



Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς τετραξονικού οχήματος μεταφοράς υγρών καυσίμων

Τομέας: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ- ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Επιβλέπων: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΥΛΟΧΕΡΗΣ, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

--- κενή σελίδα ---

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών και συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Οχημάτων κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022. Η ολοκλήρωση της θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη της Δρ.-Μηχ. Βόσου Κλειώς και του υπεύθυνου Αν. Καθηγητή, Κουλοχέρη Δημήτρη. Ο καθένας με το δικό του τρόπο με καθοδήγησε καθ'όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής Εργασίας προσφέροντας όχι μόνο γνώσεις επί του αντικειμένου αλλά και σημαντική βοήθεια όσον αφορά το ερευνητικό κομμάτι. Με την κα. Βόσου είχαμε μια άριστη συνεργασία στα πλαίσια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Ήταν πάντα πρόθυμη να διαθέσει κομμάτι από τον πολύτιμο χρόνο της ώστε να με βοηθήσει και να μου δώσει σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις πάνω στο θέμα. Ο κ. Κουλοχέρης έδειχνε συνεχώς την προθυμία του να βοηθήσει και την εμπιστοσύνη του, ενώ δεν έλειψε η κατανόηση και η όμορφη επικοινωνία σε όλο το διάστημα εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας. Και στους δύο εκφράζω ένα βαθύτατο ευχαριστώ και τους εύχομαι τα καλύτερα για το μέλλον. Ευχαριστώ πολύ, τον καλό μου φίλο και συμφοιτητή Νάκο Ανδρέα για τη συνεχή συμπαράσταση και τον όμορφο χρόνο που περάσαμε μαζί στο εργαστήριο από τις πρώτες κιόλας ημέρες. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω πολύ τους γονείς μου, Κατσά Χρήστο & Ντατσοπούλου Σμαράγδα, οι οποίοι υπήρξαν πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα και στους οποίους οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι και σήμερα.

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΤΣΑΣ

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	7
Abstract	8
Συνοπεύσεις - αρκτικόλεξα	9
1. Εισαγωγή	10
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	12
2.1 Γενικά στοιχεία ενός βαρέου οχήματος	12
2.2 Διαστάσεις και φορτίο	14
2.3 Βαρέα οχήματα μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων	16
2.4 Ευστάθεια, φαινόμενα αστάθειας και αύξηση ασφάλειας	17
2.5 Χρήση λογισμικού TruckSim και ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς	18
3. Περιγραφή λογισμικού	21
3.1 Γενικά στοιχεία	21
3.1.1 VS Solver	22
3.1.2 VS Browser (GUI)	24
3.1.3 VS Visualizer	26
3.2 Μοντελοποίηση ελαστικών	29
3.2.1 MF -Tyre	30
3.2.2 MF Swift	31
3.3 Γενική περιγραφή διαδικασιών προσομοίωσης στη δυναμική οχημάτων και στο λογισμικό TruckSim®	31
4. Διερεύνηση δυναμικής συμπεριφοράς τετραξονικού φορτηγού οχήματος με φορτίο ορθογωνικής διατομής	34
4.1 Μοντέλο οχήματος	34
4.2 Φορτίο οχήματος	36
4.3 Σενάρια οδήγησης και επικύρωση μοντέλου λογισμικού	36
4.3.1 Ανατρεπόμενη τράπεζα (Tilt table)	37
4.3.2 Αλλαγή λωρίδας (Lane change)	42
4.3.3 Διπλή αλλαγή λωρίδας (Double lane change)	46
4.3.4 Πέδηση σε στροφή (Brake in a Turn)	50
4.3.5 Στροφή μόνιμης κατάστασης (Steady state circular turn)	59
5. Αποτελέσματα έρευνας και σχολιασμός	71
5.1 Μεταλλικές δεξαμενές	71
5.2 Διερεύνηση ως προς τη διατομή της δεξαμενής	75
5.2.1 Ανατρεπόμενη τράπεζα	75
5.2.2 Αλλαγή λωρίδας	77
5.2.3 Διπλή αλλαγή λωρίδας	80
5.2.4 Πέδηση σε στροφή	84
5.2.5 Στροφή μόνιμης κατάστασης	90
5.3 Διερεύνηση ως προς την ταχύτητα του οχήματος	94

