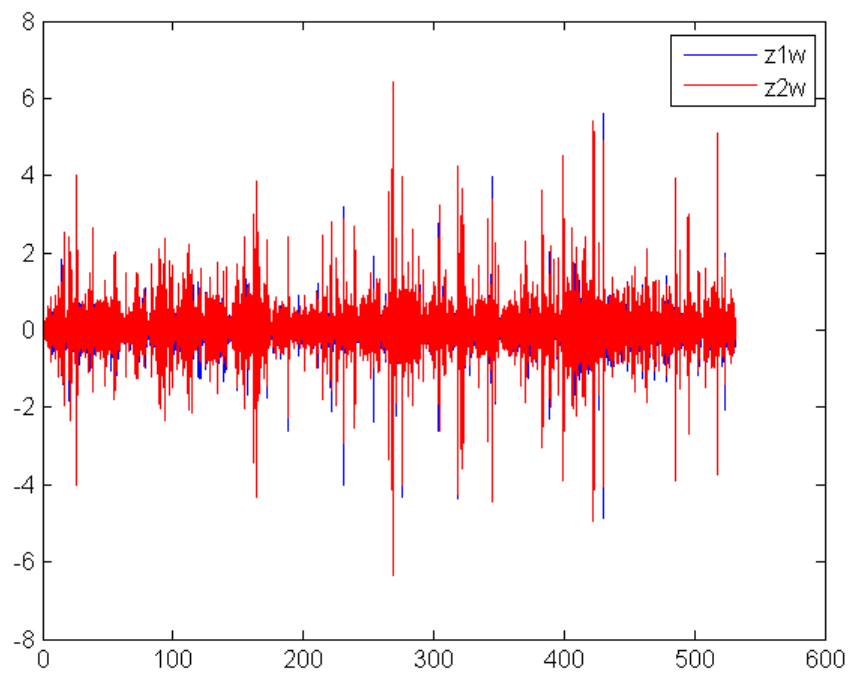


Διάγραμμα 3.3-73: Σύγκριση των Διατμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

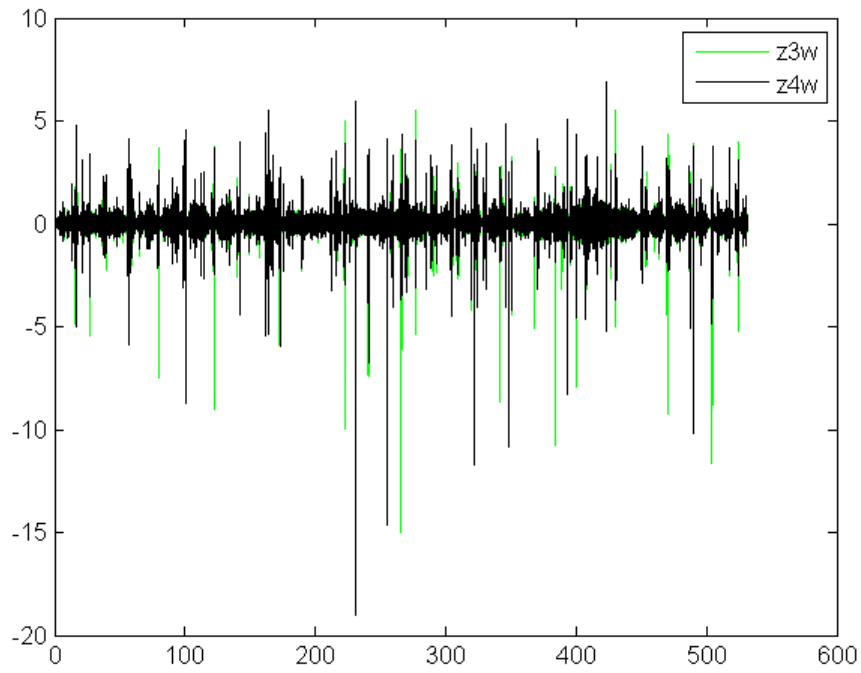
3.3.9 Τεστ 9- Κατηγορία 5



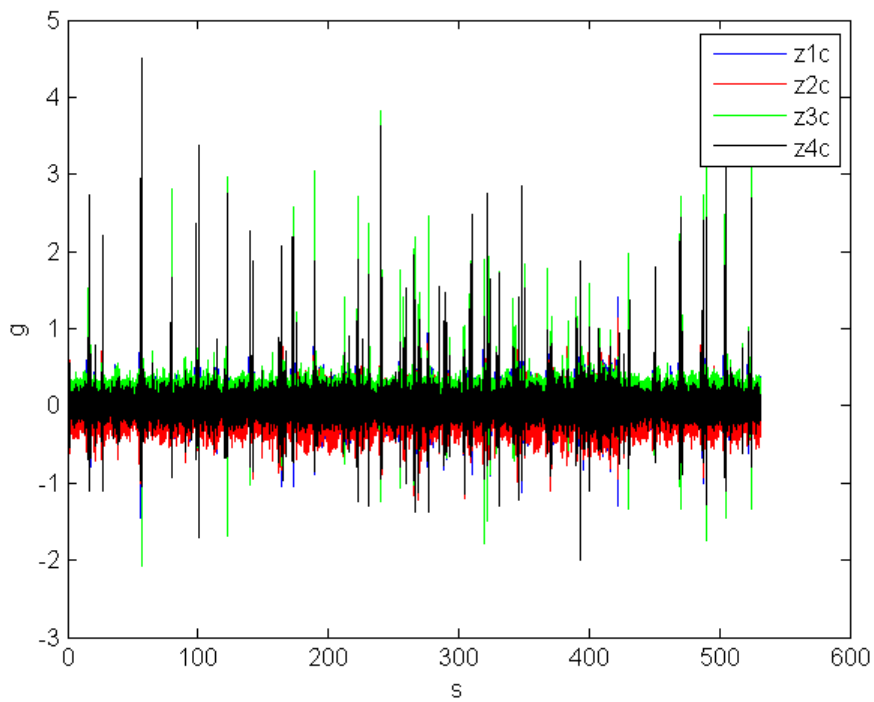
Διάγραμμα 3.3-74: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



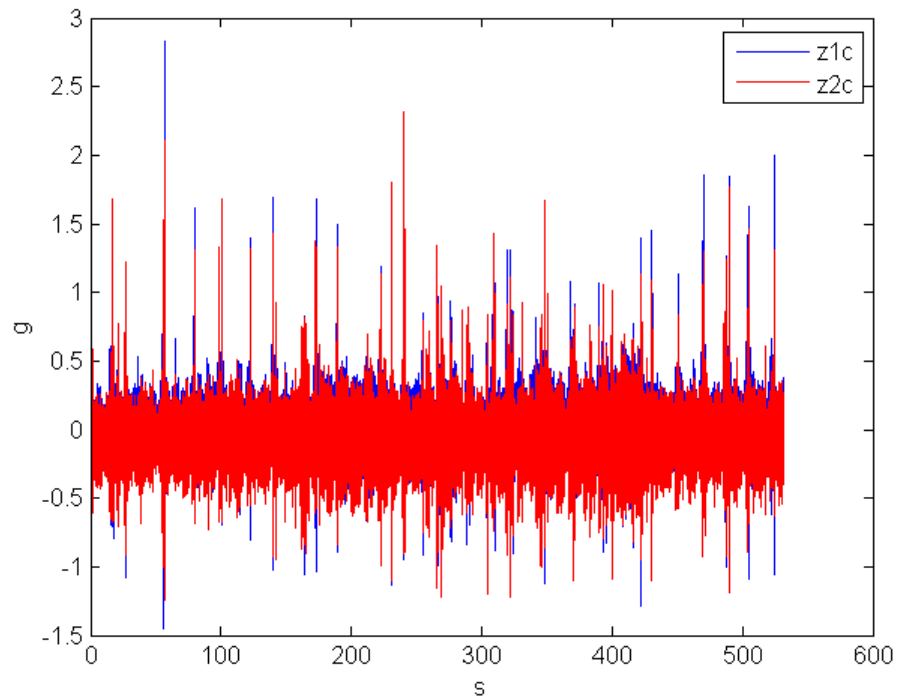
Διάγραμμα 3.3-75: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



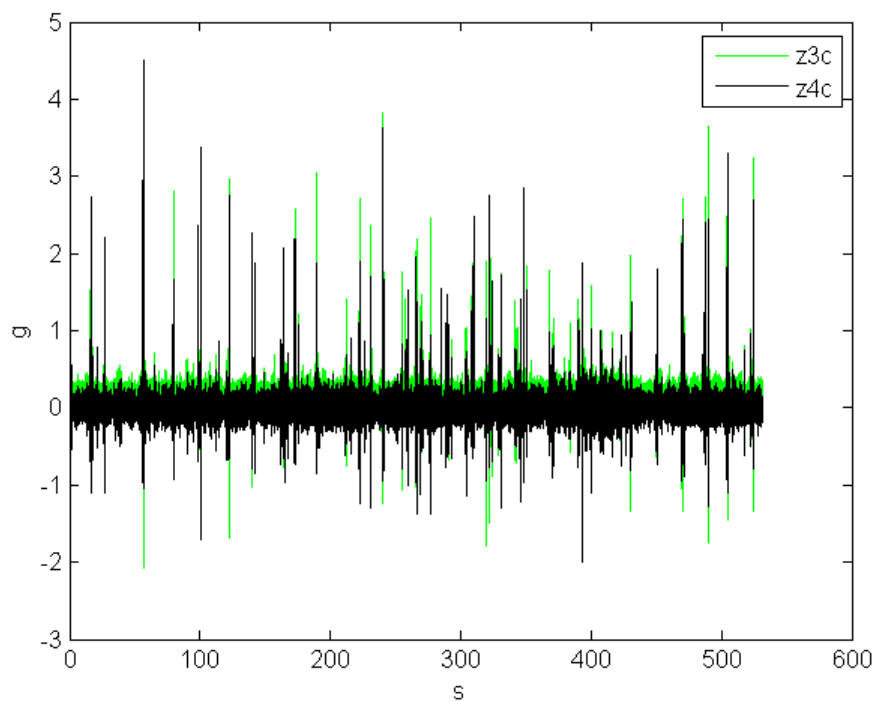
Διάγραμμα 3.3-76: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



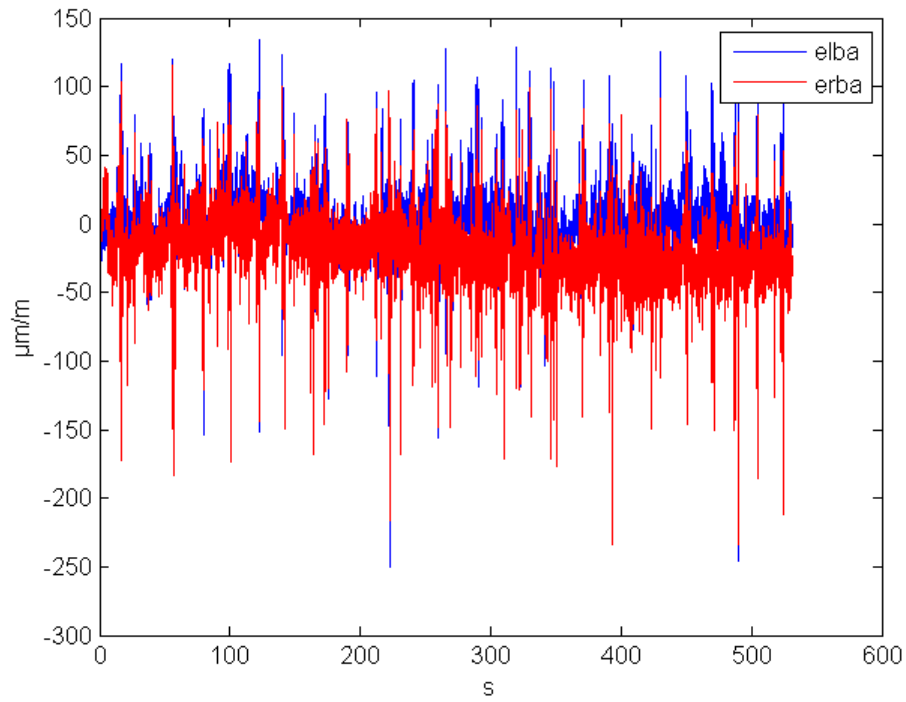
Διάγραμμα 3.3-77: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



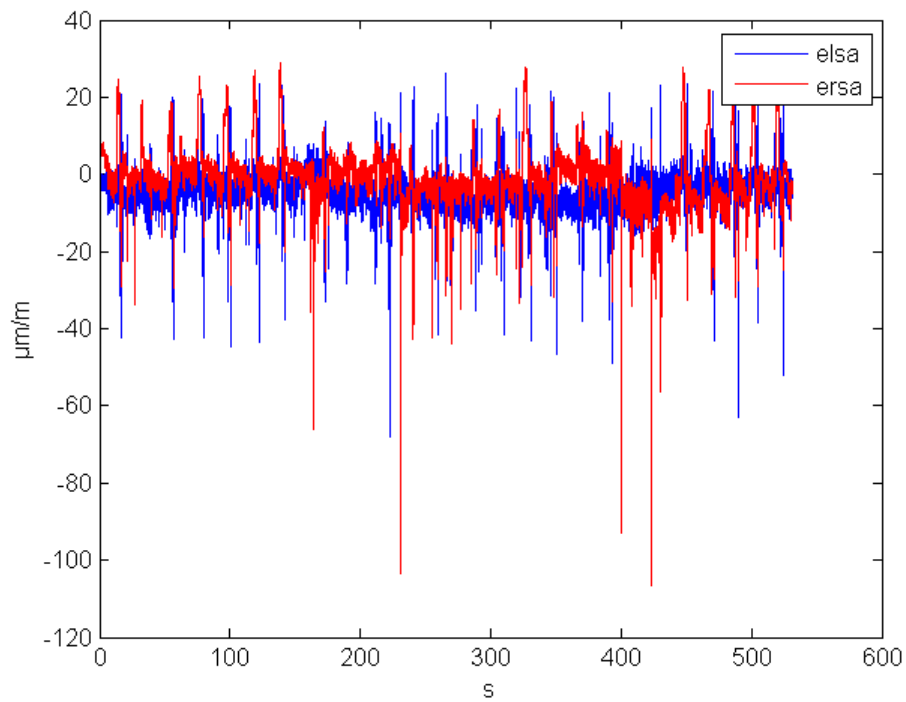
Διάγραμμα 3.3-78: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-79: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς

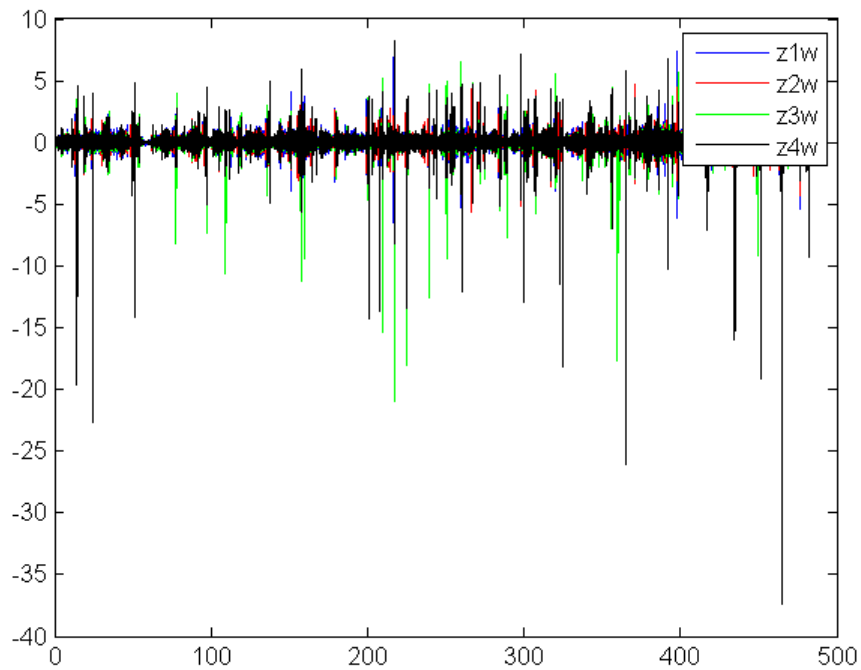


Διάγραμμα 3.3-80: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

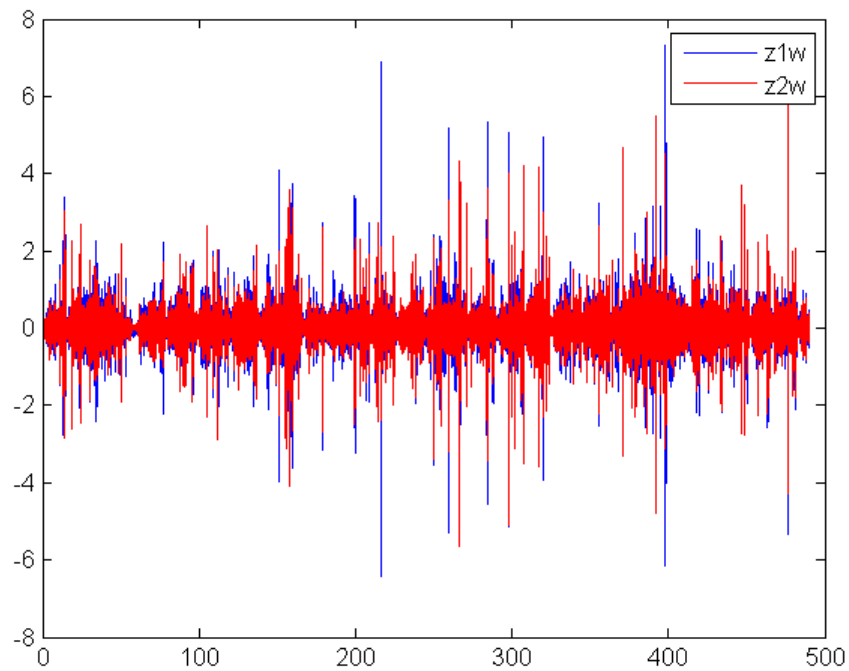


Διάγραμμα 3.3-81: Σύγκριση των Διατμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

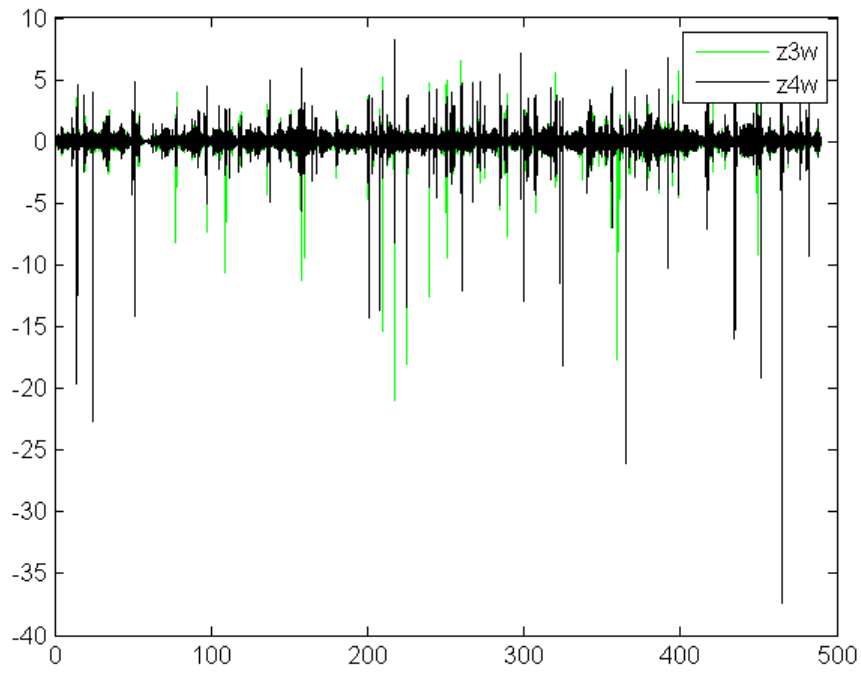
3.3.10 Τεστ 10- Κατηγορία 6



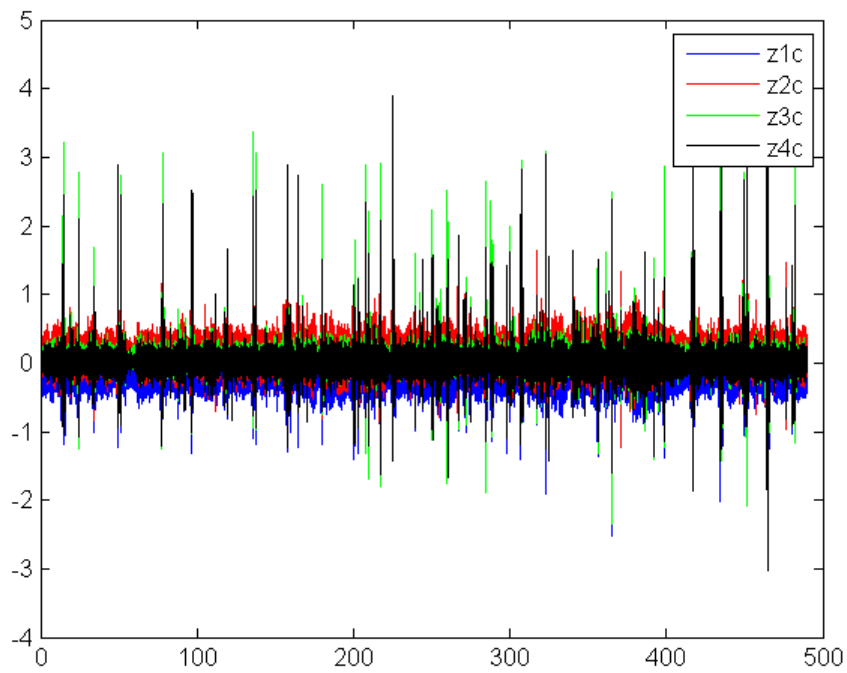
Διάγραμμα 3.3-82: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