5.3.1	Διπλή αλλαγή λωρίδας.....	95
5.3.2	Πέδηση σε στροφή.....	102
6.	Συμπεράσματα	112
7.	Κατάλογος σχημάτων	115
8.	Κατάλογος πινάκων	118
9.	Αναφορές.....	119
I.	Πρότυπη κιβωτιοειδής δεξαμενή	121

Περίληψη

Βασική προτεραιότητα στην σύγχρονη έρευνα στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι η αύξηση της ασφάλειας και η μείωση των ατυχημάτων. Ειδικά όσον αφορά στα βαρέα οχήματα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων, ένα ατύχημα συνεπάγεται άμεσα μεγάλο κόστος, αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, υλικές ζημιές μέχρι και απώλειες ζωής. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εστιάζει στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βυτιοφόρου οχήματος μεταφοράς υγρών καυσίμων. Σκοπός είναι η ανάλυση των περιθωρίων ασφάλειας του οχήματος κυρίως ως προς την ανατροπή με βάση την εγκάρσια διατομή της δεξαμενής, λαμβάνοντας υπόψη τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια διαστάσεων και φορτίου. Αρχικά, επιλέγεται ένα τετραξονικό όχημα με φορτίο ορθογωνικής διατομής και με τη χρήση του multi-body λογισμικού TruckSim® υλοποιούνται διάφορες προσομοιώσεις αναλύοντας τη δυναμική του. Στη συνέχεια, μεταβάλλοντας τη διατομή της δεξαμενής και θεωρώντας σταθερό όγκο υγρού, υλοποιούνται οι ίδιες προσομοιώσεις. Ως πρότυπη δεξαμενή λαμβάνεται μια δεξαμενή κιβωτιοειδούς διατομής με όγκο 28187 λίτρα. Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων καταγράφονται συγκεκριμένες μεταβλητές προκειμένου να εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος. Με βάση τα αποτελέσματα, η καταλληλότερη δεξαμενή φαίνεται να είναι τύπου διαμόρφωσης ορθογωνίου. Ωστόσο, οι ακμές μιας ορθογωνικής δεξαμενής δημιουργούν προβλήματα όταν μεταφέρεται υγρό λόγω sloshing. Έτσι, στην πράξη στα βυτιοφόρα οχήματα μεταφοράς καυσίμων δεν χρησιμοποιούνται ορθογωνικές δεξαμενές αλλά κιβωτιοειδείς. Τέλος, εξετάζεται η αλλαγή της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος με βάση την αλλαγή της ταχύτητας. Τα πορίσματα της έρευνας αποτελούν το πρώτο βήμα για την προσθήκη ειδικών συστημάτων ασφαλείας στα βυτιοφόρα. Αυτά υπολογίζοντας τη θέση του κέντρο βάρους του φορτίου και λαμβάνοντας υπόψη το δρόμο θα προειδοποιούν τον οδηγό αυξάνοντας την οδική ασφάλεια.

Λέξεις κλειδιά: βυτιοφόρο όχημα, ανατροπή, δυναμική ευστάθεια, διατομή δεξαμενής

Abstract

The improvement of the driving safety and the eradication of accidents is a matter of high priority in research in the area of automotive engineering. Especially in heavy vehicles transporting dangerous goods, every accident means high cost due to probable loss of life, environmental pollution and infrastructure damage. The present thesis focuses on the analysis of the dynamic behavior of tank vehicles used to transport flammable liquids. Its main purpose is to correlate the rollover threshold of tank vehicles to the geometry of the cross section of the tank taking into consideration the maximum allowed dimensions and gross weight. Firstly, a 4-axle truck with a rectangular payload is simulated using the multi-body software TruckSim® in order to monitor its dynamic behavior. In addition, several simulation tests consisting of typical maneuvers were carried out considering different shapes of the cross section of the tank, considering equal volume of transported flammable liquid. The prototype of the cross section is a box shaped tank with total internal volume 28187 liters. For each simulation test several dynamic quantities have been monitored in order to estimate the safety against tank vehicle rollover. The results, among others, showed that the cross section providing the highest rollover threshold was a rectangular. However, the edges of this kind of tank create problems because of sloshing. Thus, the tank trucks which carry flammable liquids use box shaped tanks. Furthermore, an important outcome of this thesis is the determination of the maximum speed for each simulated maneuver and shape of cross section. This research made the first steps required in order to equip the tank trucks with special safety systems. These systems calculating the position of center of gravity and taking into account the road conditions could warn the driver and improve the driving safety.