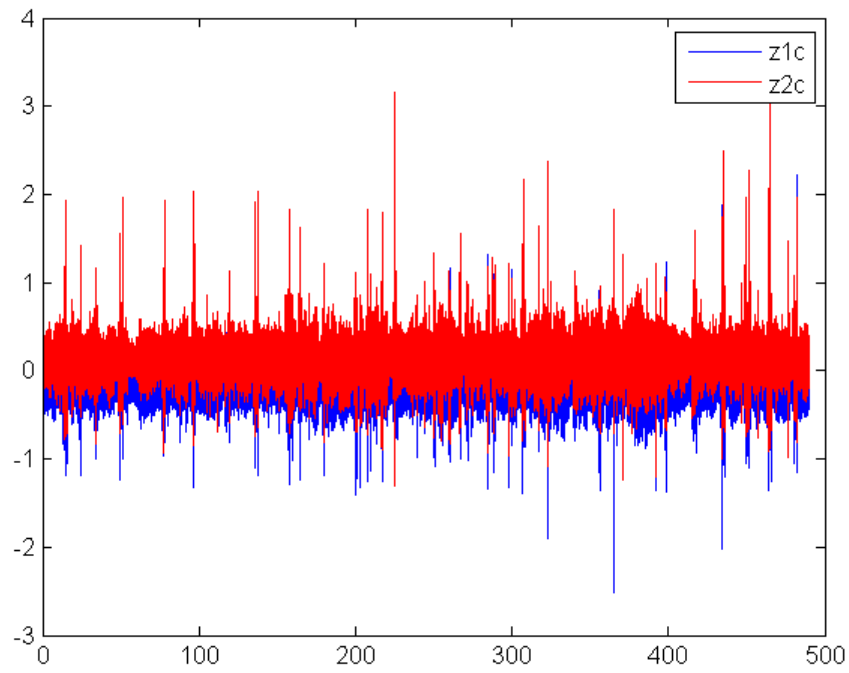
Διάγραμμα 3.3-83: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



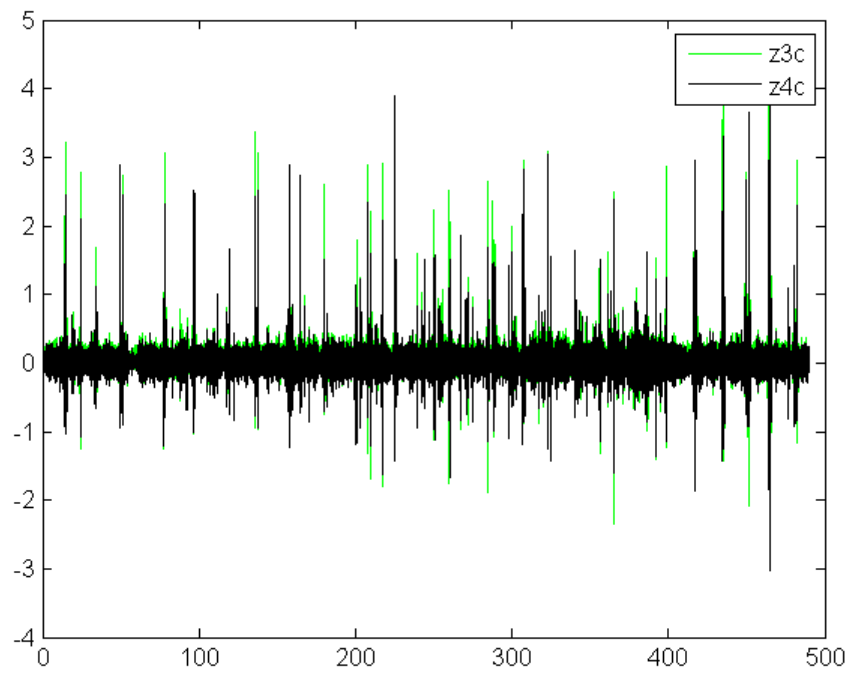
Διάγραμμα 3.3-84: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



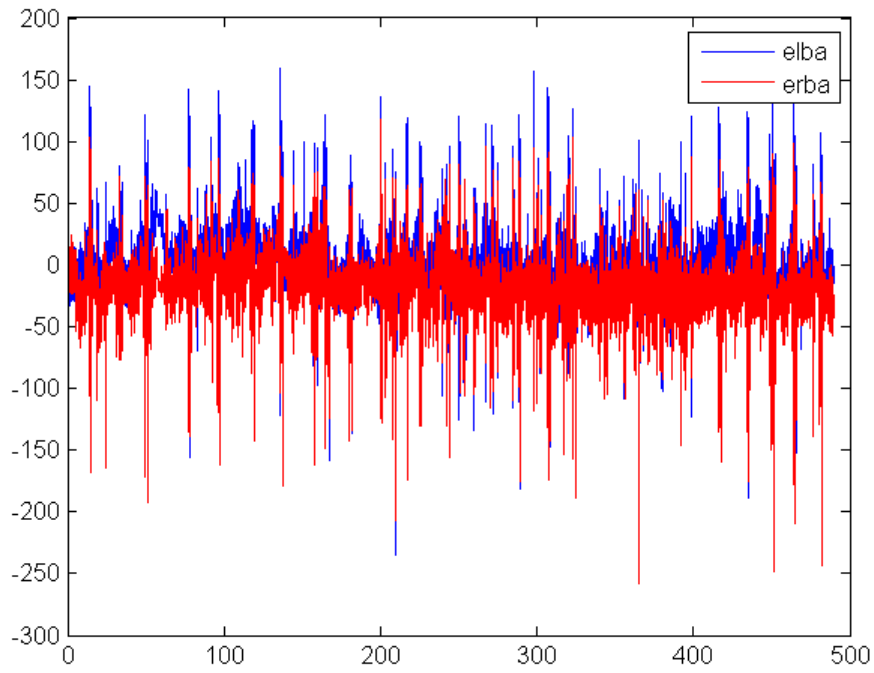
Διάγραμμα 3.3-85: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



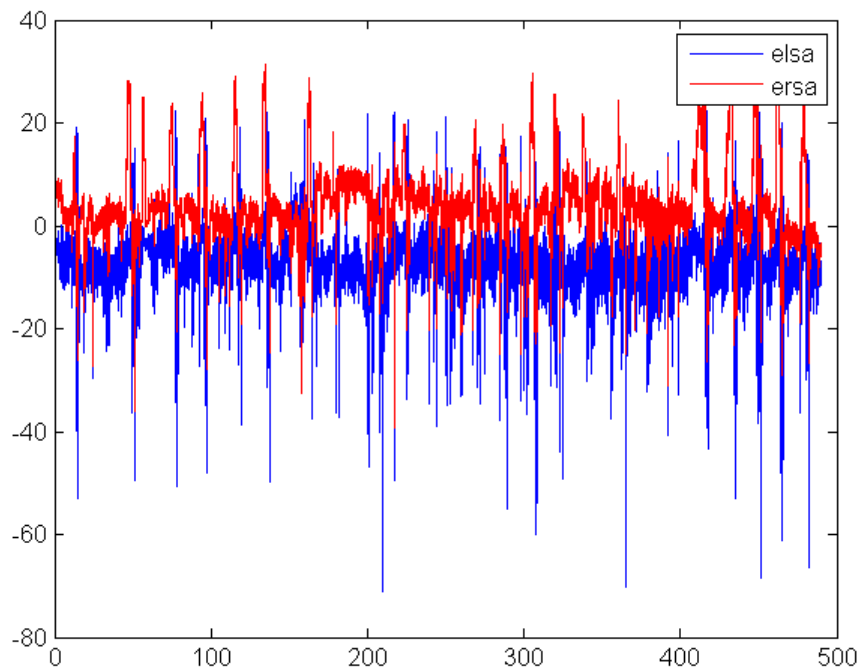
Διάγραμμα 3.3-86: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



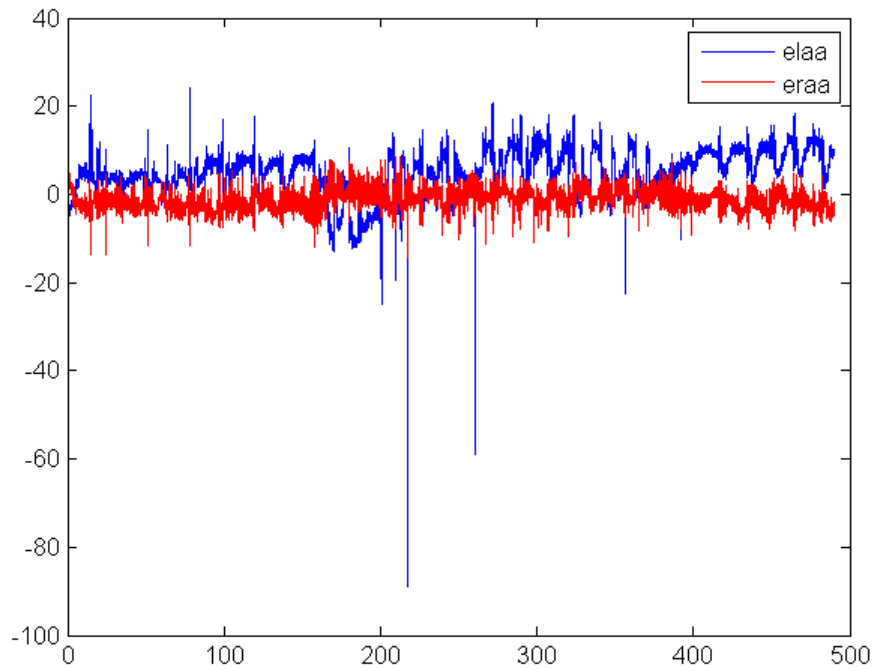
Διάγραμμα 3.3-87: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-88: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

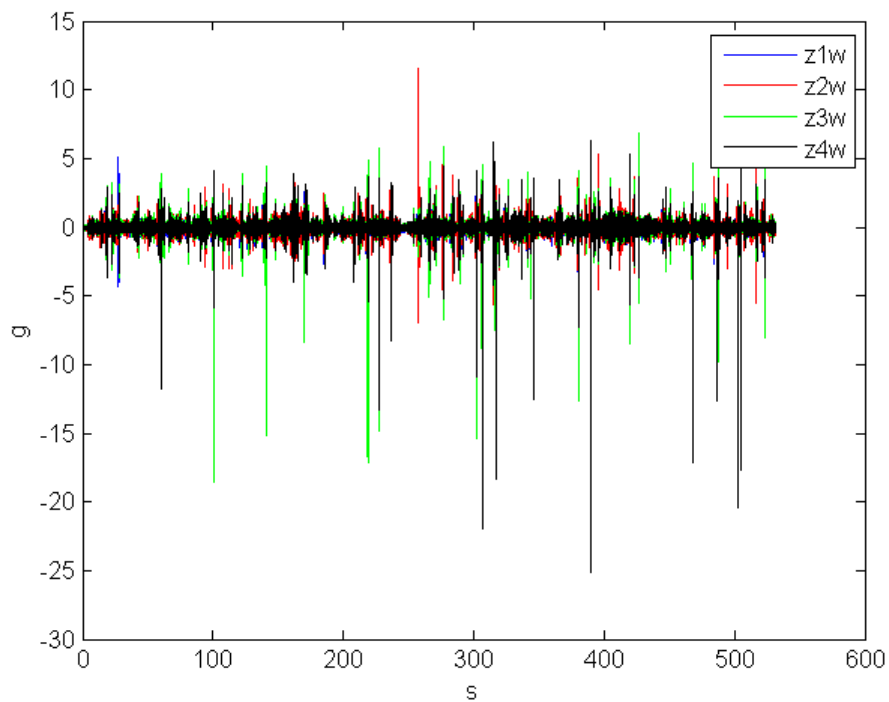


Διάγραμμα 3.3-89: Σύγκριση των Διατμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

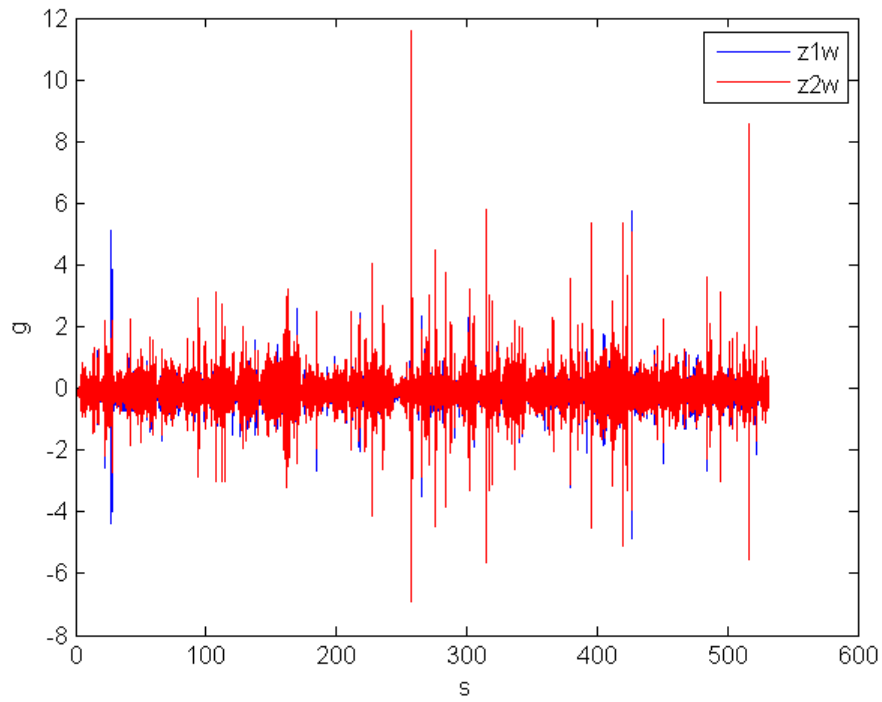


Διάγραμμα 3.3-90: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

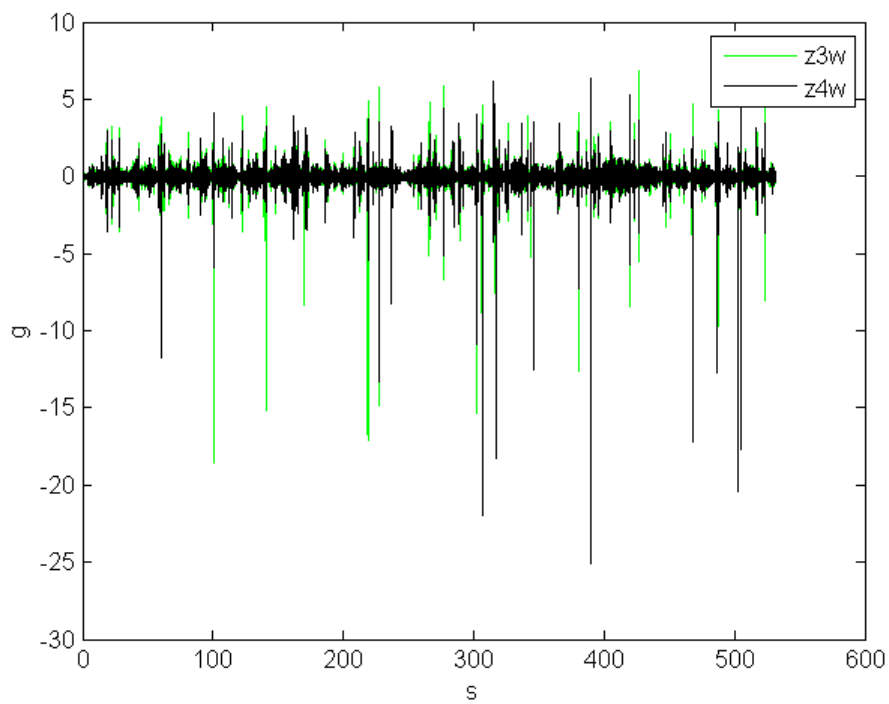
3.3.11 Τεστ 11- Κατηγορία 7



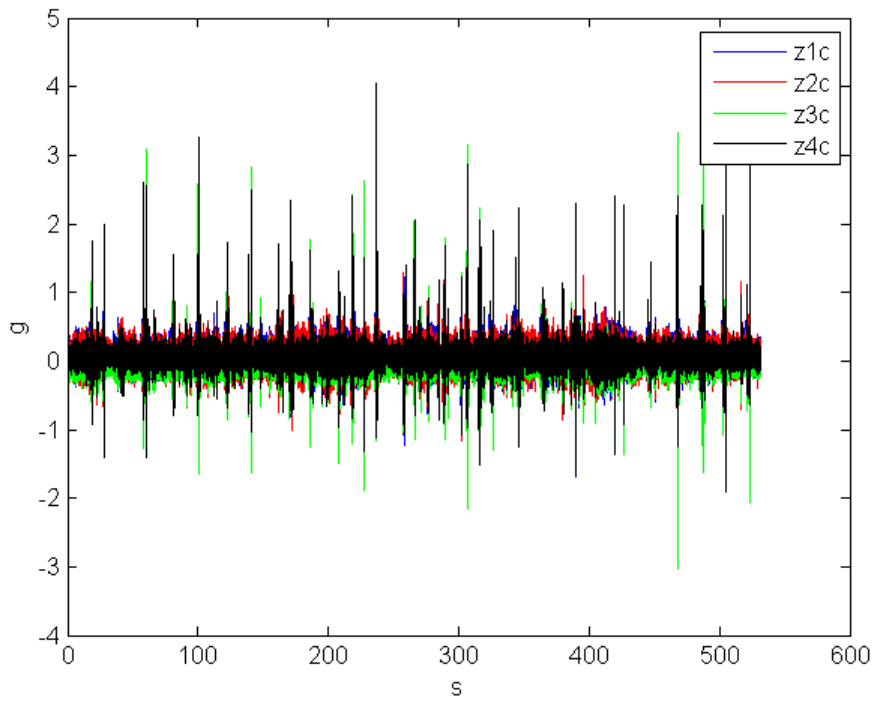
Διάγραμμα 3.3-91: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



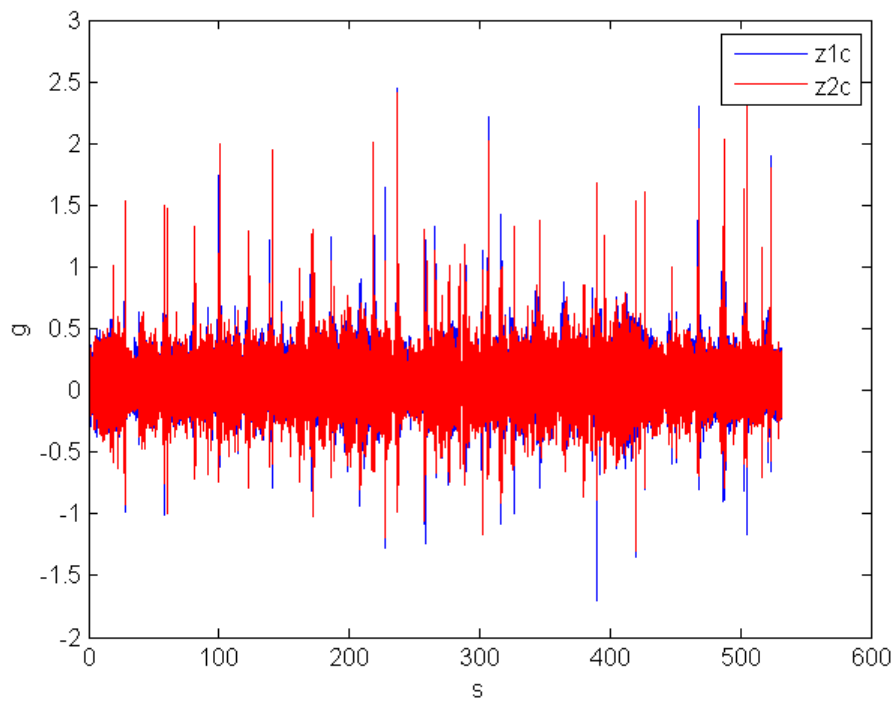
Διάγραμμα 3.3-92: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



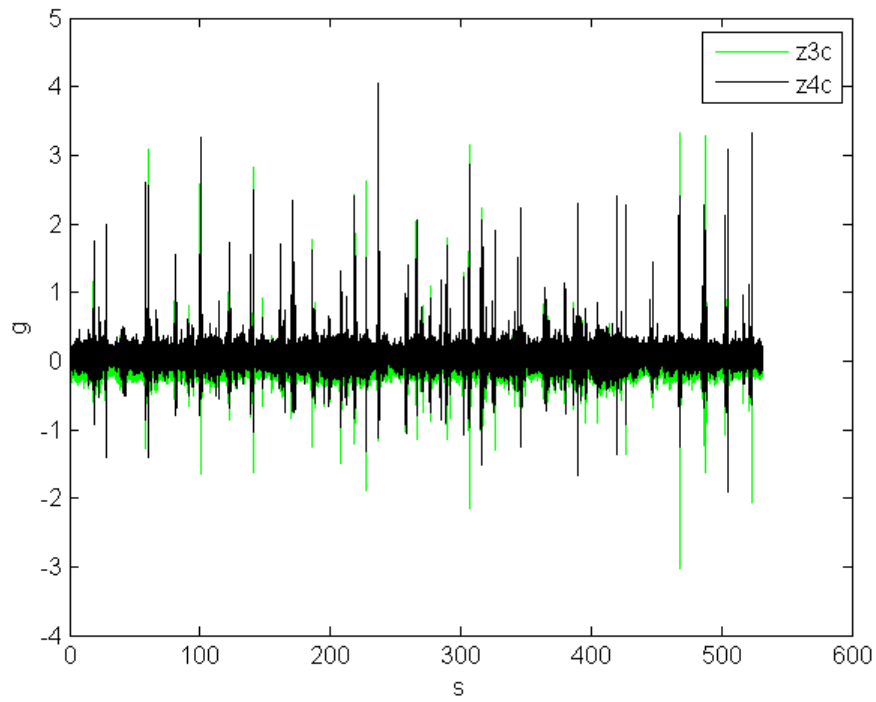
Διάγραμμα 3.3-93: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



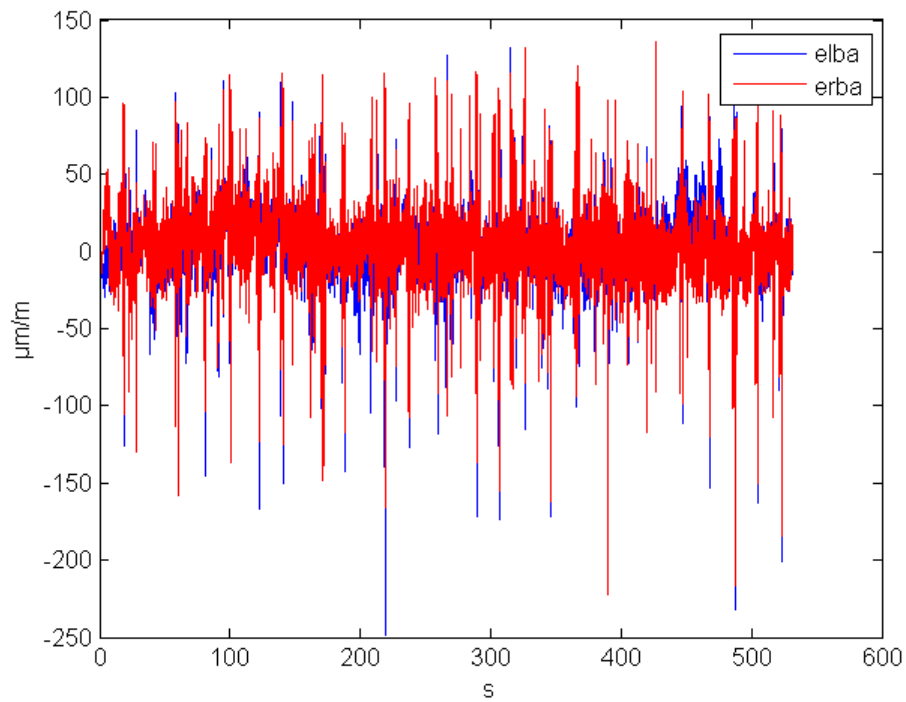
Διάγραμμα 3.3-94: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



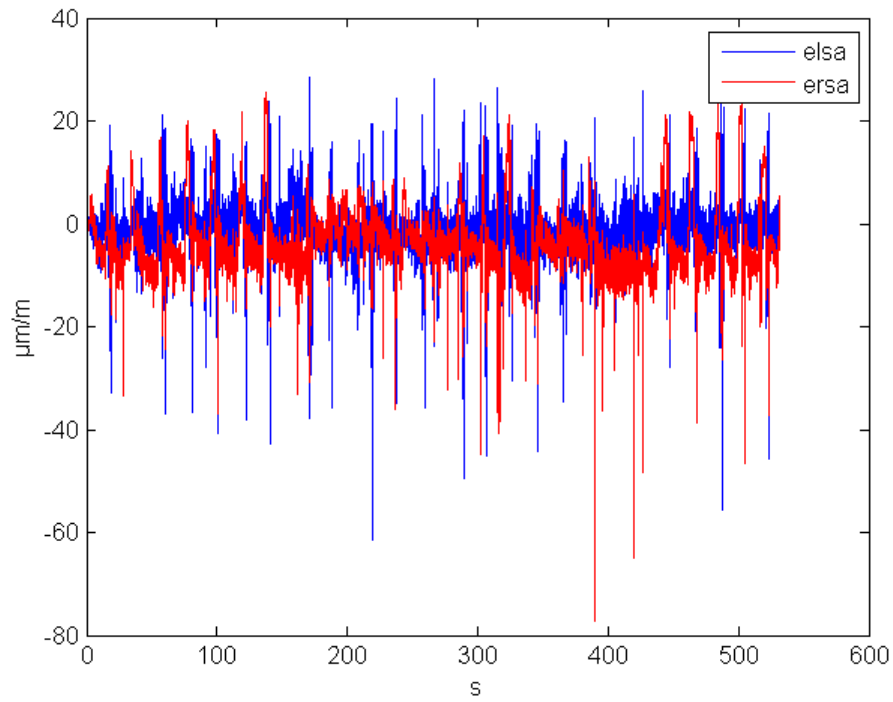
Διάγραμμα 3.3-95: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



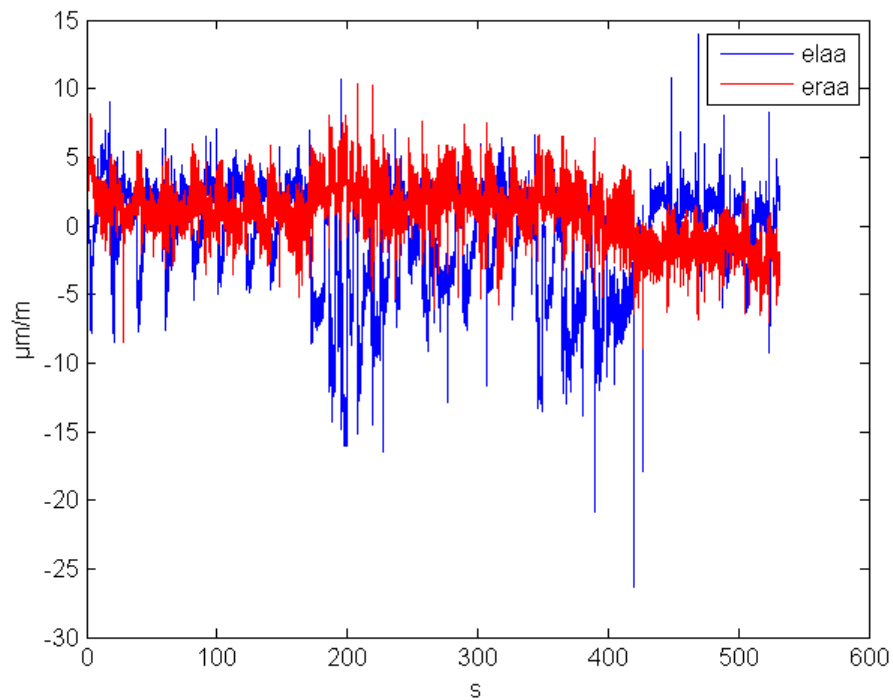
Διάγραμμα 3.3-96: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-97: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

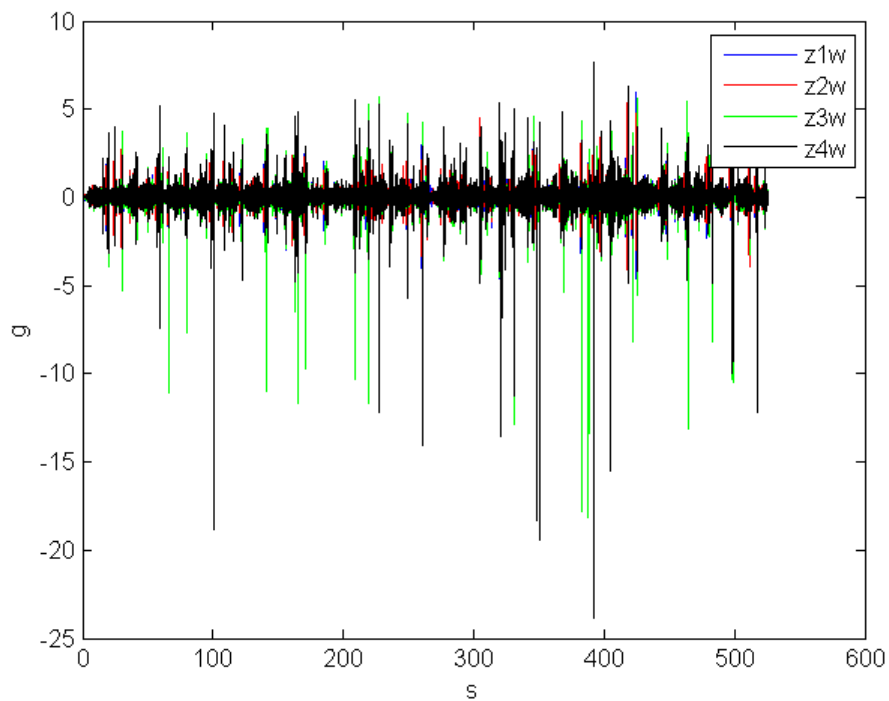


Διάγραμμα 3.3-98: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

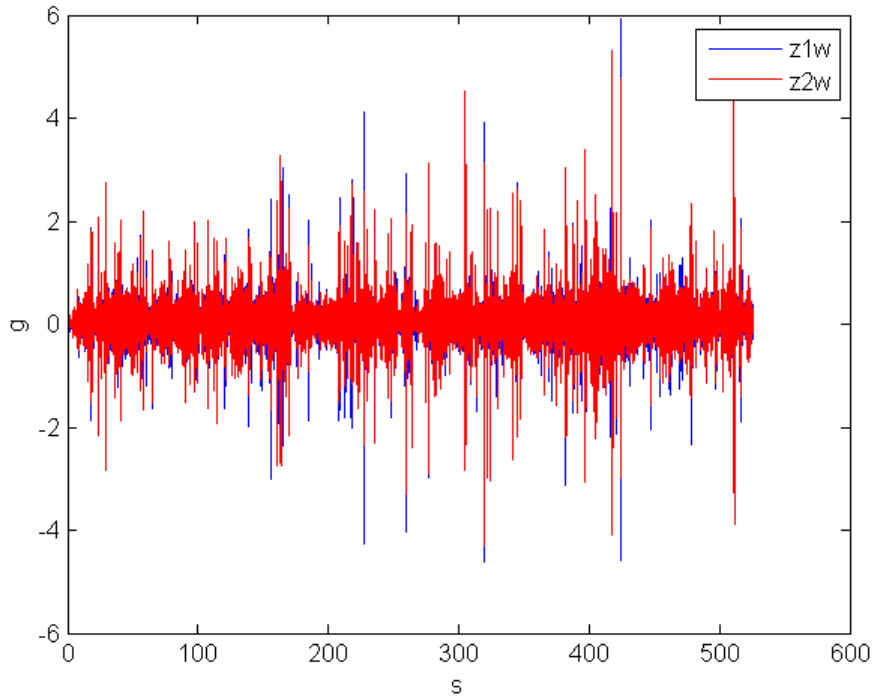


Διάγραμμα 3.3-99: Σύγκριση των Αξονικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

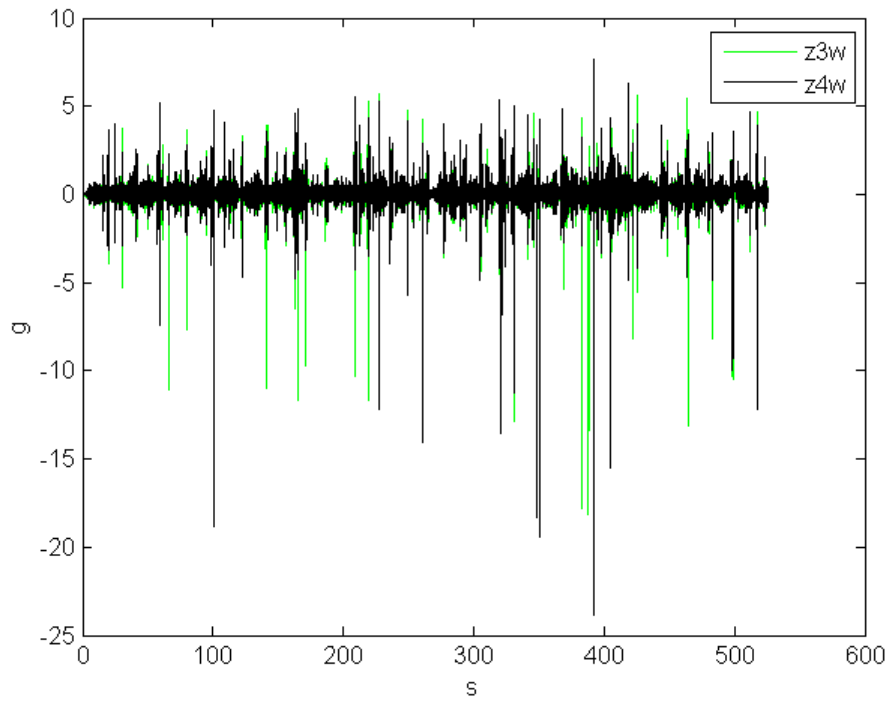
3.3.12 Τεστ 12- Κατηγορία 8



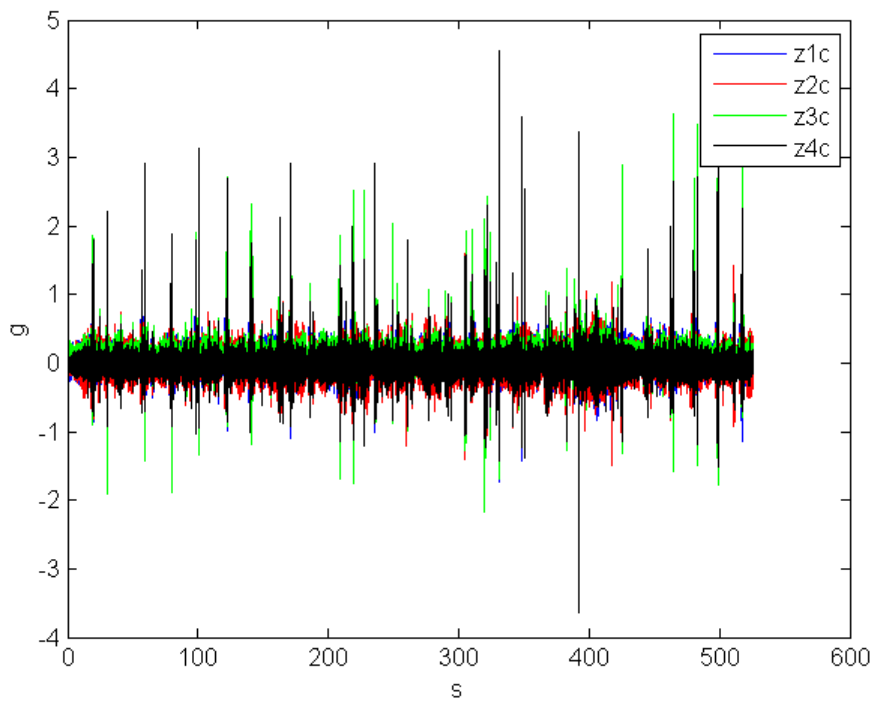
Διάγραμμα 3.3-100: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



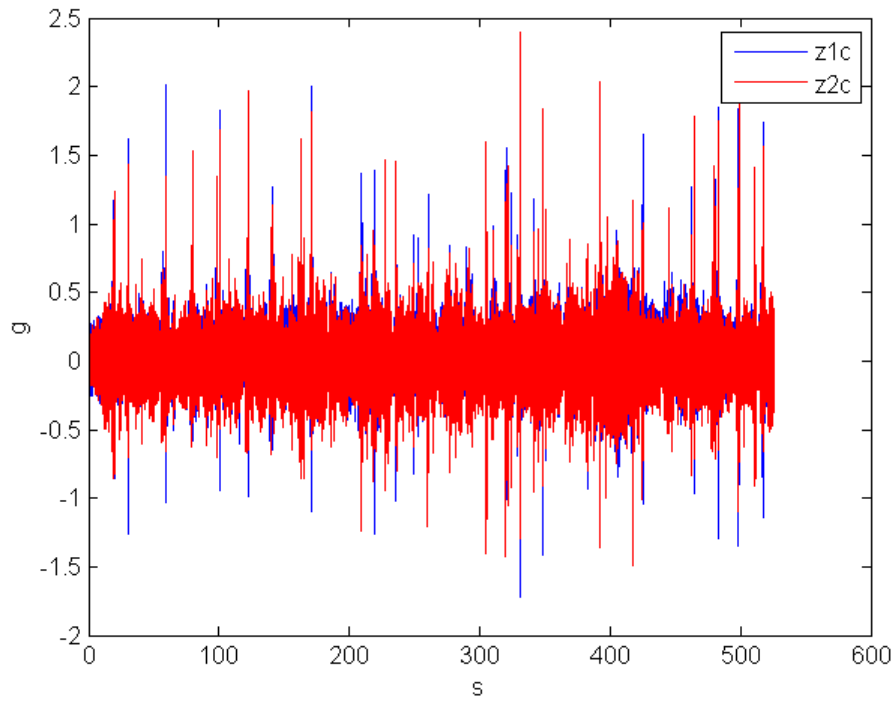
Διάγραμμα 3.3-101: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



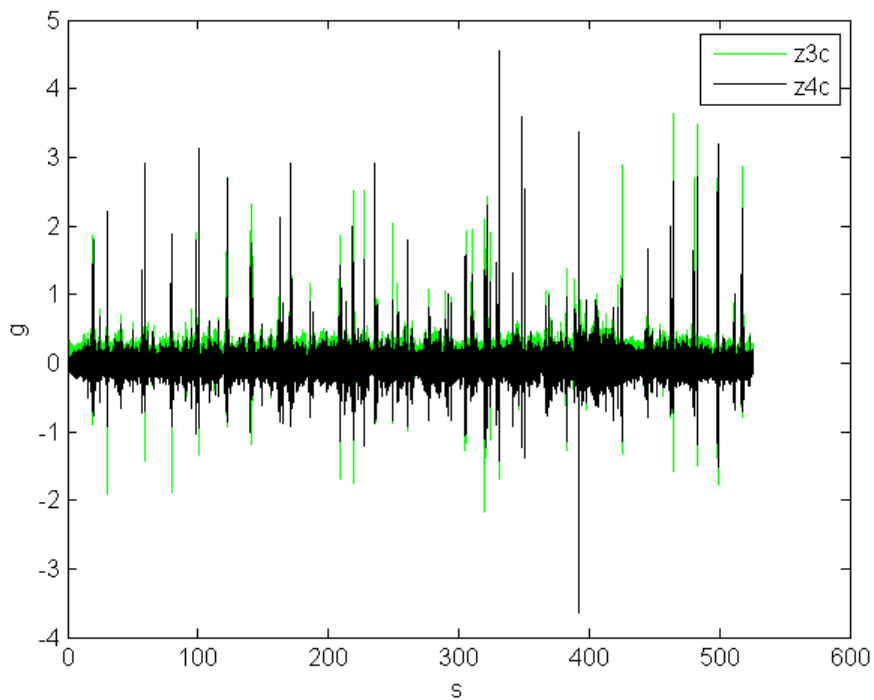
Διάγραμμα 3.3-102: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



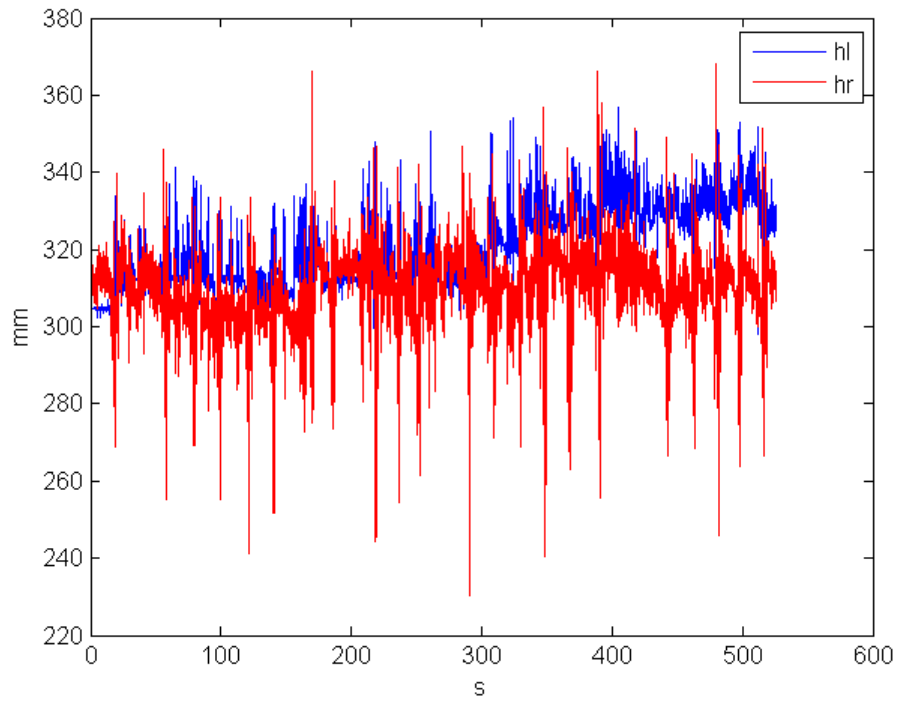
Διάγραμμα 3.3-103: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



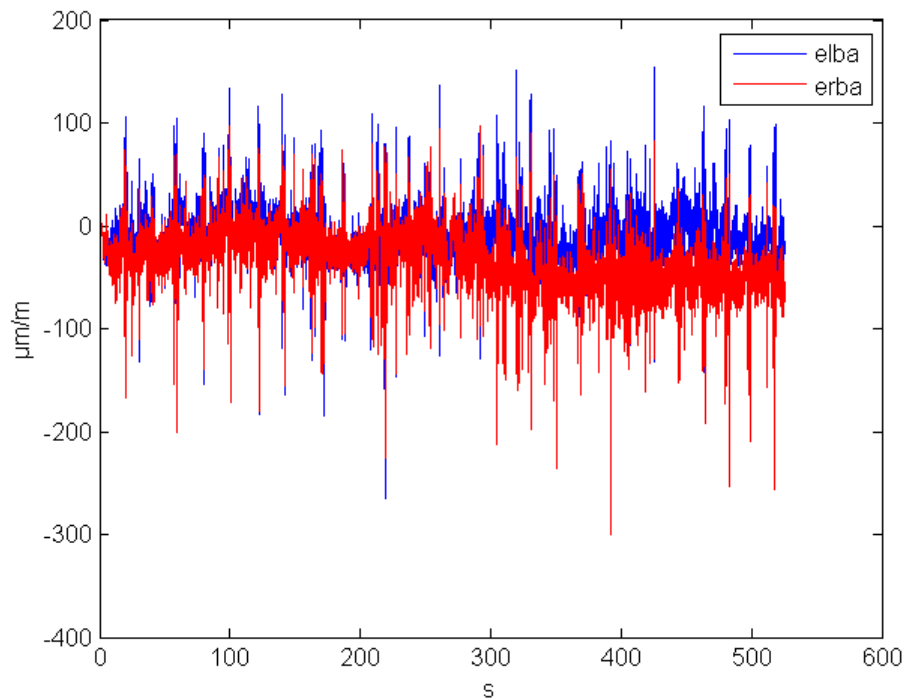
Διάγραμμα 3.3-104: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