Key words: tank vehicle, rollover, dynamic stability, tank cross section

Συνομεύσεις - αρκτικόλεξα

- κ.α. = και άλλοι
- UKF = Unscented Karman Filter
- LQR = Linear Quadratic Regulator
- ODE = Ordinary Differential Equations
- GUI = Graphic User Interface
- TNO = Netherlands Organization for Applied Scientific Research
- MF = Magic Formula
- GAWR = Gross axle weight rating
- DLC = Double Lane Change
- 2 ch. = 2 channels
- Κιβωτ. = Κιβωτιοειδής
- Κυκλ. = Κυκλική
- Ελλ. = Ελλειπτική
- Ορθογ. = Ορθογωνική
- μ.μ = μόνιμης κατάστασης

1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βυτιοφόρου οχήματος μεταφοράς υγρών καυσίμων. Σύμφωνα με τη συμφωνία ADR, τα καύσιμα ανήκουν στην κατηγορία των Επικίνδυνων Εμπορευμάτων. Τα Επικίνδυνα Εμπορεύματα χωρίζονται σε κλάσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, έχουν έναν αριθμό κατά UN (United Nations) και έναν αριθμό επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα, τα υγρά καύσιμα ανήκουν στην Κλάση 3: Εύφλεκτα Υγρά. Τα πιο συνήθη καύσιμα που μεταφέρονται χερσαία ή θαλάσσια είναι το πετρέλαιο (UN1202-3, δηλαδή εύφλεκτο) και η βενζίνη (UN1203-33, δηλαδή πολύ εύφλεκτο). Όσον αφορά τις χερσαίες μεταφορές, αυτές διακρίνονται σε οδικές και σιδηροδρομικές. Όταν τα παραπάνω καύσιμα μεταφέρονται οδικά, χρησιμοποιούνται δεξαμενές τις οποίες μεταφέρουν ειδικά οχήματα που ονομάζονται βυτιοφόρα. Η διάταξη των βυτιοφόρων οχημάτων είναι συνήθως ένας διαξονικός τράκτορας και ένα τριαξονικό ημι-ρυμουλκούμενο ή ένα τριαξονικό ή τετραξονικό φορτηγό. Σε κάθε περίπτωση, όμως, τα οχήματα αυτά απαιτούν ειδική πιστοποίηση και πρέπει να υπακούν σε διατάξεις-ντιρεκτίβες (R111 – Ευστάθεια βυτιοφόρου έναντι ανατροπής) οι οποίες καθορίζονται από μια επιτροπή [1]. Η δυναμική συμπεριφορά των βυτιοφόρων είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μεταφορά βάρους λόγω κίνησης του υγρού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται sloshing και είναι ουσιαστικά ο λόγος για τον οποίο σχεδόν όλα τα βυτιοφόρα κουβαλάνε μια δεξαμενή που στο εσωτερικό της υπάρχουν διαμερίσματα (baffles). Στην εργασία το φαινόμενο sloshing δεν λαμβάνεται υπόψη, παρόλα αυτά οι δεξαμενές έχουν σχεδιαστεί θεωρώντας ότι διαθέτουν αυτά τα διαμερίσματα. Με άλλα λόγια, αυτά έχουν ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό του μεταφερόμενου όγκου υγρού όπως και της μάζας της δεξαμενής. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επίδραση του σχήματος της εγκάρσιας διατομής της δεξαμενής στην ευστάθεια του βυτιοφόρου οχήματος.