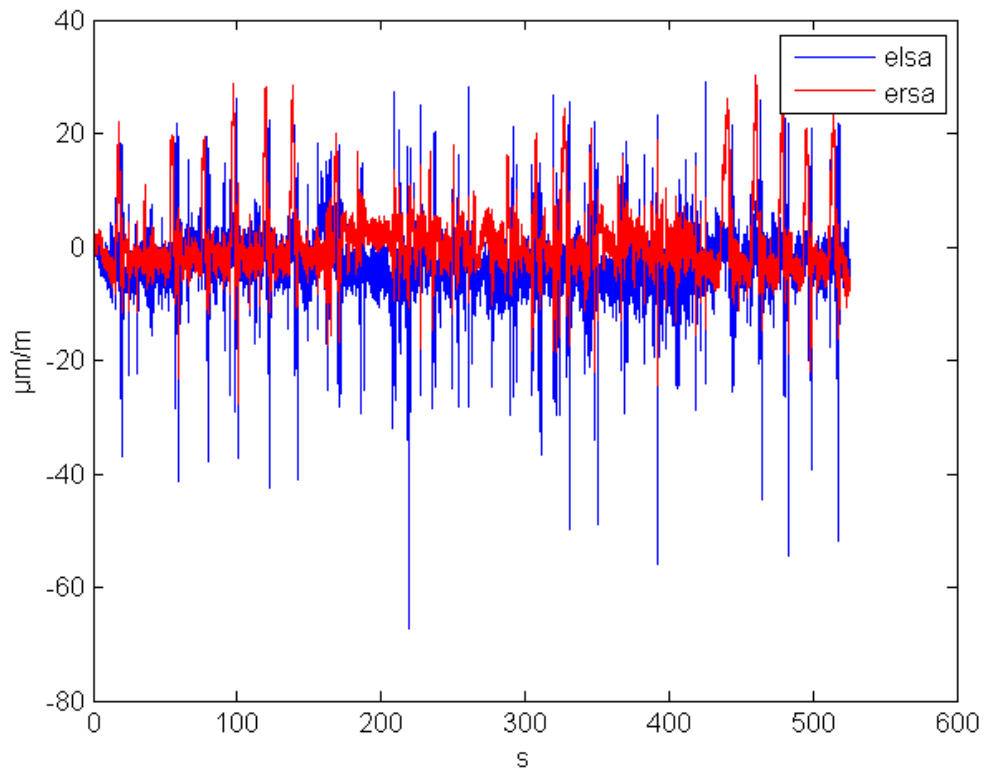
Διάγραμμα 3.3-105: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



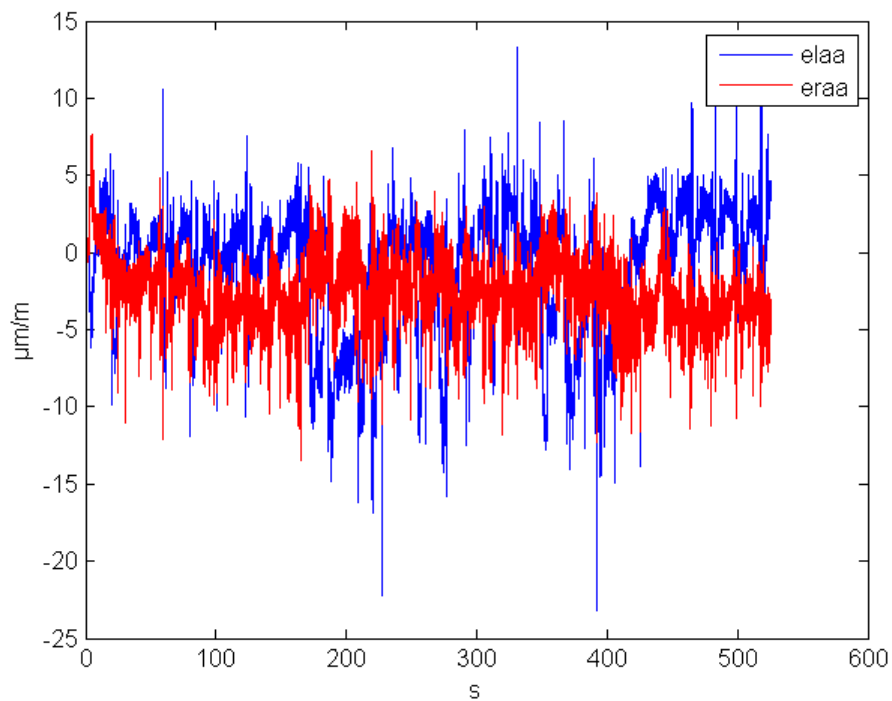
Διάγραμμα 3.3-106: Σύγκριση της Μετατόπισης του Σώματος του Οχήματος από το Έδαφος στις δύο πλευρές



Διάγραμμα 3.3-107: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

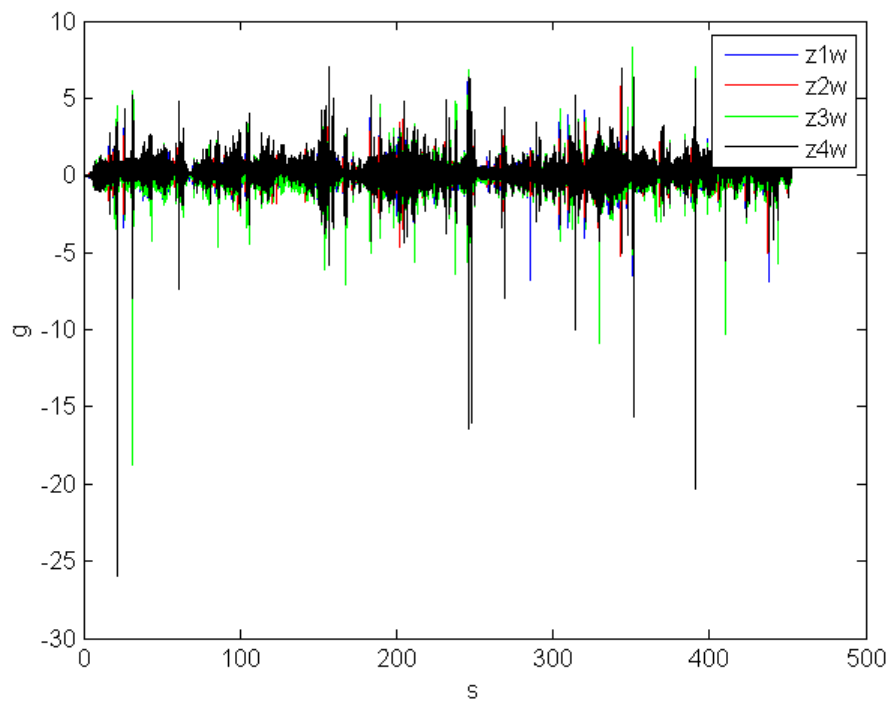


Διάγραμμα 3.3-108: Σύγκριση των Διατμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

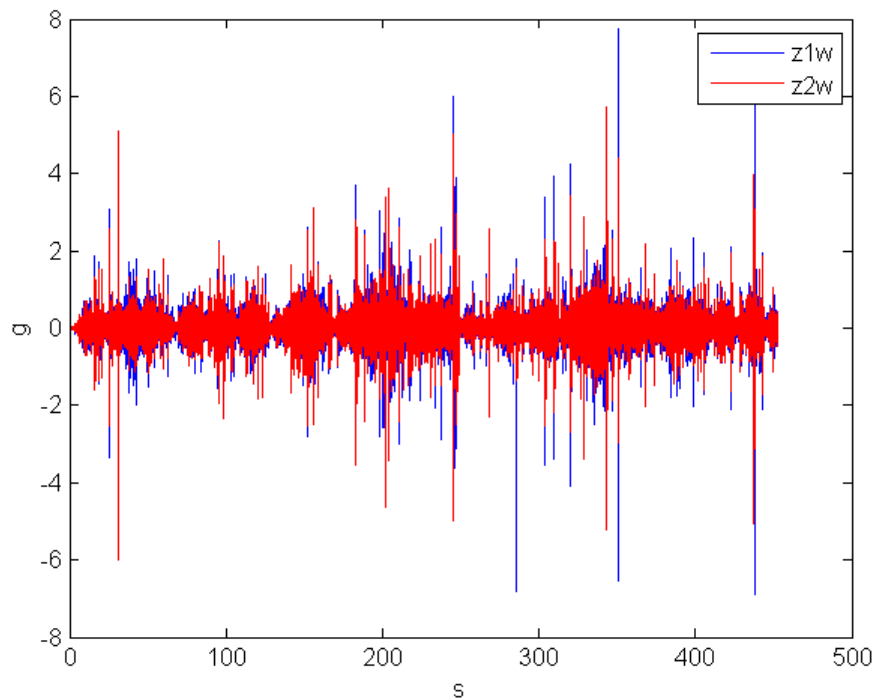


Διάγραμμα 3.3-109: Σύγκριση των Αξονικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

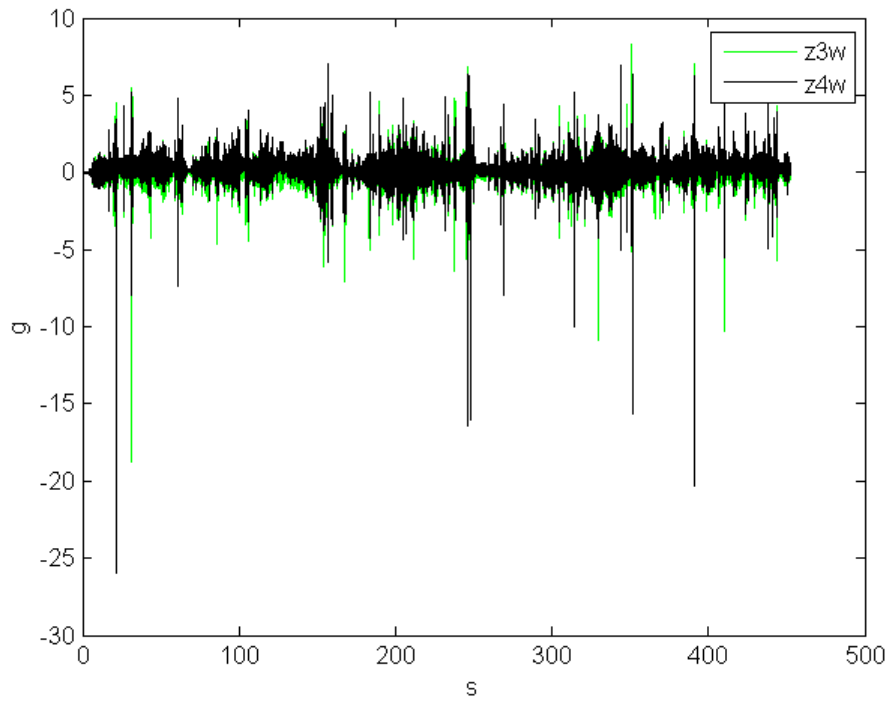
3.3.13 Τεστ 13- Κατηγορία 9



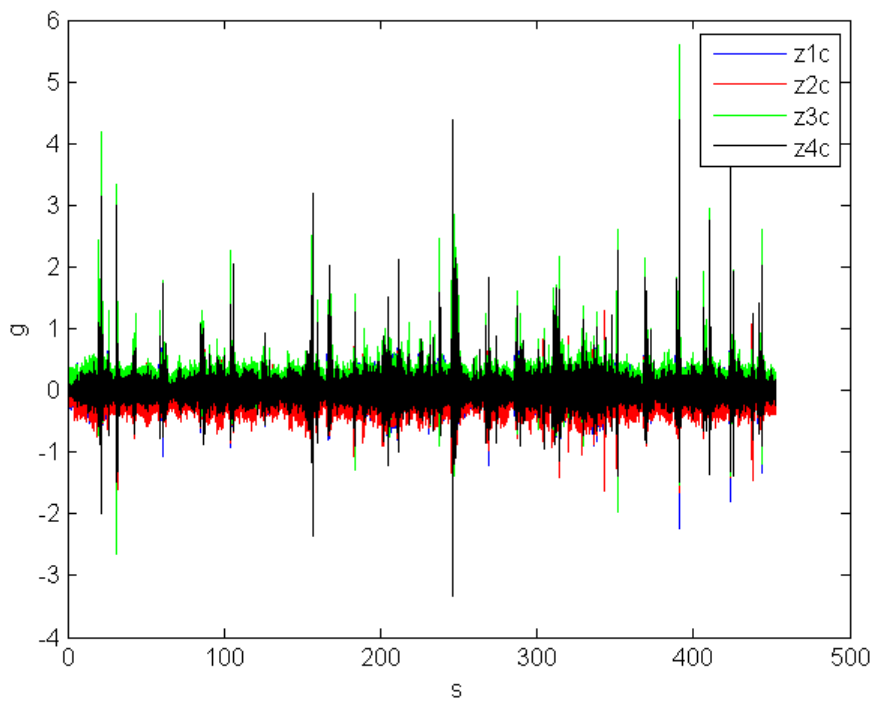
Διάγραμμα 3.3-110: Σύγκριση Κάθετων Επιτάχυνσεων στους Τροχούς



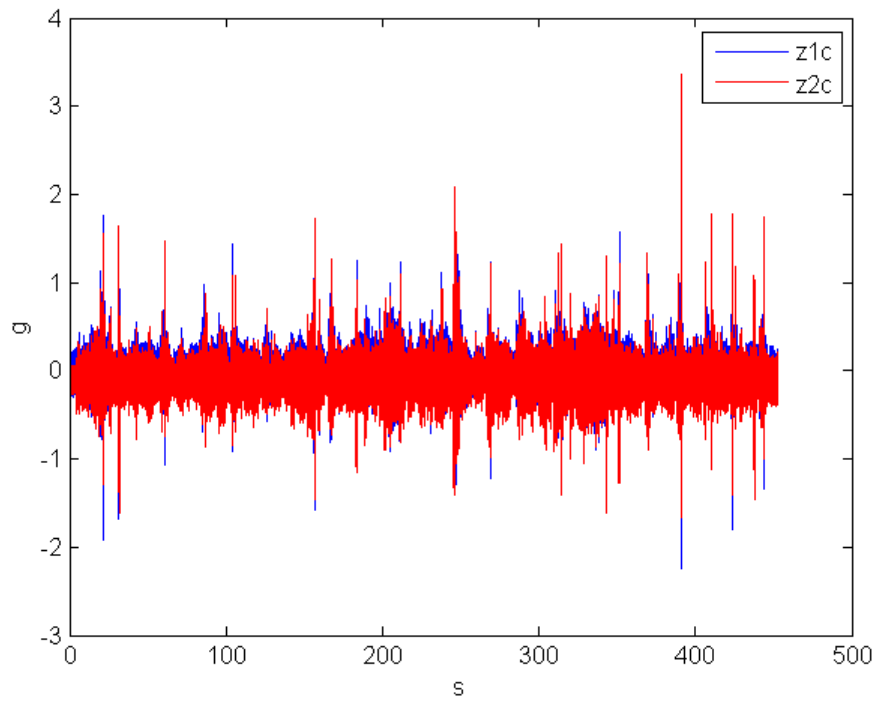
Διάγραμμα 3.3-111: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Εμπρόσθιους Τροχούς



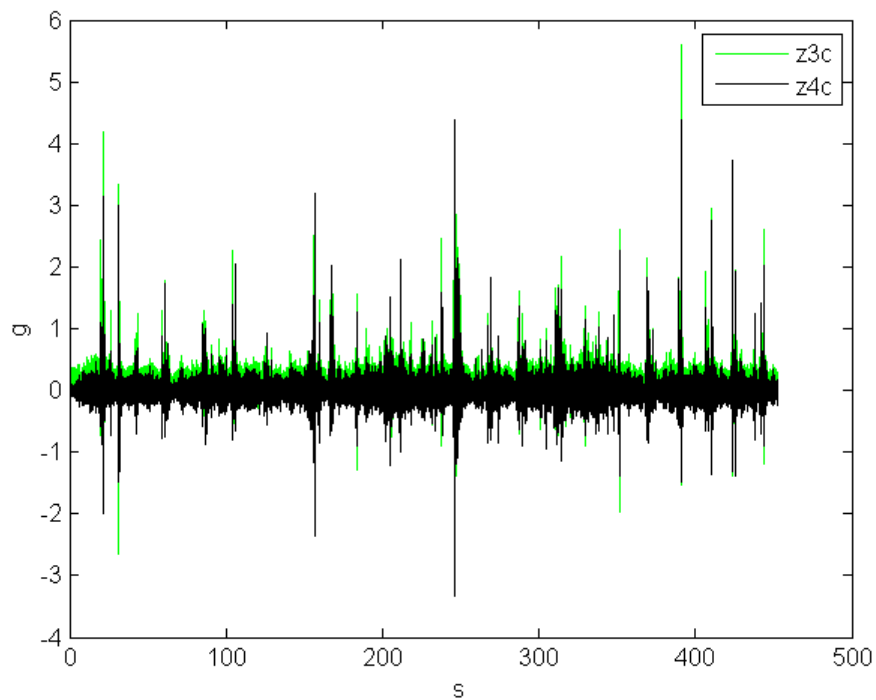
Διάγραμμα 3.3-112: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



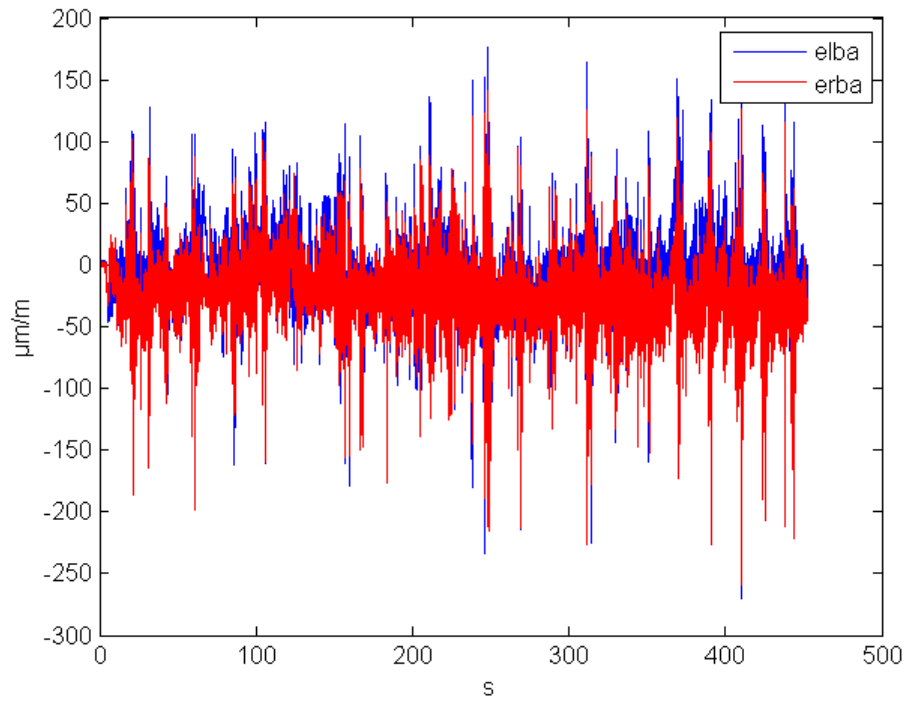
Διάγραμμα 3.3-113: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί



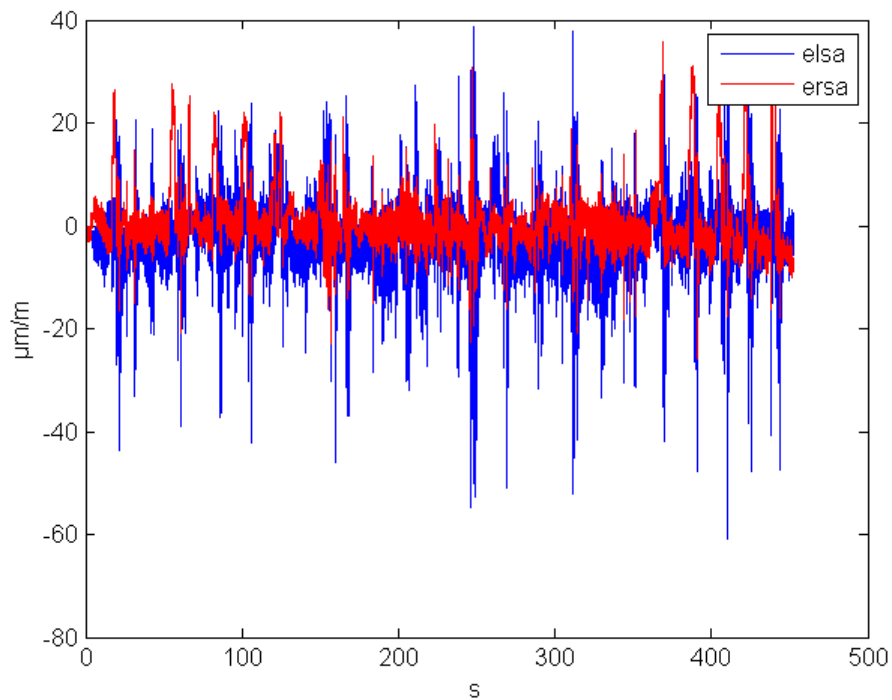
Διάγραμμα 3.3-114: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Εμπρόσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-115: Σύγκριση των Κάθετων Επιταχύνσεων στο Σασσί κατ' αντιστοιχία με τα σημεία τους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-116: Σύγκριση των Καμπτικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 3.3-117: Σύγκριση των Διαμητικών Παραμορφώσεων στους Οπίσθιους Τροχούς

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΥΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΦΟΡΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ

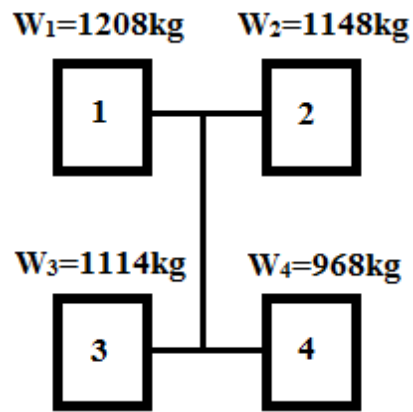
4.1 Εισαγωγή

Το δεύτερο στάδιο ανάλυσης της Μεθόδου Α' είναι η μελέτη των ασκούμενων δυνάμεων στους οπίσθιους ελαστικοφόρους τροχούς που προέκυψαν από τα μετρούμενα μεγέθη και από την θεωρία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 1.2.4.1. Για να κριθεί αν τα αποτελέσματα ήταν αξιόπιστα και να χαρακτηριστεί η πειραματική διαδικασία επιτυχής, μελετήθηκε η γραμμική συσχέτιση των δυνάμεων και στους δύο ελαστικοφόρους τροχούς με τις αντίστοιχες κάθετες επιταχύνσεις τους. Κάθε γραμμική συσχέτιση έπρεπε να επαληθεύει τον 2^ο Νόμο του Νεύτωνα. Συγκεκριμένα, έπρεπε σ' όλα τα επιμέρους τεστ τα αποτελέσματα που προέκυψαν, να ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση:

$$y = m_{Resulted} x + error \quad (1)$$

Όπου η $m_{Resulted}$ είναι η μάζα του τμήματος του οχήματος όπως φαίνεται στην 1.4-1. και θα προκύψει με τους υπολογισμούς από τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη για την υλοποίηση της μεθόδου, δηλαδή τις διατμητικές παραμορφώσεις και τις κάθετες επιταχύνσεις των οπίσθιων τροχών. Η σύγκριση της θα γινόταν με την στατική μάζα η οποία έχει υπολογιστεί μέσω μετρήσεων όπου το όχημα είχε τοποθετηθεί πάνω σε κατάλληλες ζυγαριές. Στην συνέχεια για να προσδιοριστεί ο βαθμός ως προς τον οποίο «συσχετιζόντουσαν» τα δεδομένα, υπολογιζόταν ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης για το γραμμικό μοντέλο που προέκυπτε για κάθε τροχό. Συνοψίζοντας λοιπόν, τα βασικά κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για να ελεγχθεί η αξιοπιστία της μεθόδου και της πειραματικής διαδικασίας γενικότερα είναι:

- Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R.
- Η προκύπτουσα μάζα $m_{Resulted}$ να είναι περίπου ίση με την m_{Static} .
- Τα γραμμικά μοντέλα συσχέτισης.
- Η σύγκριση των ασκούμενων δυνάμεων μεταξύ των δυο τροχών.