Οι δεξαμενές που μελετήθηκαν υπακούν στη διάταξη EN 13094 και σύμφωνα με το σχήμα της εγκάρσιας διατομής διακρίνονται σε:

- i. Κιβωτιοειδής δεξαμενή (Box shaped tank)
- ii. Κυκλική δεξαμενή (Circular tank)
- iii. Ελλειπτική δεξαμενή (Elliptical tank)
- iv. Ορθογωνική δεξαμενή (Rectangular tank)

Η τελευταία δεξαμενή, παρόλο που δε χρησιμοποιείται στην πράξη στα βυτιοφόρα οχήματα, συμπεριλήφθηκε στην μελέτη του προβλήματος σαν μοντέλο βάσης διότι το εκ των προτέρων ορισμένο φορτίο του οχήματος στο λογισμικό TruckSim® είναι ορθογωνική διατομή. Οι βασικές υποθέσεις που έγιναν είναι ότι όλες οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό, μεταφέρουν τον ίδιο όγκο υγρού και της ίδιας πυκνότητας, ενώ έχουν και το ίδιο μήκος. Κατά συνέπεια, καθίσταται προφανές ότι κάθε διαφορετική δεξαμενή αλλάζει τη θέση του κέντρου μάζας μόνο κατά τον κάθετο άξονα

λόγω σχήματος. Επιπλέον, έχει διαφορετική μάζα οπότε το συνολικό βάρος του φορτίου διαφέρει. Ως αποτέλεσμα, αλλάζουν οι ροπές αδρανείας και ως προς τους τρεις άξονες. Καταρχάς, το βασικό πρόβλημα στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η απόδειξη ότι πράγματι η κιβωτιοειδής δεξαμενή που χρησιμοποιούν τα βυτιοφόρα για τη μεταφορά καυσίμων είναι η καταλληλότερη. Παράλληλα, όμως, εξετάζονται τα μέγιστα όρια ταχύτητας του οχήματος στη διπλή αλλαγή λωρίδας και στο φρενάρισμα σε στροφή για κάθε διατομή δεξαμενής.

Ως πρότυπο δεξαμενής χρησιμοποιήθηκε μία κιβωτιοειδής με 7 διαμερίσματα, συνολικό όγκο υγρού 28187 λίτρων και συνολικό μήκος 7636 mm. Αρχικά, σχεδιάστηκαν οι 4 δεξαμενές στο λογισμικό Solidworks και υπολογίστηκαν τα απαραίτητα μεγέθη. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας το multi-body λογισμικό TruckSim® και εισάγοντας τα δεδομένα από το Solidworks, εκτελούνται οι προσομοιώσεις, καταγράφονται τα αποτελέσματα σε υπολογιστικό φύλλο Excel και συγκρίνονται οι δεξαμενές. Έτσι, προκύπτει ότι η κιβωτιοειδής δεξαμενή είναι στην πράξη η βέλτιστη επιλογή. Επίσης, για κάθε μία από τις 4 παραπάνω διατομές, εκτελούνται κάποιες προσομοιώσεις μεταβάλλοντας την ταχύτητα του οχήματος. Η παραμετρική αυτή μελέτη ως προς την ταχύτητα παρουσιάζει τα όρια κίνησης του οχήματος με βάση τη διατομή της δεξαμενής.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Γενικά στοιχεία ενός βαρέου οχήματος

Καταρχάς, ο γενικός τύπος περιγραφής ενός βαρέου οχήματος (π.χ. ενός τράκτορα) που φέρει κινητήρα είναι της μορφής: $AxB/*C$, όπου A ο συνολικός αριθμός των τροχών, B ο αριθμός των κινητήριων τροχών και C ο αριθμός των τροχών που καθορίζουν το σύστημα διεύθυνσης. Ο πιο συνηθισμένος τύπος είναι $4x2$, δηλαδή συνολικά 4 τροχοί εκ των οποίων 2 είναι οι κινητήριοι. Αυτός ο τύπος απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.1).



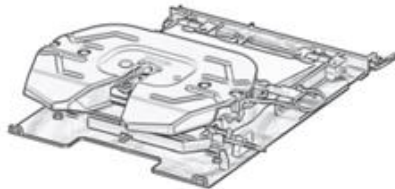
Σχήμα 2.1: Volvo FM 4x2 Τράκτορας [22]

Όσον αφορά τα σύμβολα « / » και « * », αυτά υπάρχουν μόνο όταν τροχοί που δίνουν διεύθυνση στο σύστημα υπάρχουν (προφανώς) εμπρός αλλά και πίσω. Ανάλογα με το σύμβολο, υποδηλώνεται και η θέση του πίσω άξονα του συστήματος διεύθυνσης ως προς τον κινητήριο άξονα, που κατά κανόνα είναι, επίσης, πίσω. Συγκεκριμένα, το σύμβολο «/» χρησιμοποιείται όταν ο πίσω άξονας διεύθυνσης βρίσκεται μπροστά από τον κινητήριο άξονα. Από την άλλη, το σύμβολο « * » δηλώνει ότι ο οπίσθιος άξονας διεύθυνσης είναι πίσω από τον κινητήριο. Γενικότερα, τα σύμβολα αυτά υπάρχουν σε οχήματα με τρεις ή παραπάνω άξονες καθώς στην περίπτωση των διαξονικών βαρέων οχημάτων, η διαμόρφωση (configuration) είναι σχεδόν πάντοτε η ίδια.

Η σύνδεση μεταξύ οχήματος που διαθέτει κινητήρα και (ημι)ρυμουλκούμενου μπορεί να γίνει με δύο τρόπους [2]:

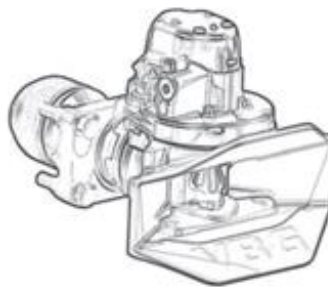
- Σύνδεση με «Πέμπτο τροχό» (Fifth wheel coupling): Η σύνδεση αυτή (Σχήμα 2.2) περιορίζει τη σχετική μεταφορική κίνηση των συνδεόμενων τμημάτων ενώ επιτρέπει την περιστροφική. Κατά συνέπεια, το ρυμουλκούμενο όχημα μπορεί να περιστραφεί λόγω ροπής ως προς τον τράκτορα κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Pitch moment), την κάθετη (Yaw moment) ή την οριζόντια (Roll moment). Ωστόσο, η περιστροφή ως προς τον χ άξονα (Roll) αντιμετωπίζεται μέσω ενός γραμμικό ή

μη γραμμικού περιστροφικού ελατηρίου. Καταλαβαίνει, λοιπόν, κανείς ότι η σύνδεση αυτή καθιστά το όχημα πιο ανθεκτικό απέναντι στην ανατροπή (Rollover).



Σχήμα 2.2: Πέμπτος τροχός [2]

- Σύνδεση με πείρο (Pin coupling): Ομοίως όπως και στη σύνδεση με πέμπτο τροχό, η σύνδεση αυτή (Σχήμα 2.3) περιορίζει τους τρεις βαθμούς ελευθερίας ως προς την σχετική μεταφορικά κίνηση, ενώ οι τρεις ως προς την περιστροφική παραμένουν απόλυτα ελεύθεροι.



Σχήμα 2.3: Πείρος σύνδεσης [2]

Όσον αφορά το σύστημα ανάρτησης στα βαρέα οχήματα, προτιμώνται δύο είδη αναρτήσεων [2]:

- Τύπου φύλλων ελατηρίου (Leaf Spring): Στην ανάρτηση αυτή η απόσβεση εξασφαλίζεται μέσω της τριβής των φύλλων. Εκτός από αυτή που είναι κλασσικού τύπου, υπάρχει και μια παραλλαγή που ενσωματώνει παραβολικό ελατήριο μεταξύ

των φύλλων. Το βασικό πλεονέκτημα της ανάρτησης αυτής είναι ότι η ανάρτηση και ο έλεγχος τροχού υλοποιούνται από το ίδιο σύστημα.