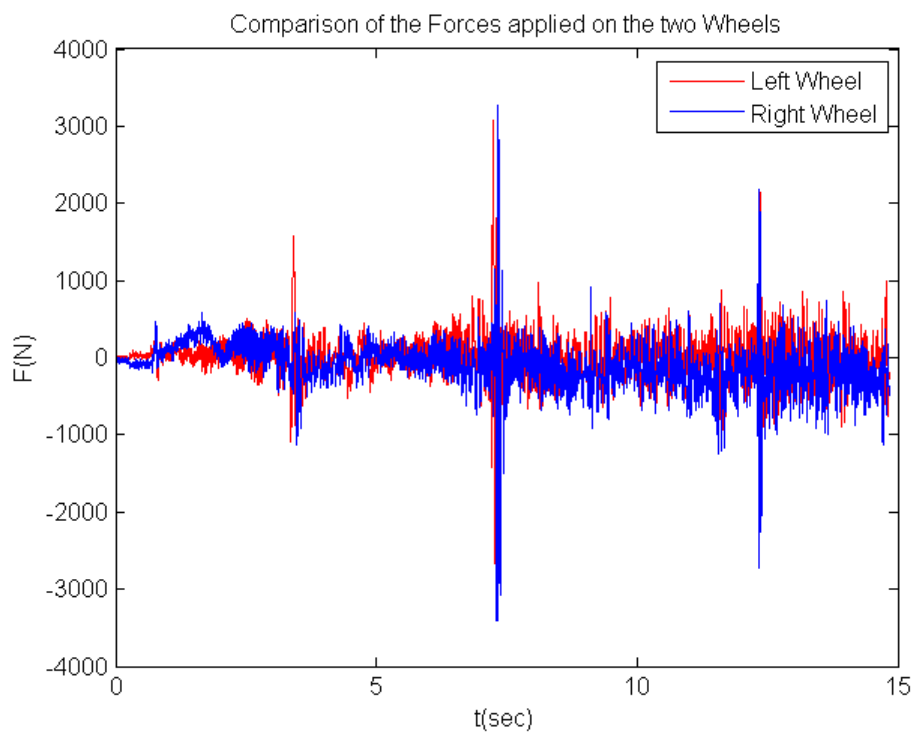


Εικόνα 4.1-1: Κατανομή Μάζας Οχήματος

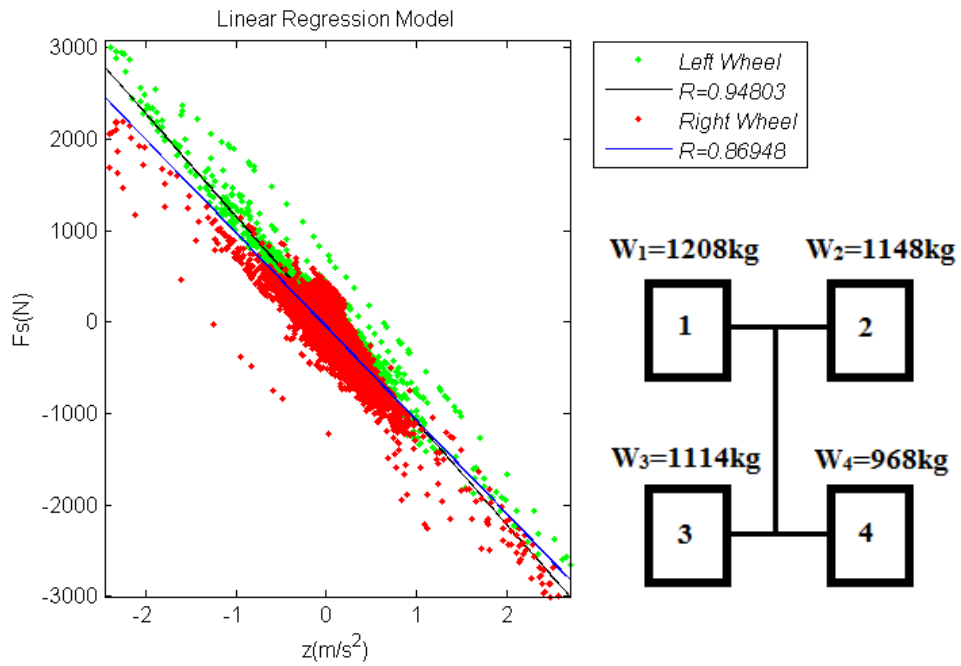
4.2 Αποτελέσματα Δυνάμεων

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των ασκούμενων δυνάμεων στους δύο τροχούς και τα γραμμικά μοντέλα που προέκυψαν.

4.2.1 Τεστ 1- Επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.2-1: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



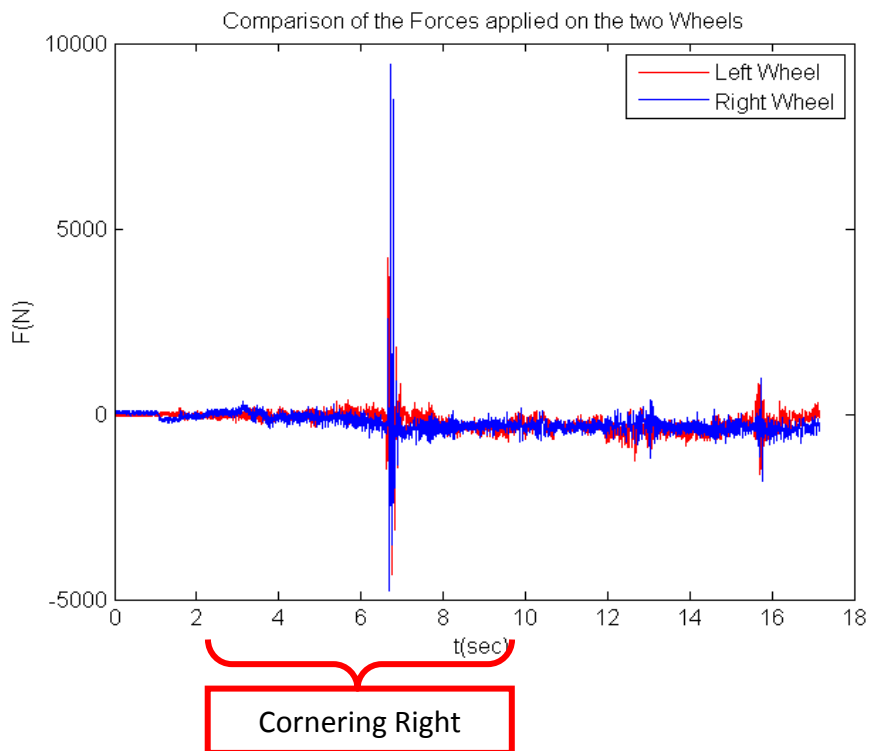
Διάγραμμα 4.2-2: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-2(α) είναι:

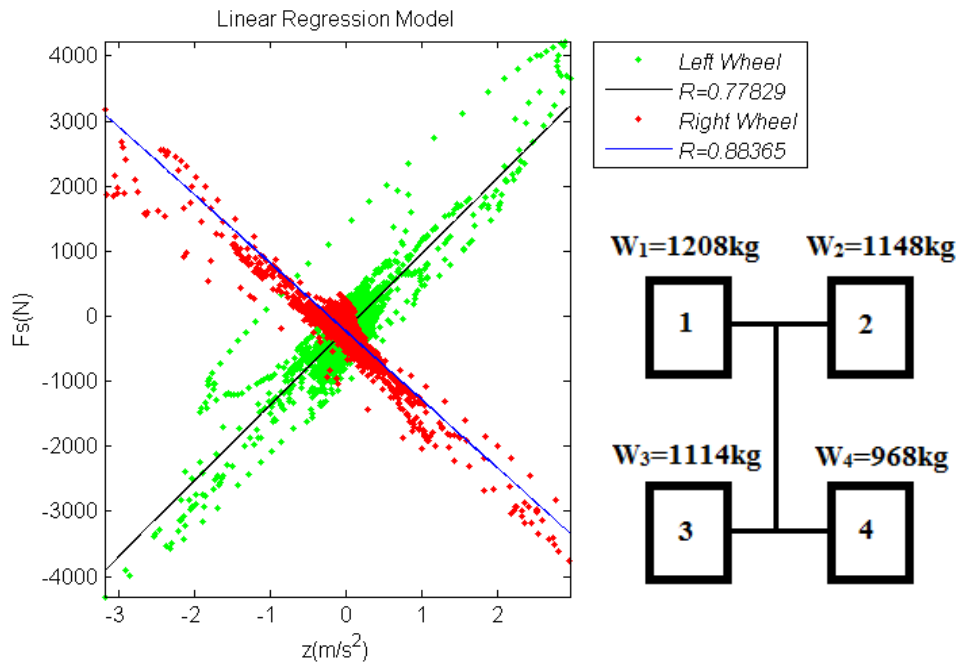
$$y_L = -1122x + 30.50 \tag{2}$$

$$y_R = -1022x - 49.92 \tag{3}$$

4.2.2 Τεστ 2- Δεξιάς Στροφής



Διάγραμμα 4.2-3: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



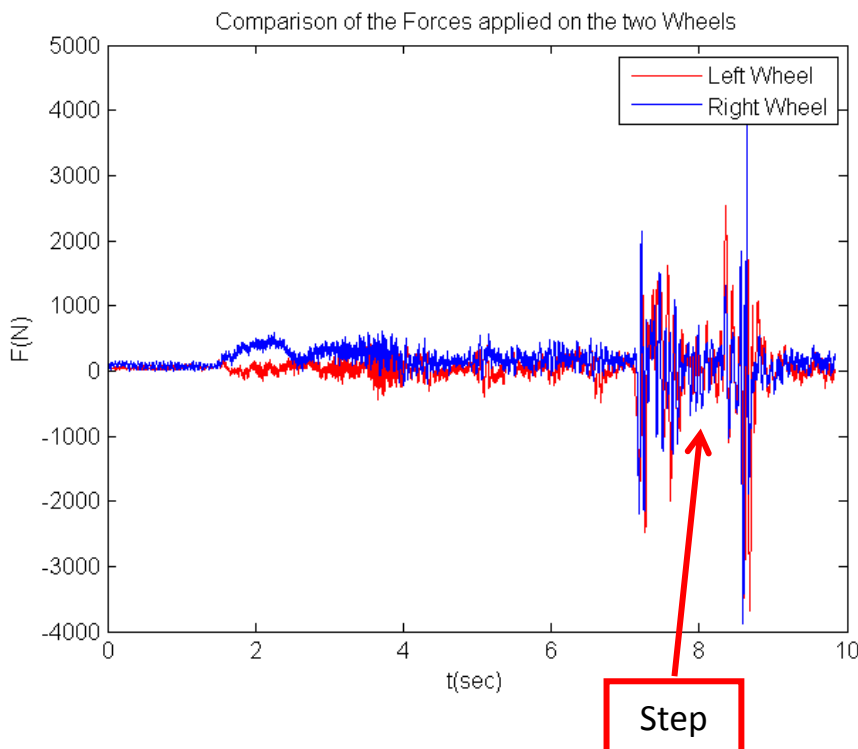
Διάγραμμα 4.2-4: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-4(α) είναι:

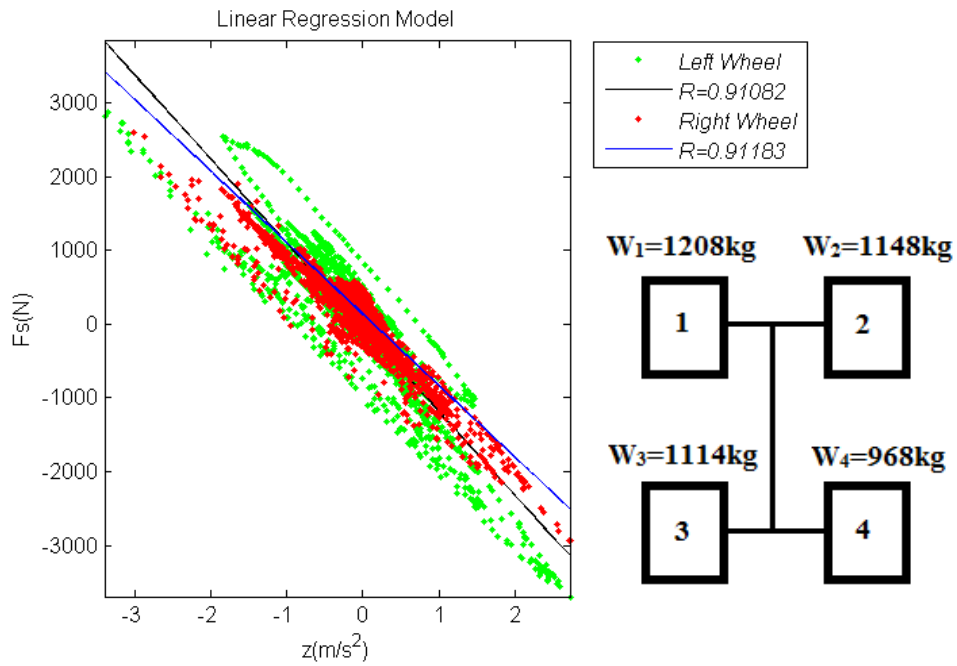
$$y_L = 1162x - 188.65 \tag{4}$$

$$y_R = -1049x - 239.54 \tag{5}$$

4.2.3 Τεστ 3- Βηματική Διέγερση



Διάγραμμα 4.2-5: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



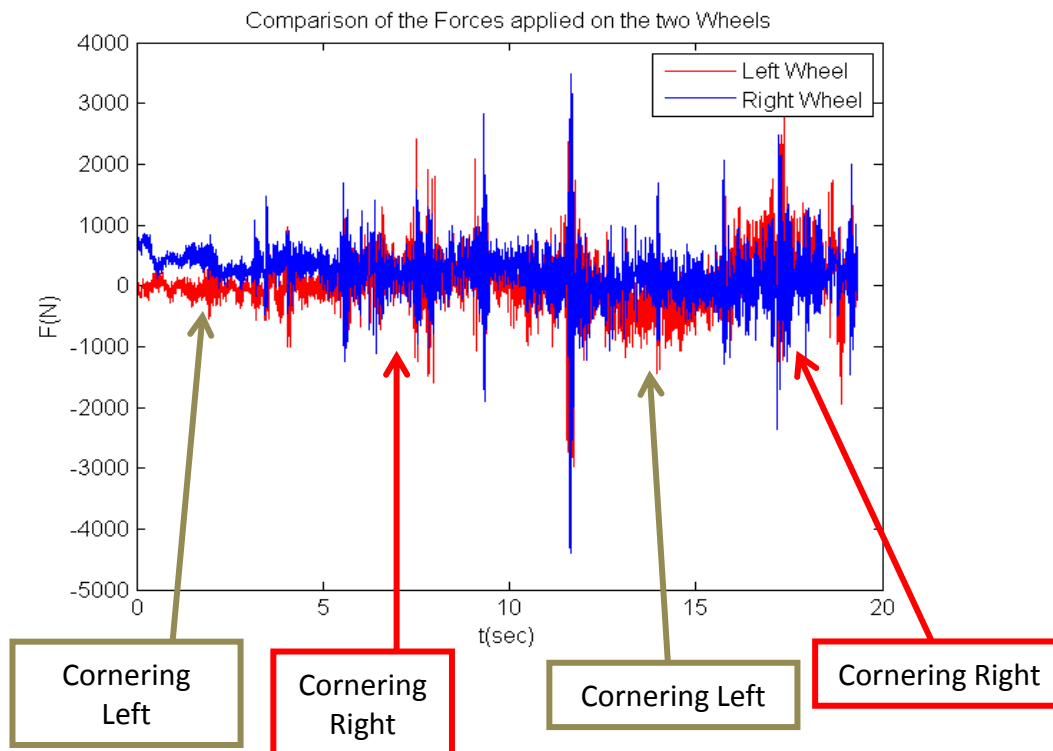
Διάγραμμα 4.2-6: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-6(α) είναι:

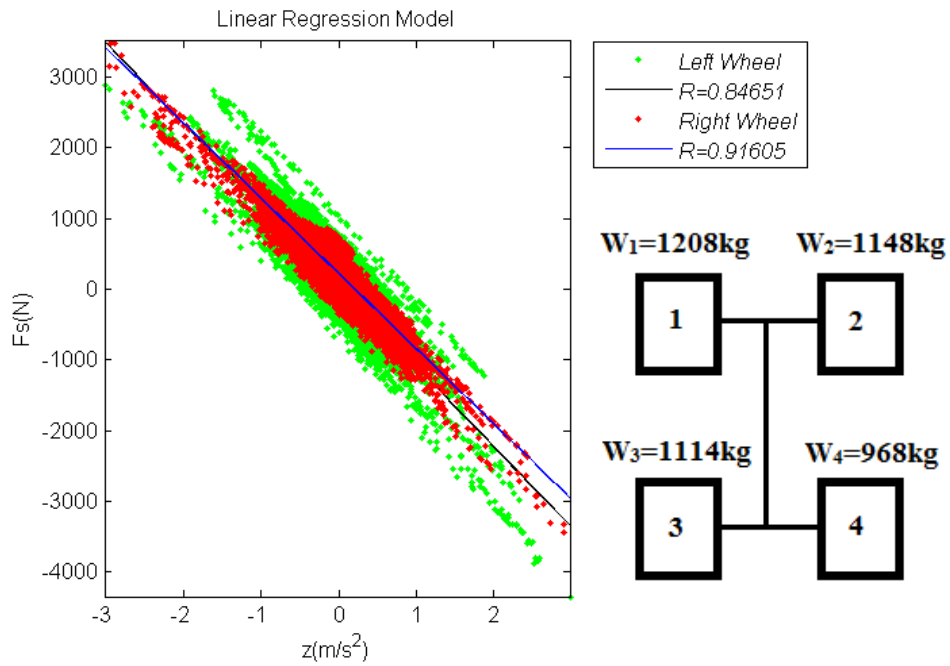
$$y_L = -1136x - 39.75 \tag{6}$$

$$y_R = -966x + 136.75 \tag{7}$$

4.2.4 Τεστ 4- Δρόμος με Κλίση



Διάγραμμα 4.2-7: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



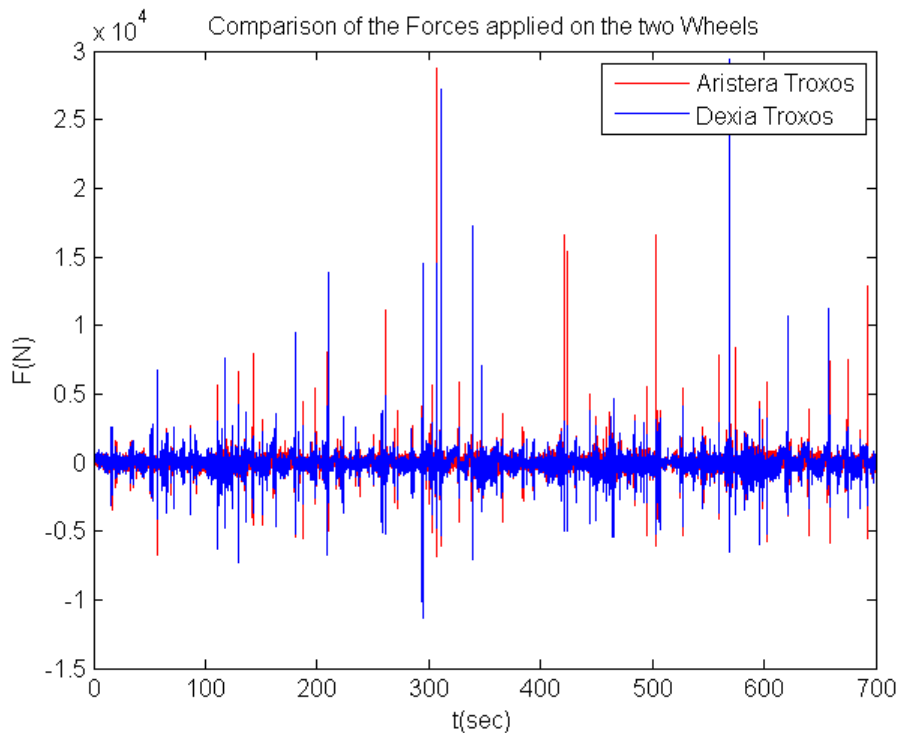
Διάγραμμα 4.2-8: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-8(α) είναι:

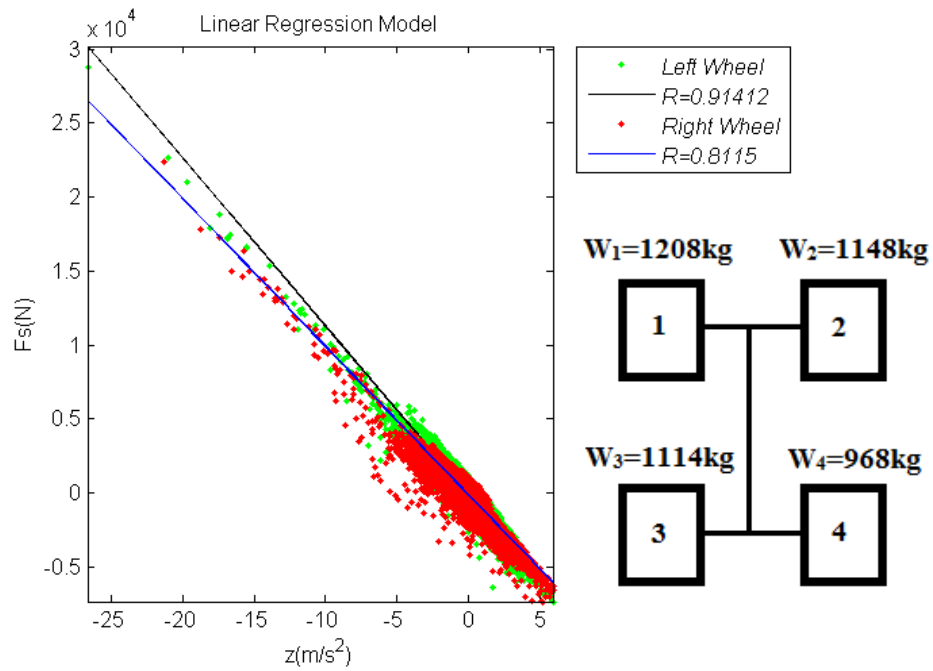
$$y_L = -1145x + 59.89 \tag{8}$$

$$y_R = -1066x + 226.70 \tag{9}$$

4.2.5 Τεστ 5- Κατηγορία 1



Διάγραμμα 4.2-9: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



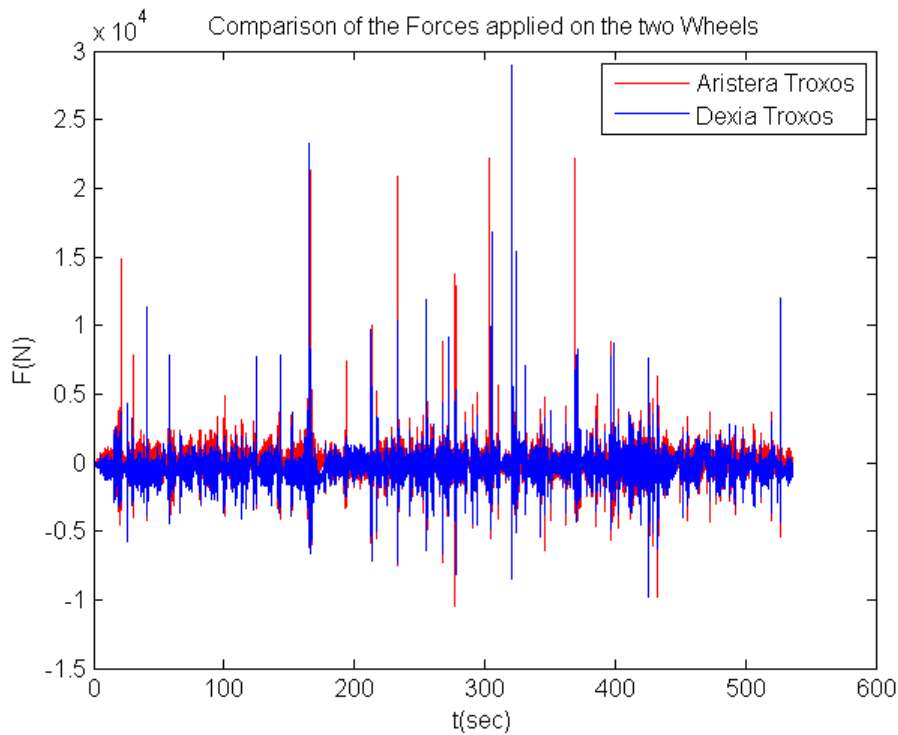
Διάγραμμα 4.2-10: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-10(α) είναι:

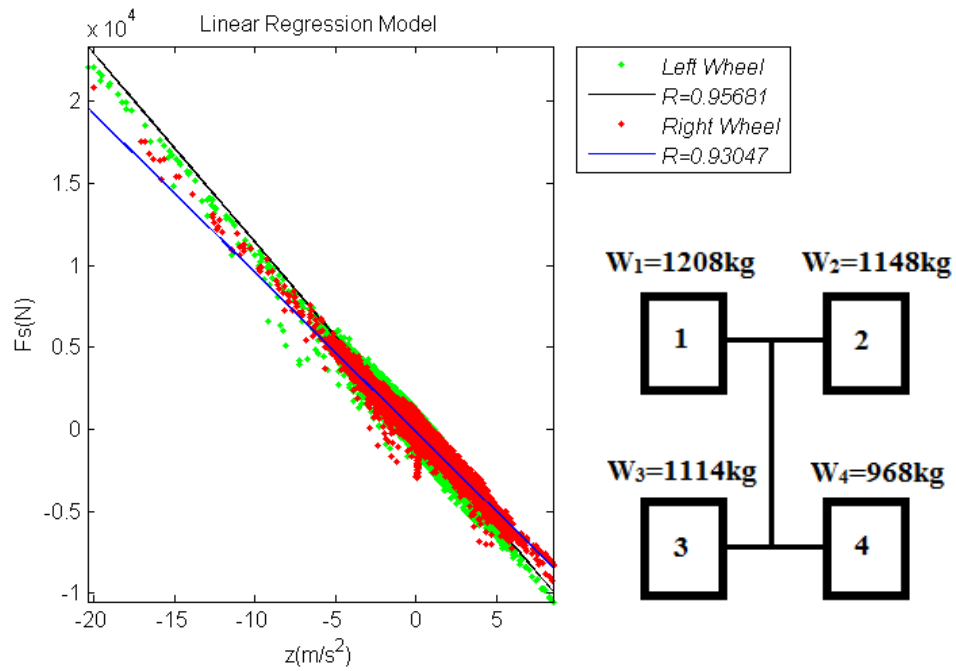
$$y_L = -1133x - 34.96 \tag{10}$$

$$y_R = -998x - 68.10 \tag{11}$$

4.2.6 Τεστ 6- Κατηγορία 2



Διάγραμμα 4.2-11 : Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



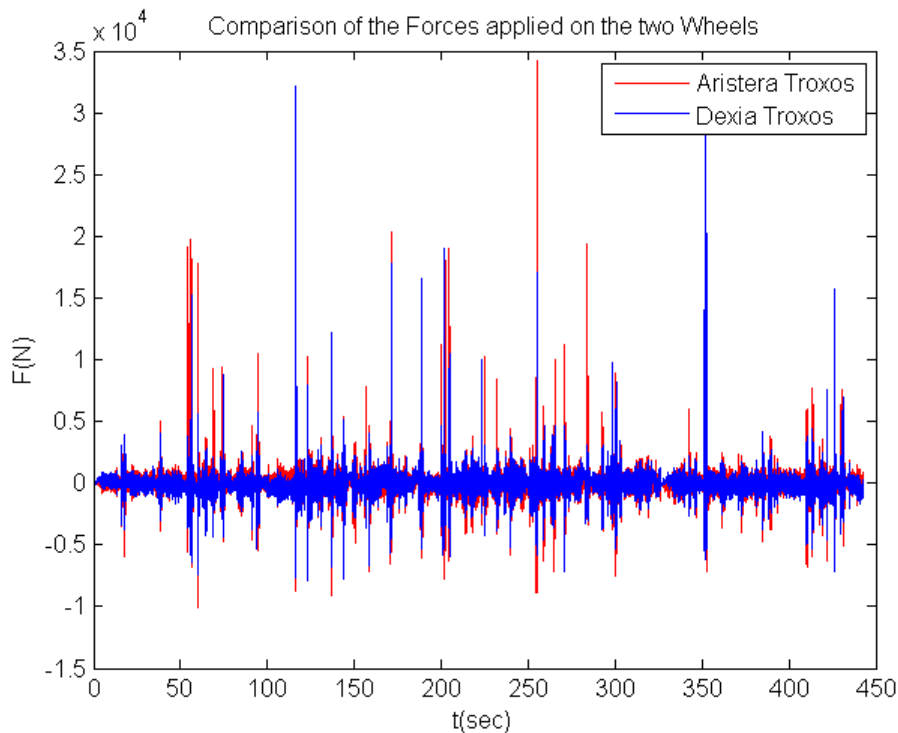
Διάγραμμα 4.2-12: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-12 (α) είναι:

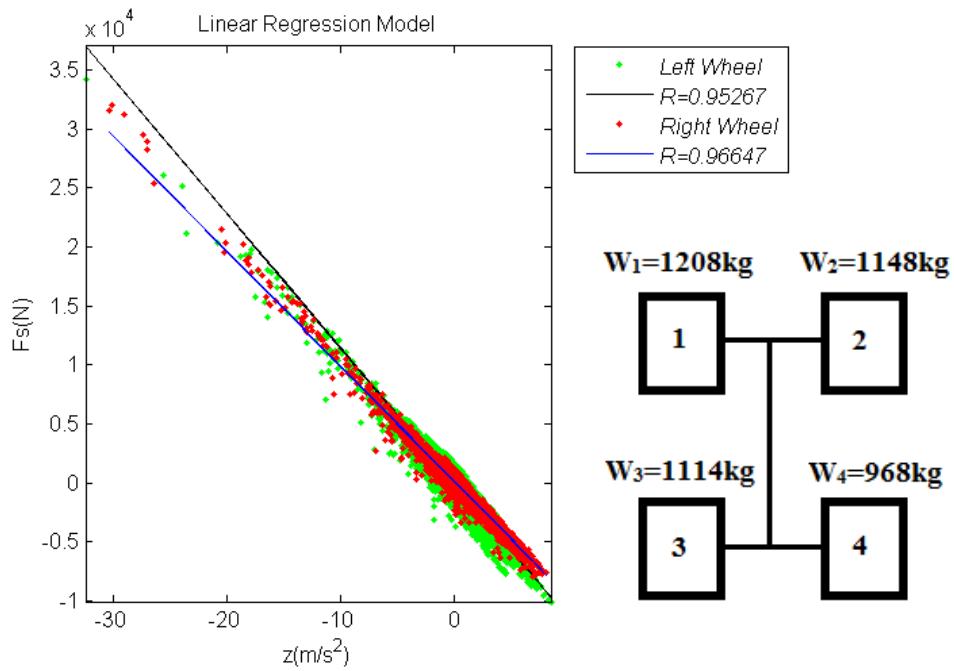
$$y_L = -1149x - 63.78 \tag{12}$$

$$y_R = -970x - 137.30 \tag{13}$$

4.2.7 Τεστ 7- Κατηγορία 3



Διάγραμμα 4.2-13: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



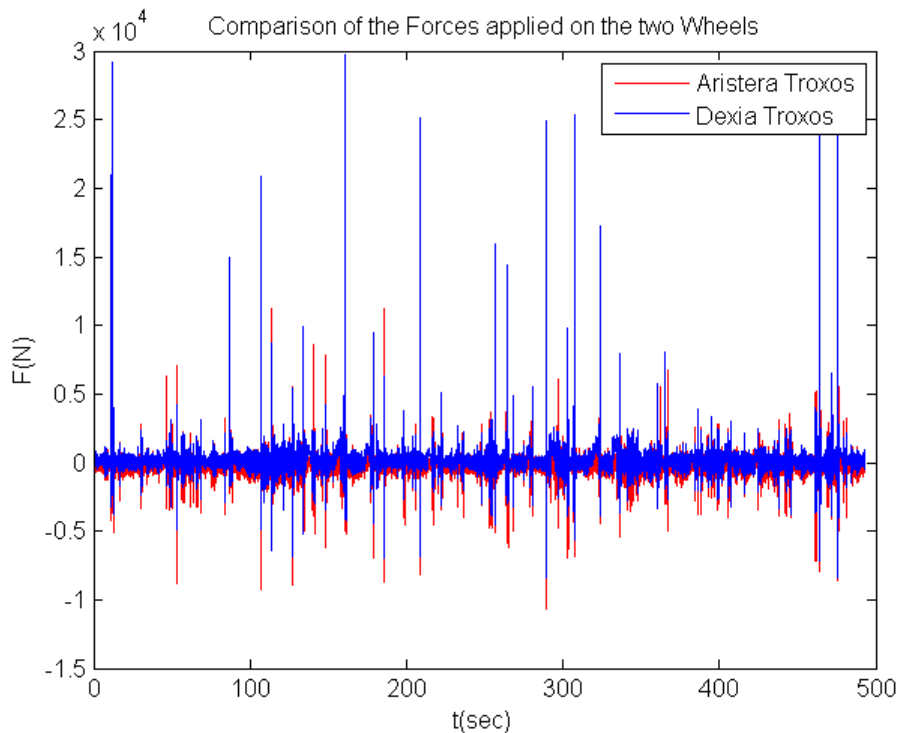
Διάγραμμα 4.2-14: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-14(α) είναι:

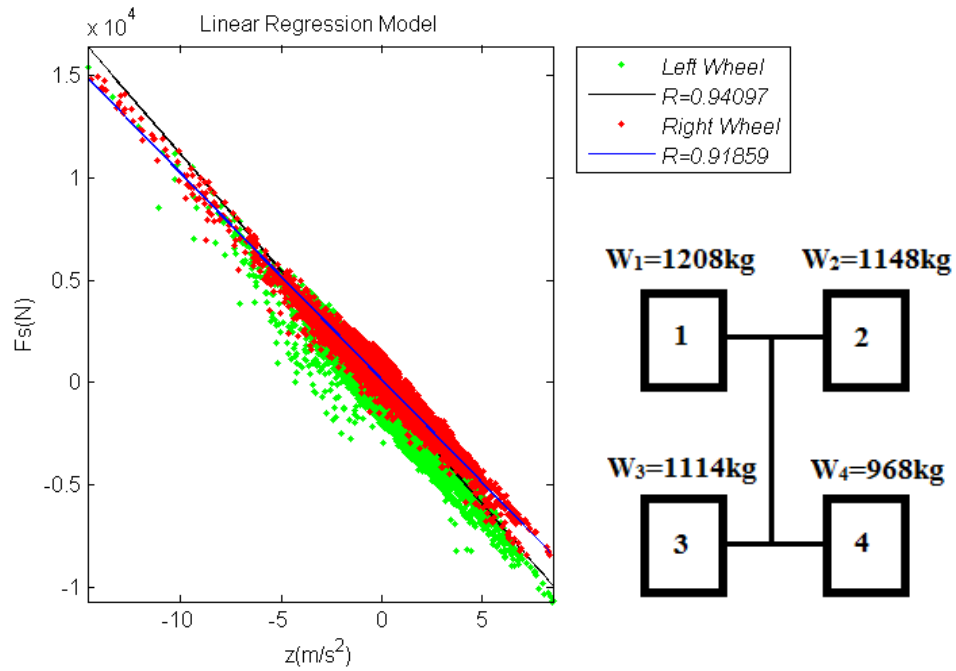
$$y_L = -1141x - 1.14 \tag{14}$$

$$y_R = -975x - 115.30 \tag{15}$$

4.2.8 Τεστ 8- Κατηγορία 4



Διάγραμμα 4.2-15: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



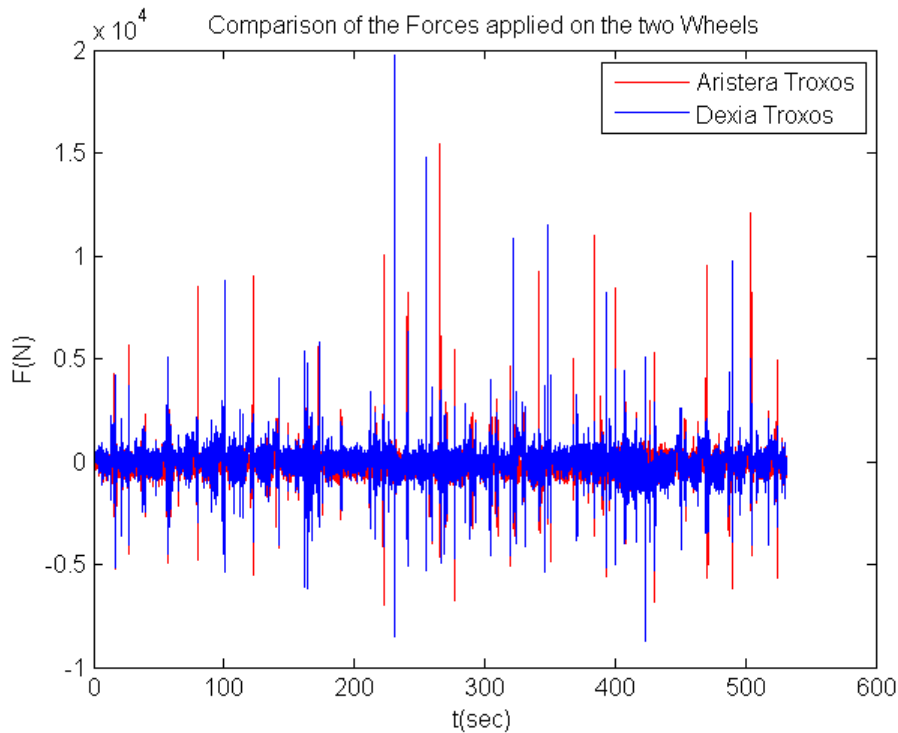
Διάγραμμα 4.2-16: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-16(α) είναι:

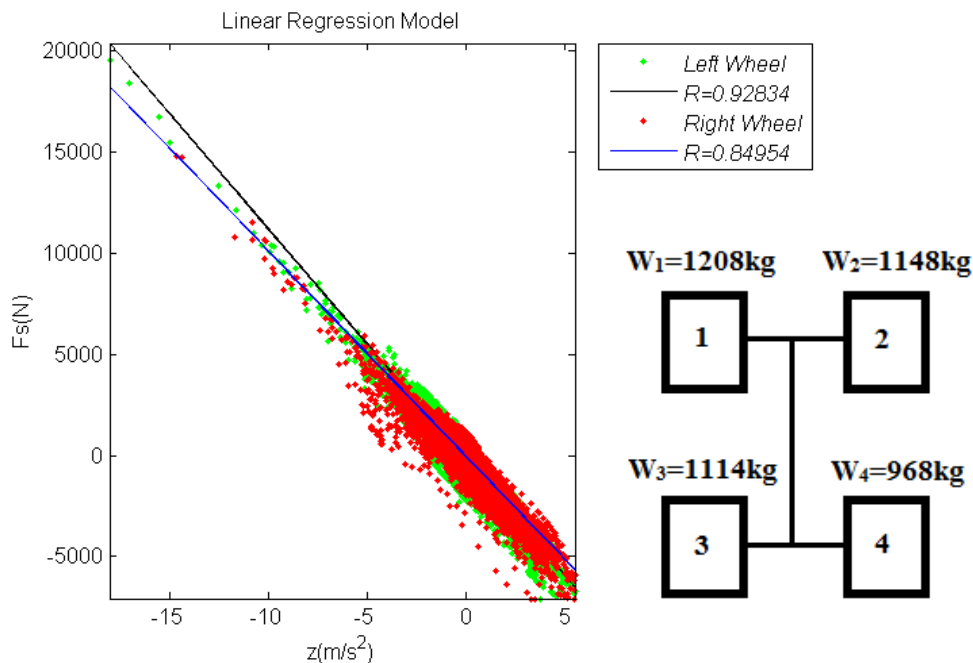
$$y_L = -1137x - 219.24 \tag{16}$$

$$y_R = -1008x - 160.10 \tag{17}$$

4.2.9 Τεστ 9- Κατηγορία 5



Διάγραμμα 4.2-17: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



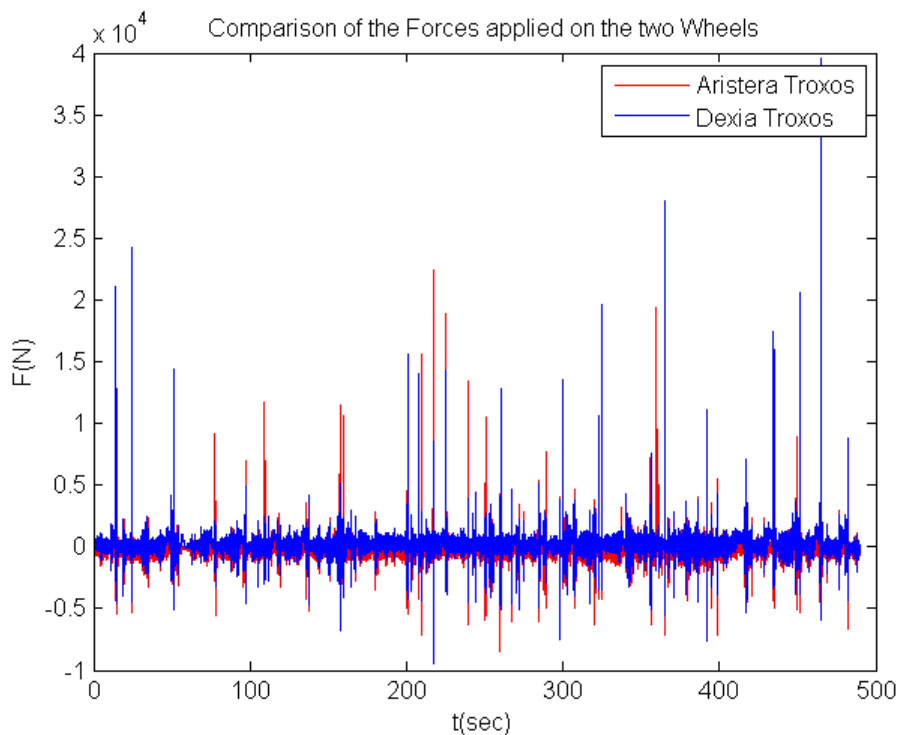
Διάγραμμα 4.2-18: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-18 (α) είναι:

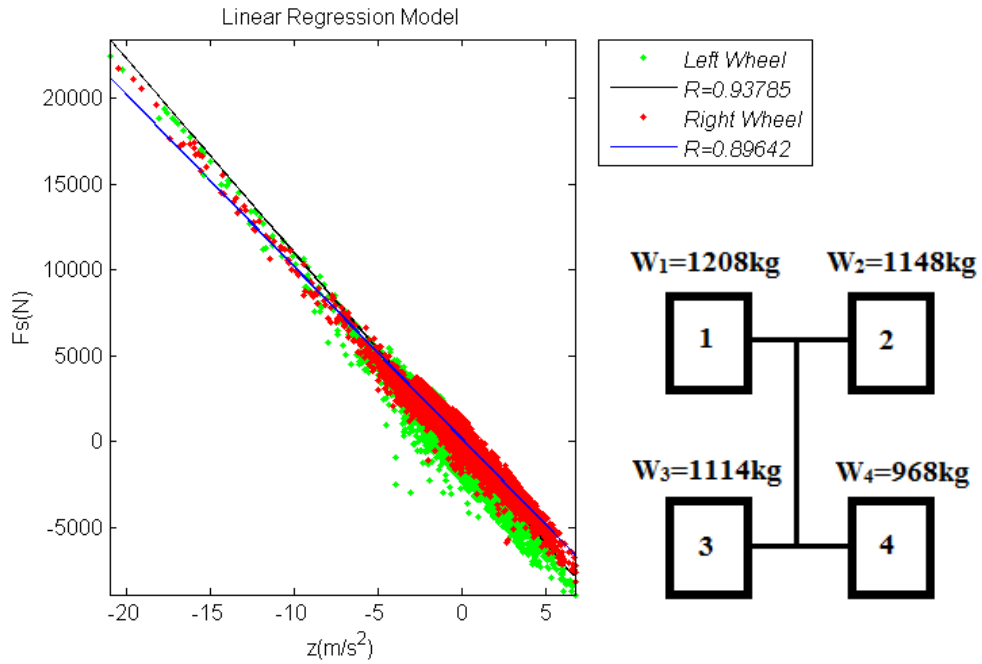
$$y_L = -1138x - 191.10 \tag{18}$$

$$y_R = -1013x - 32.40 \tag{19}$$

4.2.10 Τεστ 10- Κατηγορία 6



Διάγραμμα 4.2-19: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



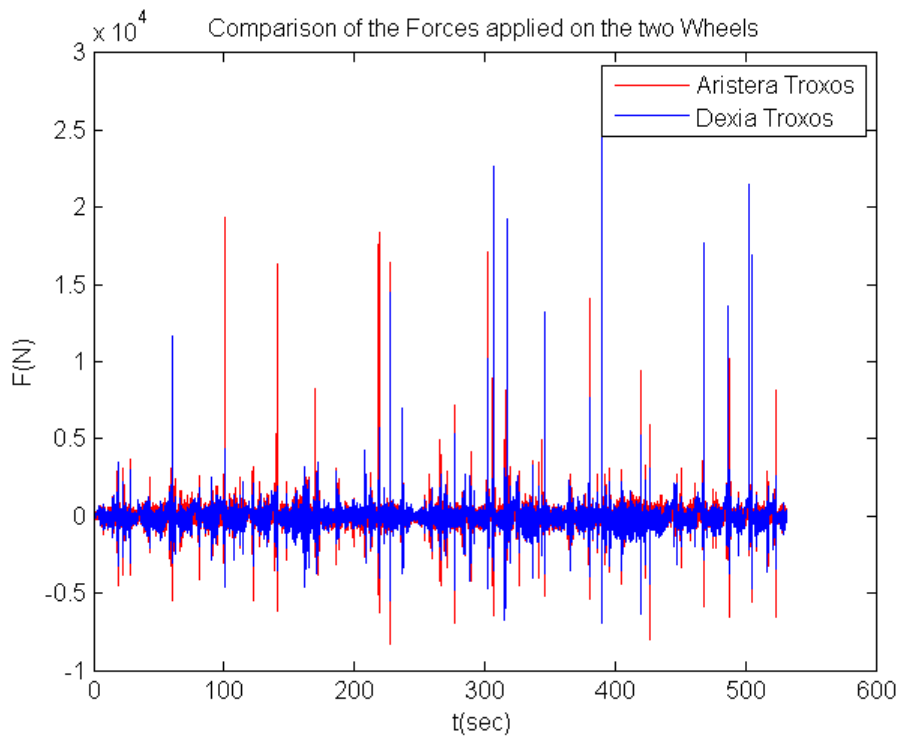
Διάγραμμα 4.2-20: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-20 (α) είναι:

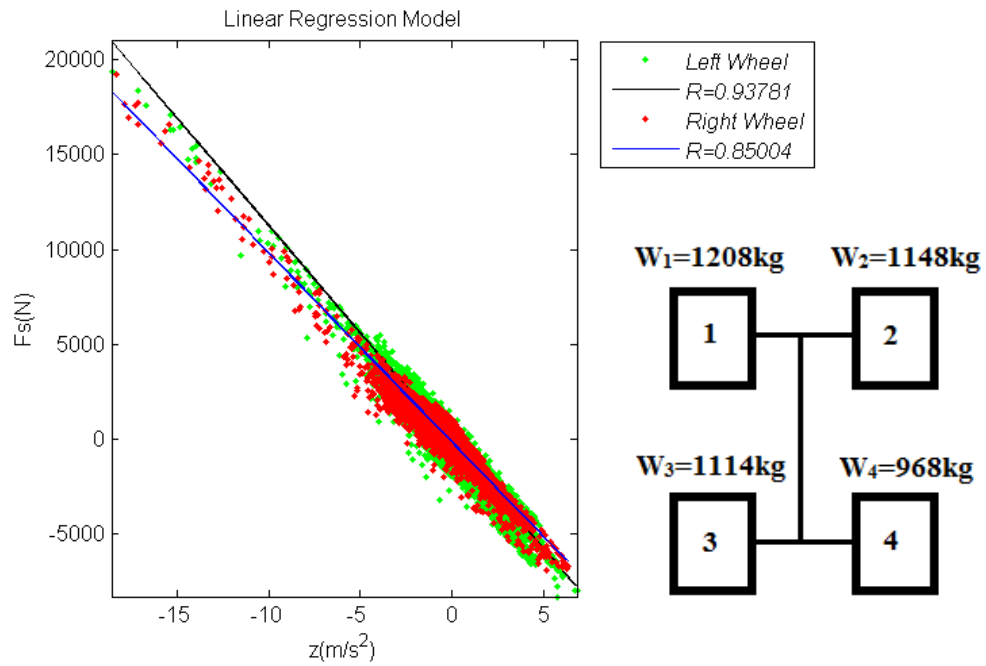
$$y_L = -1131x - 282.32 \tag{20}$$

$$y_R = -1005x - 161.64 \tag{21}$$

4.2.11 Τεστ 11- Κατηγορία 7



Διάγραμμα 4.2-21: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



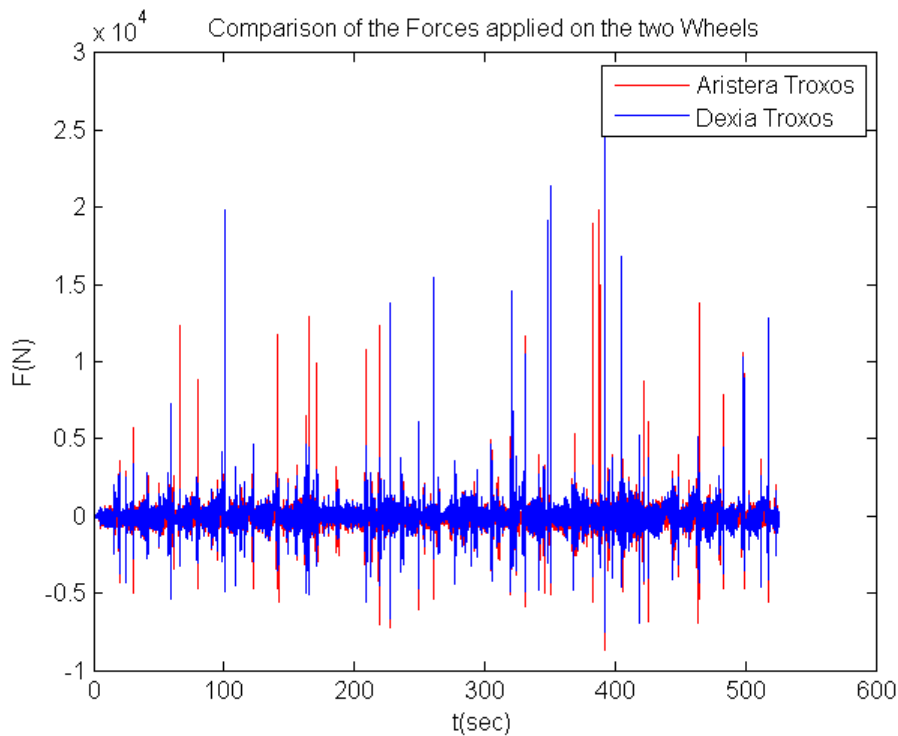
Διάγραμμα 4.2-22: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-22(α) είναι:

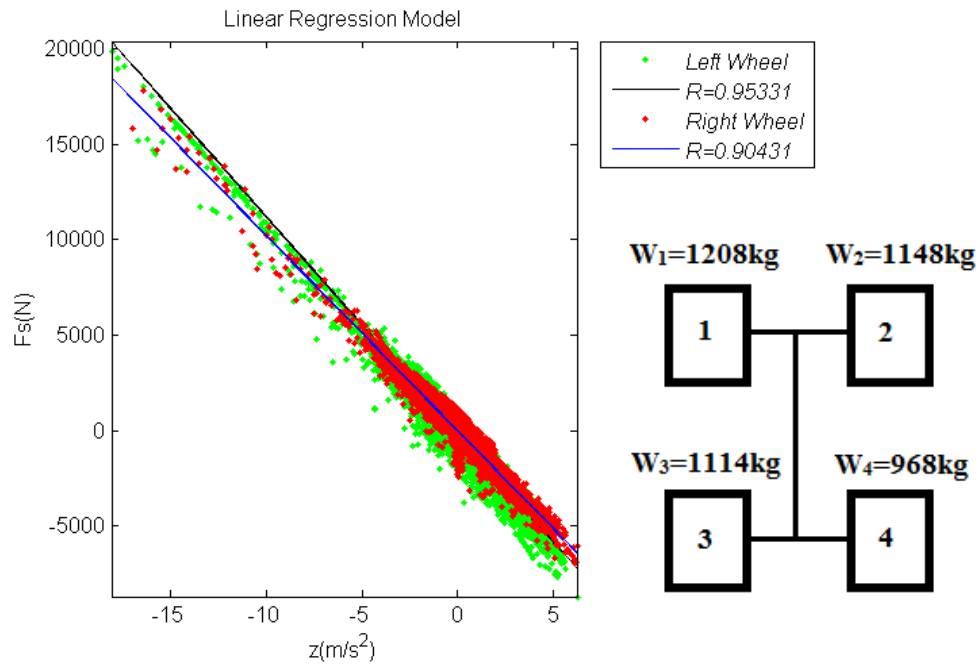
$$y_L = -1132x - 67.49 \tag{22}$$

$$y_R = -995x - 145.44 \tag{23}$$

4.2.12 Τεστ 12- Κατηγορία 8



Διάγραμμα 4.2-23: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



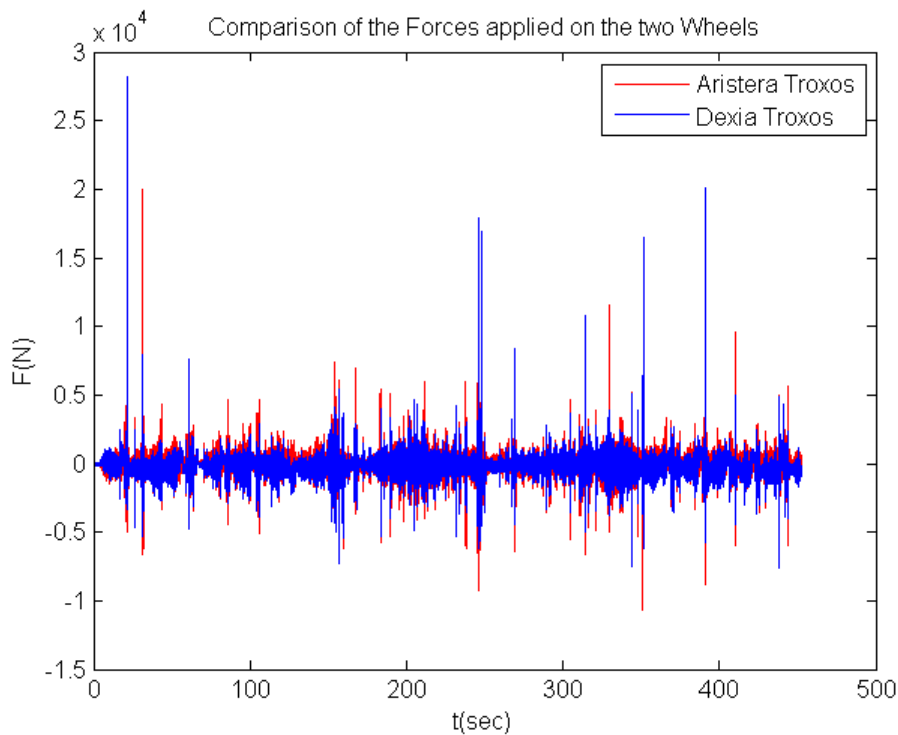
Διάγραμμα 4.2-24: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-24(α) είναι:

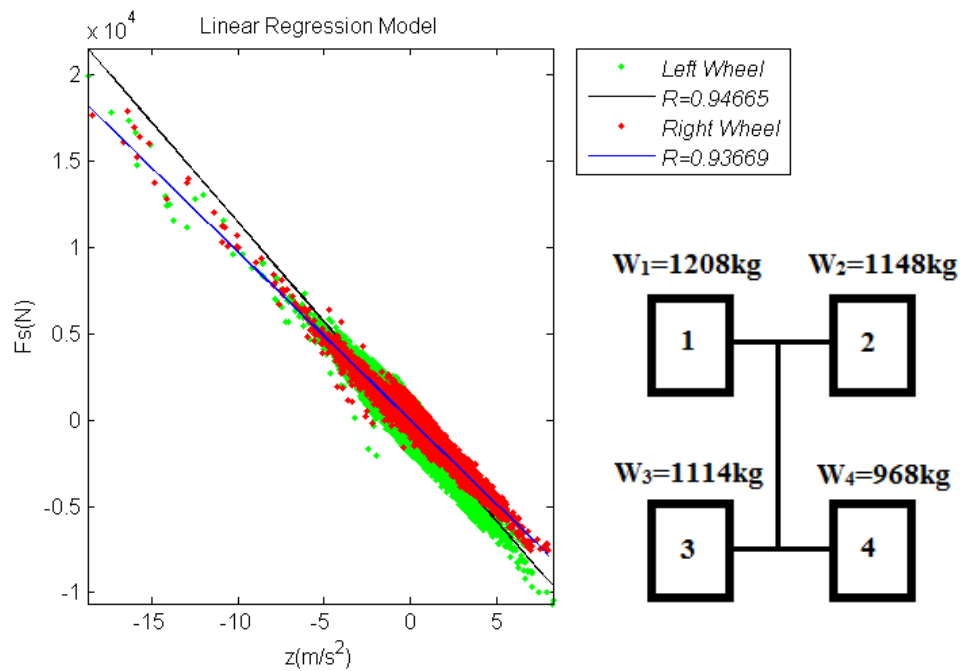
$$y_L = -1132x - 120.96 \tag{24}$$

$$y_R = -1020x - 20.56 \tag{25}$$

4.2.13 Τεστ 13- Κατηγορία 9



Διάγραμμα 4.2-25: Σύγκριση των Υπολογισμένων Δυνάμεων που ασκούνται στους Οπίσθιους Τροχούς



Διάγραμμα 4.2-26: (α)Γραμμικά Μοντέλα Συσχέτισης στους Δύο Τροχούς, (β) Κατανομή Μάζας Οχήματος

Οι προκύπτουσες εξισώσεις για τα γραμμικά μοντέλα του διαγράμματος 4.2-26 (α) είναι:

$$y_L = -1155x - 66.06 \quad (26)$$

$$y_R = -975x - 6.53 \quad (27)$$

4.3 Σχόλια

Ως προς τα διαγράμματα που προέκυψαν θα γίνει ο σχολιασμός ανάλογα με το τρόπο που έχουν κατηγοριοποιηθεί και τα κριτήρια που θεσπίστηκαν ώστε να κριθούν τα αποτελέσματα αξιόπιστα και η πειραματική διαδικασία επιτυχημένη. Πρώτα θα αναφερθούν οι παρατηρήσεις που έγιναν στα Τεστ 1 έως 4, που αποτελούσαν τεστ με συγκεκριμένες διεγέρσεις, και στην συνέχεια τα Τεστ 5-13 όπου είχαν αφαιρεθεί τα αμορτισέρ ανά κατηγορία σε διάφορες θέσεις του οχήματος και έγιναν ολόκληρες διαδρομές.

4.4 Τεστ 1-4

Στα τεστ αυτή της κατηγορίας όπου μετρήθηκε η συμπεριφορά τροχών υπό συγκεκριμένες διεγέρσεις (επιτάχυνση, δεξιά στροφή, κεκλιμένος δρόμος και βηματική διέγερση) παρατηρήθηκαν υψηλές τιμές στον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που σημαίνει ότι τα δεδομένα που αποκτήθηκαν και στην συνέχεια επεξεργάστηκαν, ακολουθούν σε αρκετά καλό βαθμό την εξίσωση 1, όπου αποτελεί θεωρητικά τον 2^ο Νόμο του Νεύτωνα. Επίσης, η βασική επαλήθευση για την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων των δυνάμεων στον νόμο του Νεύτωνα αποτελεί το γεγονός ότι η $m_{Resulted}$ σε κάθε περίπτωση σύγκλιε στην m_{Static} του αντίστοιχου τμήματος του οχήματος. Η παρουσία του σφάλματος που προέκυψε, όπως

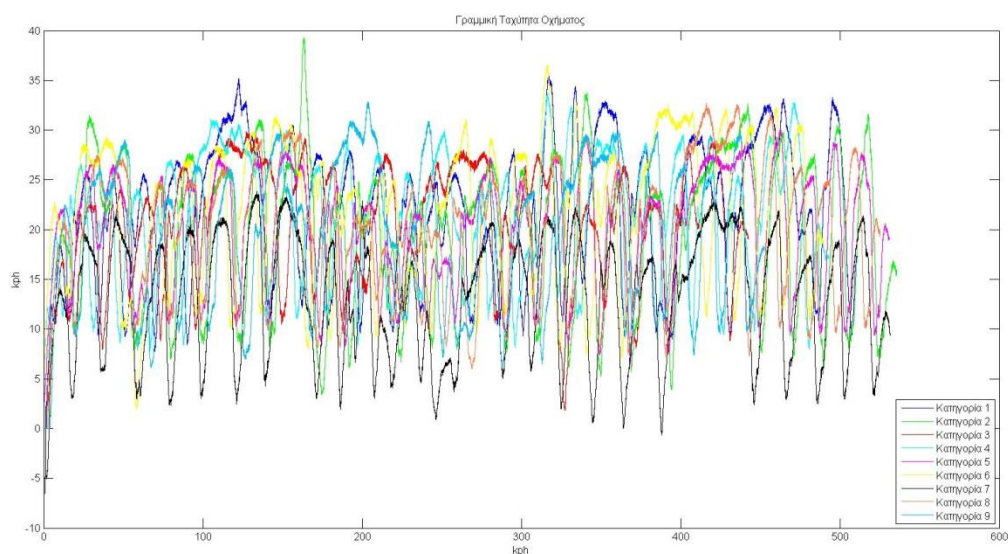
αναμενόταν, οφείλεται ίσως στη σκληρότητα των αμορτισέρ δεδομένου ότι είναι καινούργια. Βασική όμως αιτία είναι η διαφορά από την m_{Static} που πιθανόν διορθώνεται μέσω αυτού του σφάλματος.

Ιδιαίτερη αναφορά χρήζει, αρχικά, η περίπτωση όπου μελετήθηκε η δεξιά στροφή. Τα αποτελέσματα των δυνάμεων, η σύγκριση τους όσο και τα γραμμικά μοντέλα που προέκυψαν φανερώνουν την χρήση της αντιστρεπτικής δοκού κατά την διάρκεια της στροφής. Καθώς το όχημα αλλάζει κατεύθυνση, εφαρμόζεται δύναμη αντίθετης φοράς στους τροχούς της αντίθετης πλευράς από την στροφή με σκοπό την σταθεροποίηση του οχήματος. Αυτό φαίνεται στην προκύπτουσα εξίσωση από τα αντίθετα πρόσημα των συντελεστών του x , της κάθετης επιτάχυνσης των τροχών. Επιπλέον, παρατηρείται αποκλίση από τις στατικές μάζες που μετρήθηκαν εξαιτίας της παρουσίας ισχυρότερων φορτίων στους εσωτερικούς τροχούς του οχήματος. Κατά την διάρκεια στροφής, είτε δεξιάς είτε αριστερής, οι εσωτερικοί τροχοί δέχονται ισχυρότερα φορτία. Αυτό οδήγησε στην συγκεκριμένη περίπτωση στην αύξηση των φορτίων στους δεξιά τροχούς και κατ' επέκταση στον συντελεστή της εξίσωσης 1, $m_{Resulted}$, προς την μετρημένη μάζα, m_{Static} .

Όσον αφορά της περίπτωση της βηματικής διέγερσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υψηλοί συντελεστές συσχέτισης και η μεγαλύτερη ακρίβεια στην σύγκλιση του συντελεστή του x με τις στατικές μάζες που μετρήθηκαν συγκριτικά με όλες τις άλλες διεγέρσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια μια βηματικής διέγερσης έχουμε υψηλότερες κάθετες επιταχύνσεις στους τροχούς. Σύμφωνα με αυτά που αναλύθηκαν στην ανάπτυξη της μεθόδου στο κεφάλαιο 1.1.4.1 οι κάθετες επιταχύνσεις υπολογίζονται με σκοπό την διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων που προκύπτουν από την μέτρηση των παραμορφώσεων στον άξονα. Συνέπεια αυτού είναι η διόρθωση των δυνάμεων που ασκούνται στο τροχό σε μεγαλύτερο βαθμό από τις προηγούμενες διεγέρσεις.

4.5 Τεστ 5-13 (Κατηγορίες 1-10)

Κρίνοντας τα αποτελέσματα των προηγούμενων περιπτώσεων αξιόπιστα, ακολούθησαν μετρήσεις ολοκληρωμένων διαδρομών για να μελετηθούν τα αποτελέσματα των δυνάμεων σε μεγαλύτερο όγκο δεδομένων. Αφαιρώντας τα αμορτισέρ από το όχημα, οδηγήθηκε σε μεγαλύτερες διεγέρσεις που αποτυπώθηκαν στο τελικό αποτέλεσμα όλων των μετρούμενων μεγεθών. Όσο μειωνόταν ο αριθμός των αμορτισέρ που διατηρήθηκαν στο όχημα, μειωνόταν και η απόσβεση του και οι τροχοί δεχόντουσαν ισχυρότερες δυνάμεις. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η ίδια ταχύτητα σε όλες τις διαδρομές κάτι που επιτεύχθει όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.4.1.



Διάγραμμα 4.5-1: Διάγραμμα Γραμμικής Ταχύτητας όλων των Διαδρομών

Πάρα τις ισχυρές διεγέρσεις παρατηρήθηκαν σ' όλες τις κατηγορίες υψηλές τιμές του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης, από 0,91-0,96, και μεγάλη ακρίβεια στην σύγκλιση των μαζών $m_{Resulted}$ ως προς την μετρημένη μάζα, m_{Static} . Τα σφάλματα μειώθηκαν σε μεγάλο βαθμό στις περισσότερες περιπτώσεις όπως φαίνεται στις προκύπτουσες εξισώσεις (2)-(25) των γραμμικών μοντέλων ως προς τα σφάλματα που παρατηρήθηκαν στα τεστ με τις μεμονωμένες διεγέρσεις, Τεστ 1-4. Στα Τεστ αυτά, παρατέθηκαν επίσης και συγκριτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων στους δύο τροχούς χωρισμένα ανά 12 δευτερόλεπτα/10000 δεδομένα με σκοπό να αποτυπωθεί σε καλύτερο βαθμό η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και η συμπεριφορά των δυνάμεων. Σε όλες τις περιπτώσεις οι δυο τροχοί είχαν κοινά χρονικά μέγιστα (pick) λόγω εγκάρσιων ανωμαλιών του δρόμου. Σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, είχαν αντίθετα πρόσημα δείχνοντας πιθανότητα την παρουσία στροφής.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η αύξηση των φορτίων είτε στην δεξιά είτε στην αριστερή πλευρά του οχήματος ανάλογα με τον αριθμό των αμορτισέρ που είχαν διατηρηθεί. Παρατηρήθηκε στις κατηγορίες όπου είτε ένας από τους δύο είτε και οι δύο τροχοί δεν είχαν αμορτισέρ αύξηση στις δυνάμεις που ασκήθηκαν στους τροχούς. Ο μικρότερος βαθμός απόσβεσης οδήγησε σε ισχυρότερες δυνάμεις και κατ' επέκταση σ' αύξηση στον συντελεστή της εξίσωσης 1, $m_{Resulted}$, ως προς την μετρημένη μάζα, m_{Static} ανάλογα με την πλευρά που είχε τα λιγότερα αμορτισέρ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Μελλοντική Εργασία

Μετά την ανάλυση της συγκεκριμένης μεθόδου και δεδομένου ότι τα αποτελέσματα θεωρήθηκαν αξιόπιστα και η πειραματική διαδικασία επιτυχής, θα ήταν χρήσιμο να γίνει αντίστοιχη ανάλυση και για άλλες πειραματικές μεθόδους, όπως η μέθοδος που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1.1.4.2 και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Επίσης, σημαντικό αντικείμενο για μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να είναι είτε η περαιτέρω μείωση του σφάλματος είτε ο προσδιορισμός της προέλευσης του με στόχο την βελτίωση της ακρίβειας συγκεκριμένης μεθόδου. Τέλος, θα μπορούσε να γίνει ένας «καθαρισμός» των δεδομένων μέσω στατιστικής ανάλυσης με σκόπο την βελτίωση των αποτελεσμάτων και της αξιοπιστίας τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Εικόνες

ΕΙΚΟΝΑ 1.3-1: ΕΠΙΤΑΧΥΣΙΟΜΕΤΡΟ ΣΤΟΥΣ ΆΞΟΝΕΣ	5
ΕΙΚΟΝΑ 1.3-1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	11
ΕΙΚΟΝΑ 1.3-2: ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ	12
ΕΙΚΟΝΑ 1.3-3: ΣΥΝΘΕΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΔΥΝΑΜΕΩΝ	13
ΕΙΚΟΝΑ 1.3-4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	14
ΕΙΚΟΝΑ 1.3-5: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΣΚΟΥΜΕΝΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ	15
ΕΙΚΟΝΑ 1.3-6: ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΦΟΡΤΙΣΗ	15
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-1: ΑΤΕΓΟ 815, DAIMLER CHRYSLER	16
ΕΙΚΟΝΑ 2.1-2: ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ	17
ΕΙΚΟΝΑ 2.3-1: (Α) ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-MGCPLUS	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.3-2: (Β) ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-MGCPLUS	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.3-3: ΔΟΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ MGCPLUS	19
ΕΙΚΟΝΑ 2.3-4: ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΥΠΟΔΟΧΕΣ	19
ΕΙΚΟΝΑ 2.3-5: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	20
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-1: ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ-STRAIN GAUGE	20
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-2: ΚΥΚΛΩΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ	21
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-3: ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	22
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-4: ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ FULL BRIDGE	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-5: ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ FULL BRIDGE ΜΕ ΤΟ MGCPLUS	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-6: ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	26
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-7: ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ S ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	27
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-8: ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ HALF BRIDGE	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-9: ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ HALF BRIDGE ΜΕ ΤΟ MGCPLUS	29
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-10: ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	29
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-11: ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ FULL BRIDGE	30
ΕΙΚΟΝΑ 2.4-12: ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ FULL BRIDGE ΜΕ ΤΟ MGCPLUS	31
ΕΙΚΟΝΑ 2.5-1: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ HF-500C	32
ΕΙΚΟΝΑ 2.5-2: ΘΕΣΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ HF-500C	32
ΕΙΚΟΝΑ 2.5-3: ΚΑΡΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΟ MGCPLUS	33
ΕΙΚΟΝΑ 2.6-1: ΔΥΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΑ ΣΗΜΑΤΟΣ	34
ΕΙΚΟΝΑ 2.6-2: ΔΥΟ ΣΗΜΑΤΑ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ 180°	34
ΕΙΚΟΝΑ 2.6-3: ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	35
ΕΙΚΟΝΑ 2.6-4: ΚΑΡΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΟ MGCPLUS	35
ΕΙΚΟΝΑ 2.6-5: CORREVIT L-CE	36
ΕΙΚΟΝΑ 2.6-6: ΚΑΡΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΟ MGCPLUS	37
ΕΙΚΟΝΑ 2.7-1: ΔΙΑΜΗΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΝΗΣΕΩΝ	37
ΕΙΚΟΝΑ 2.7-2: ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ ΗΒΜ Β12	38
ΕΙΚΟΝΑ 2.7-3: ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ ΗΒΜ Β12	39
ΕΙΚΟΝΑ 2.7-4: ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΗΒΜ Β12 ΜΕΤΡΩΝΤΑΣ (Α) ΔΙΑΜΗΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ (Β) ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ	39
ΕΙΚΟΝΑ 2.7-5: ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΤΟΥ MGCPLUS (Α) ML455 ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗΝ ΚΑΡΤΑ (Β) AP 455I	40
ΕΙΚΟΝΑ 2.8-1: ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ KISTLER 8704B	41

ΕΙΚΟΝΑ 2.8-2: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ KISTLER 8704B	41
ΕΙΚΟΝΑ 2.8-3: ΚΑΡΤΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΟ MGCPLUS.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-1: ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΤΡΟΧΩΝ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-2: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 1.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-3: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 2.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-4:ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 3	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-5: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 4.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-6: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 5.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-7: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 6.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-8: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 7.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-9: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 8.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.2-10: ΘΕΣΕΙΣ ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΑΝΤΩΝ ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 9.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.3-1: ΘΕΣΕΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ.....	46
ΕΙΚΟΝΑ 4.1-1: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΑΖΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	107

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4-1: ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4-2: ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	27

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Κώδικας Υλοποίησης

```
clear all
clc

load('diadromi411b')

%% Load data from channels
%TIME
curC = getfield(diadromi411b,'channel01');
t2=getfield(curC,'data');

%RIGHT WHEEL'S VERTICAL ACCELERATION
curC = getfield(diadromi411b,'channel05');
z2pd2=getfield(curC,'data');

%LEFT WHEEL'S VERTICAL ACCELERATION
curC = getfield(diadromi411b,'channel04');
z1pa2=getfield(curC,'data');

%RIGHT WHEEL'S SHEAR STRAINS
curC = getfield(diadromi411b,'channel22');
ex=getfield(curC,'data');

%%LEFT WHEEL'S SHEAR STRAINS
curC = getfield(diadromi411b,'channel16');
ex2=getfield(curC,'data');

%RIGHT WHEEL'S BENDING STRAINS
curC = getfield(diadromi411b,'channel23');
ey=getfield(curC,'data');

%LEFT WHEELS's BENDING STRAINS
curC = getfield(diadromi411b,'channel17');
ey2=getfield(curC,'data');

%%Configuring the number of the measurements
L=numel(ex2);

%% Checking the measurements of the straining gauges

figure
plot(t2,ex)
hold
plot(t2,ex2,'r')
title('Shear Strain')
legend('right','left')

%% Vehicle Dimensions (m)
close all
```

%Centre of the Axle-Accelerometer

b1=0.6115;

%Centre of gravity of the mass outboard of the strain gauges-The mounting point of
%strain gauges

b2=0.1336;

%Centre of Wheels-The mounting point of strain gauges

b3=0.234;

%Centre of gravity of the mass outboard of the strain gauges-Centre of the Axle

b4=0.7896;

%Loaded diameter and radius of the Wheels

R=0.374;

D=2*R;

%% Calculating the outboard mass of the mounting point of the strain gauges

%Mass(kg)

m1=44;

m2=9.7331;

m3=0.5635;

m=2*m1+m2+m3;

%% Annular shaped cross-section

d1=0.130;

d2=0.120;

d3=0.04;

A=pi*((d1/2)^2-(d2/2)^2);

%% Inertia of the outboard mass

iy=0.5*2*m1*(R^2)+0.5*m3*(d3/2)^2;

%% Shear modulus

G=80000*(10^6);

%% Modulus of Elasticity

E=200000*(10^6);

%% Evaluation of the Vertical Wheel Loads

for i=1:L

%VERTICAL ACCELERATION OF THE CENTRE OF THE AXLE

zg(i)=(z1pa2(i)+z2pd2(i))*9.81/2;

%ROLL ACCELERATION OF THE AXLE

f1(i)=(z1pa2(i)-z2pd2(i))*9.81/(2*b1);

f(i)=(z2pd2(i)-z1pa2(i))*9.81/(2*b1);

%VERTICAL ACCELERATION OF THE CENTRE OF GRAVITY OF THE OUTBOARD MASS

zq1(i)=zg(i)+b4*f1(i);

zq(i) =zg(i)+b4*f(i);

%CONVERT TO DIMENSIONLESS NUMBERS

ex2(i)=ex2(i)*(10^(-6));

ex(i)=ex(i)*(10^(-6));

%SHAPE FACTOR OF ANNULAR CROSS SECTION

ca=2;

```
%Calculating Shear Forces Through the Measurement of Shear Strains
```

```
p1(i)=0.5*ex2(i)*G*A/ca;
```

```
p(i)=0.5*ex(i)*G*A/ca;
```

```
%Calculating Inertia Forces
```

```
T1(i)=m*zq1(i);
```

```
T(i)=m*zq(i);
```

```
%LEFT WHEEL LOADS
```

```
F2s1(i)=p1(i)-T1(i);
```

```
%RIGHT WHEEL LOADS
```

```
F2s(i)=p(i)-T(i);
```

```
end
```

```
%% Calculating the mean value of the difference of the two wheels
```

```
sumd=0;
```

```
N=L
```

```
for i=1:L
```

```
    d(i)=abs(F2s(i))-abs(F2s1(i));
```

```
    sumd=sumd+abs(d(i));
```

```
end
```

```
md=sumd/N
```

```
%% Calculating the standard deviation of the difference of the two wheels
```

```
sum1=0;
```

```
for i=1:L
```

```
    sum1=sum1+(d(i)-md)^2;
```

```
end
```

```
s2=(sum1/N)^0.5
```

```
sfalma2=0.675*s2
```

```
%% Calculating the sum of the results being in the boundaries of the standard deviation
```

```
w1=0;
```

```
w2=0;
```

```
for i=1:L
```

```
    if abs(d(i))<sfalma2
```

```
        w1=w1+1;
```

```
    end
```

```
    if abs(d(i))<s2
```



```
w2=w2+1;
```

```
end
```

```
end
```

```
%% Plotting the comparison of the forces applied on the two wheels
```

```
plot(t2,F2s1,'r')
hold
plot(t2,F2s)
legend('Aristera Troxos','Dexia Troxos')
title('Comparison of the Forces applied on the two Wheels')
xlabel('t(sec)')
ylabel('F(N)')
```

```
%% Plotting the comparison of the forces applied on the two wheels in parts of the test
```

```
close all
mkdir('Diagrammata_Sugkrisis_F2s1_F2s')
K=fix(L/10000)
x1=1;
x2=10000;

for i=1:K

    h=figure(i);
    plot(t2(x1:x2),F2s1(x1:x2));
    str1 = int2str(t2(x1));
    str2 = int2str(t2(x2));
    a=strcat(str1,'-',str2);
    b=strcat('Diagrammata_Sugkrisis_F2s1_F2s/',a);
    title(a);
    xlabel('s');
    ylabel('N');
    hold;
    plot(t2(x1:x2),F2s(x1:x2),'g')
    legend('F2s1','F2s')
    saveas(h,b,'jpg');
    saveas(h,b);

    x1=x1+10000;
    x2=x2+10000;

    if x1==L*10000

        x2=K;

    end
end
```

```
%% Fitting F2s1,the response variable, in linear model with z1pa2 as predictor variables
```

```
close all
```

```
n=L;
k1=0;
k2=0;
k3=0;
k4=0;
k5=0;
```

```
k6=0;
```

```
k7=0;
```

```
for i=1:n
```

```
    k1=k1+z1pa2(i)*F2s1(i);
```

```
    k2=k2+z1pa2(i)*z1pa2(i);
```

```
    k3=k3+z1pa2(i);
```

```
    k4=k4+F2s1(i);
```

```
end
```

```
%Mean of the Vertical Acceleration
```

```
mz1pa2=k3/n
```

```
%Mean of the Wheel Load
```

```
mF2s1=k4/n
```

```
a1=(k1-n*mz1pa2*mF2s1)/(k2-n*(mz1pa2^2))
```

```
a0=mF2s1-a1*mz1pa2
```

```
for i=1:n
```

```
    nF2s1(i)=a0+a1*z1pa2(i);
```

```
end
```

```
for i=1:n
```

```
    k6=k6+(nF2s1(i)-mF2s1)^2;
```

```
    k7=k7+( F2s1(i)-mF2s1)^2;
```

```
end
```

```
r=(k6/k7)
```

```
r21=r^0.5
```

```
plot(z1pa2,F2s1,'g');
```

```
hold
```

```
plot(z1pa2,nF2s1,'k');
```

```
title('Linear Regression Model')
```

```
axis tight
```

```
ylabel('Fs(N)');
```

```
xlabel('z(m/s^2)')
```

```
str1 = num2str(r21);
```

```
a1=strcat('R=',str1)
```

```
legend('Left Wheel',a1)
```

```
%% Fitting F2s,the response variable, in linear model with z2pd2 as predictor variables
```

```
close all
```

```
k1=0;
```

```
k2=0;
```

```
k3=0;
```

```
k4=0;
```

```
k5=0;
```

```
k6=0;
```

```

k7=0;

for i=1:n

    k1=k1+z2pd2(i)*F2s(i);

    k2=k2+z2pd2(i)*z2pd2(i);

    k3=k3+z2pd2(i);

    k4=k4+F2s(i);

end

%Mean of the Vertical Acceleration
mz2pd2=k3/n
%Mean of the Wheel Load
mF2s=k4/n

a1=(k1-n*mz2pd2*mF2s)/(k2-n*(mz2pd2^2))

a0=mF2s-a1*mz2pd2

for i=1:n

    nF2s(i)=a0+a1*z2pd2(i);

end

for i=1:n

    k6=k6+(nF2s(i)-mF2s)^2;

    k7=k7+( F2s(i)-mF2s)^2;

end

r=(k6/k7)
r2=r^0.5

plot(z2pd2,F2s,'r. ');
hold
plot(z2pd2,nF2s);
axis tight
ylabel('Fs(N)');
xlabel('z(m/s^2)')
title('Linear Regression Model')
str1 = num2str(r2);
a=strcat('R=',str1)
legend('Right Wheel',a)

%% Comparison of the regression models of the two wheels
close all
figure;
plot(z1pa2,F2s1,'g. ');
hold;
plot(z1pa2,nF2s1,'k');
title('Linear Regression Model')
axis tight

```

```
ylabel('Fs(N)');  
xlabel('z(m/s^2)')  
str1 = num2str(r21);  
a1=strcat('R=',str1)  
legend()  
  
plot(z2pd2,F2s,'r. ');  
plot(z2pd2,nF2s);  
str1 = num2str(r2);  
a=strcat('R=',str1)  
hleg=legend('Left Wheel',a1,'Right Wheel',a,'Location','NorthEastOutside')  
set(hleg,'FontAngle','italic')  
  
%% End of Calculations  
close all
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hoffmann K. (1989), *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges*, HBM, Germany.
- [2] Cebon D. (1999), *Handbook of Vehicle-Road Interaction*, Swets & Zeitlinger, Lisse, the Netherlands.
- [3] Koulocheris D., Dertimanis V. and Spentzas C. (2005), *Structural Optimization of a fixed-tank vehicle using complex method*, Limassol, 29 June-1 July, *Proceedings of 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics*.
- [4] Koulocheris D., Dertimanis V. and Spentzas C. (2007), *Estimation of vehicle's structural parameters from multi-channel vibration measurements*, Belgrade, 23-25 April, *Proceedings of 21st JUMV International Automotive Conference*.
- [5] Koulocheris D. (2007), "Optimum Dynamic performance of a tank vehicle", *International Review of Mechanical Engineering (I.RE.ME)*, vol.1, pp. 218-224.
- [6] Wong J.Y. (2008), *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, United States of America.
- [7] Reza N. J., (2008), *Vehicle Dynamics Theory and Application*, Springer, New York.
- [8] Koulocheris D., Dertimanis V (2008), "Calculation of a fixed-tank vehicle optimum dynamic performance", *Procedia Social and Behavioral Sciences* 48, pp. 2230-2240.
- [9] Heising B., Mertin Ersoy (2011), *Chassis Handbook, Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives*, Vieweg+Teubner, Germany.
- [10] Operating Manual-Amplifier System *MGCplus*, HBM
- [11] Mike Blundell, Damian Harty (2004), *Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*, Elsevier Butterworth Heinemann, New York
- [12] Hans B. Pacejka (2002), *Tire and Vehicle Dynamics*, Elsevier Butterworth Heinemann, Great Britain