- **Αεροανάρτηση:** Μέσω αυτής της ανάρτησης βελτιώνεται η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος. Επιπλέον, ένας ακόμη λόγος που προτιμάται τέτοια ανάρτηση στα βαρέα οχήματα είναι το προ υπάρχον πνευματικό σύστημα για τα φρένα. Απεναντίας, η στιβαρότητα αυτής της ανάρτησης είναι μικρότερη από αυτή τύπου φύλλων ελατηρίου.

2.2 Διαστάσεις και φορτίο

Σύμφωνα με την ντιρεκτίβα 96/53/EC της Ε.Ε. [3], καθορίζονται οι μέγιστες διαστάσεις που μπορεί να έχει κάθε όχημα αλλά και ο συνδυασμός διαφόρων οχημάτων. Αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Μέγιστες διαστάσεις οχήματος

Τύπος οχήματος - Διάσταση	Μέγιστη τιμή [m]
Τράκτορας - Μήκος	12
Ημιρυμουλκούμενο - Μήκος	12
Ημιρυμουλκούμενο - Απόσταση μεταξύ σημείο σύζευξης και μπροστά τοίχου	2.04
Ημιρυμουλκούμενο - Απόσταση μεταξύ σημείο σύζευξης και πίσω τοίχου	12
Συνδυασμός: Τράκτορας με ημιρυμουλκούμενο - Μήκος	16.5
Συνδυασμός: Φορτηγό όχημα με ρυμουλκούμενο - Μήκος	18.75
Ύψος	4
Πλάτος	2.55

Πηγή: [3]

Ομοίως καθορίζεται και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε συγκεκριμένο άξονα οχήματος. Έτσι, προκύπτει το συνολικό επιτρεπόμενο βάρος του οχήματος (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Μέγιστο βάρος οχήματος ή φορτίο άξονα

Τύπος οχήματος ή άξονα	Μέγιστο βάρος [τόνους]
Διαξονικός τράκτορας	18
Τριαξονικός τράκτορας	26
Τετραξονικός τράκτορας	32
Συνδυασμός: Τράκτορας με ημιρυμουλκούμενο	40
Συνδυασμός: Φορτηγό με ρυμουλκούμενο	40
Συνδυασμός: Τράκτορας με ημιρυμουλκούμενο όταν το κοντέινερ είναι τύπου ISO 40-foot	44
Μονός άξονας μη κινητήριος	10
Μονός άξονας κινητήριος	11.5
Διπλός άξονας με ενδιάμεση απόσταση $d < 1m$	11
Διπλός άξονας με $1m \leq d < 1.3m$	16
Διπλός άξονας με $1.3m \leq d < 1.8m$	19
Διπλός άξονας με $d \geq 1.8m$	20
Τριπλός άξονας με $d < 1.3m$	21
Τριπλός άξονας με $d \geq 1.3m$	24

Πηγή: [2]

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι το φορτίο ενός άξονα κυμαίνεται από 1 μέχρι 11.5 τόνους. Έτσι, η μετατόπιση του κέντρου μάζας (CoG) του συνολικού οχήματος στο διαμήκη άξονα (άξονας x) μπορεί να φτάσει μέχρι και το 1m λόγω φορτίου. Όπως, όμως, γνωρίζουμε, μετατόπιση του κέντρου μάζας προς τα πίσω σημαίνει και αύξηση της κλίσης της υποστροφής, άρα αύξηση της ευστάθειας του οχήματος.

Σε έναν τράκτορα που χρησιμοποιείται για να τραβάει ένα ημιρυμουλκούμενο συνήθως η κατανομή βάρους είναι περίπου 80-20 μπροστά. Αυτό σημαίνει ότι αν έχει ίδιο βάρος

περίπου 8 τόνους, τότε οι 6.5 τόνοι είναι στον μπροστά άξονα και οι υπόλοιποι 1.5 στον πίσω. Επιπλέον, το μεταξόνιο ανέρχεται συνήθως περί τα 3.7 m.

Στα βαρέα οχήματα καθοριστικό ρόλο για την ευστάθεια του οχήματος παίζει το ύψος του κέντρου μάζας h_{CoG} , καθώς αυτό επηρεάζει τα όρια στα οποία μπορεί να κινηθεί το όχημα προτού ανατραπεί. Πρέπει να τονίσουμε, επίσης, ότι το ύψος του κέντρου μάζας μεταβάλλεται κατά την κίνηση του οχήματος, για παράδειγμα λόγω μετακίνησης του υγρού φορτίου κατά μήκος της δεξαμενής, άρα αλλάζουν και τα όρια πριν την ανατροπή του οχήματος.

2.3 Βαρέα οχήματα μεταφοράς επικίνδυνων εμπορευμάτων

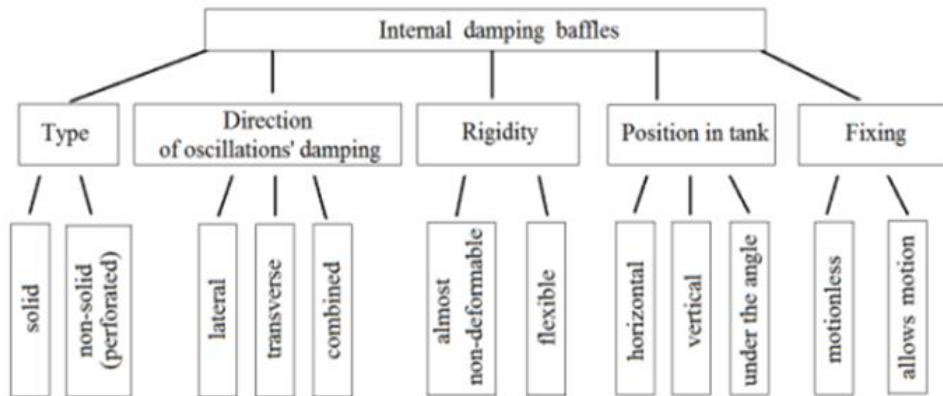
Καταρχάς, τα οχήματα αυτά μπορεί να είναι διαξονικά, τριαξονικά, τετραξονικά ή ένας συνδυασμός τράκτορα και ημιρυμουλκούμενου, το οποίο, όμως, είναι μια δεξαμενή μεταφοράς υγρού. Η δεξαμενή αυτή κατηγοριοποιείται με βάση τα εξής:

- Υλικό κατασκευής
- Μέγιστη πίεση λειτουργίας
- Γεωμετρία κάθετης διατομής
- Γεωμετρία διατομής
- Διαμερισματοποίηση

Οι πιο σύνηθες γεωμετρίες διατομής που χρησιμοποιούνται είναι οι κυκλικές, οι ελλειπτικές και οι κιβωτιοειδείς (Box shaped). Όσον αφορά τις γεωμετρίες κάθετης διατομής, αυτές μπορεί να είναι τετράγωνες, κωνικές και τοξοειδείς.

Αν και θα μπορούσε να προτείνει κανείς την τετράγωνη διατομή καθώς είναι πιο απλή, ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται είναι διότι το κέντρο μάζας του υγρού μετατοπίζεται σημαντικά κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε σχέση με την περίπτωση της κυκλικής διατομής.

Τα περισσότερα οχήματα μεταφοράς υγρών, αν όχι όλα, διαθέτουν ανακλαστήρες απόσβεσης ή αλλιώς διαφράγματα (damping baffles). Αυτά χρησιμοποιούνται προκειμένου να μειωθεί όσο γίνεται η μετακίνηση του φορτίου κατά τον φρενάρισμα και την επιτάχυνση. Έτσι, η μεταβολή της θέσης του κέντρου μάζας δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να δημιουργήσει προβλήματα αστάθειας. Οι ανακλαστήρες απόσβεσης διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Κατηγοριοποίηση διαφραγμάτων [23]

2.4 Ευστάθεια, φαινόμενα αστάθειας και αύξηση ασφάλειας

Η ευστάθεια των βαρέων οχημάτων είναι μια σημαντική παράμετρος, ειδικά όταν πρόκειται για βαρέα οχήματα μεταφοράς επικίνδυνων φορτίων. Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις φαινομένων αστάθειας [2]:

- Απόκλιση πορείας (ημι)ρυμουλκούμενου (Trailer off-tracking-OT): Σε χαμηλές ταχύτητες βασικό πρόβλημα είναι η εκτροπή του ρυμουλκούμενου από την πορεία του οχήματος που το τραβάει κατά την κίνηση του σε κυκλικό τμήμα ακτίνας R . Η εκτροπή αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$OT = R - \sqrt{R^2 - L^2 + KO^2 - KA^2}$$

όπου L : μεταξόνιο, KO : απόσταση σημείου σύνδεσης από τον πίσω άξονα του κινητήριου οχήματος και KA : απόσταση σημείου σύνδεσης από τον πίσω άξονα του ρυμουλκούμενου.

- Οπίσθια ενίσχυση (Rearward amplification): Είναι το πηλίκο των μεγίστων τιμών των εγκάρσιων επιταχύνσεων ή του ρυθμού εκτροπής μεταξύ (τελευταίου) ρυμουλκούμενου και κινητήριου οχήματος. Είναι ένα μέγεθος που μπορεί να υπολογιστεί για παράδειγμα κατά την αλλαγή λωρίδας. Αξίζει να τονίσουμε, βέβαια, ότι ο ρυθμός εκτροπής είναι μια παγκόσμια (global) μεταβλητή ενώ η εγκάρσια επιτάχυνση εξαρτάται από το σημείο μέτρησης αυτής. Στην πράξη, το μέγεθος αυτό αντιπροσωπεύει την διαφορά φάσης μεταξύ κινούμενης μονάδας και ρυμουλκούμενου.

- Ανατροπή (Rollover): Αποτελεί τη πιο συνηθισμένη περίπτωση ατυχήματος στα βαρέα οχήματα, καθώς το κέντρο βάρους δεν βρίσκεται τόσο χαμηλά όπως στα επιβατικά. Κατά συνέπεια, σε περιπτώσεις μεγάλης εγκάρσιας επιτάχυνσης το όχημα γίνεται ασταθές και τείνει προς την ανατροπή.
- Δίπλωμα (Jack-knifing): Στην περίπτωση αυτή το κινητήριο όχημα συγκρούεται με το (ημι)ρυμουλκούμενο εξαιτίας της μεγάλης γωνίας στροφής του τελευταίου. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η τάση των βαρέων οχημάτων να έχουν συμπεριφορά υπερστροφής σε μεγάλες εγκάρσιες επιταχύνσεις.

Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας καθιστά πλέον εφικτό, προφανώς έως ένα βαθμό, την αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας, όπως αυτά που αναφέρθηκαν και παραπάνω. Αρχικά, ελέγχοντας τον ρυθμό περιστροφής (yaw control) και φρενάροντας τον τελευταίο άξονα του (ημι)ρυμουλκούμενου οχήματος (βλ. ESC δηλαδή Electronic Stability Control ή ESP), το δίπλωμα μπορεί να αποφευχθεί. Πρακτικά, αυτό το σύστημα ελέγχου μπορεί να υλοποιηθεί τοποθετώντας έναν ηλεκτροκινητήρα σε κάθε τροχό. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της ανατροπής και, κατά συνέπεια, αύξηση της ανώτερης επιτρεπόμενης ταχύτητας σε στροφές, δηλαδή αύξηση της εγκάρσιας ευστάθειας (lateral stability), είναι ένα σύστημα ελέγχου που εφαρμόζει κατάλληλη ροπή στο (ημι)ρυμουλκούμενο, συνήθως μέσω άσκησης δύναμης πέδησης σε κατάλληλους τροχούς [4]. Η ροπή αυτή, βέβαια, μπορεί να ασκηθεί και μέσω κατάλληλου συστήματος στο σημείο σύνδεσης τράκτορα-(ημι)ρυμουλκούμενο. Η επιλογή ενός ενεργού συστήματος διεύθυνσης στο ημιρυμουλκούμενο (active semi-trailer steering system) είναι, επίσης, μια πρόταση αύξησης της ευστάθειας του συνολικού οχήματος ως προς την ανατροπή (roll stability), η οποία συμβάλλει και στη μείωση της φθοράς των ελαστικών [5].

2.5 Χρήση λογισμικού TruckSim και ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς

Γενικότερα, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βαρέου οχήματος αποτελεί αντικείμενο έρευνας πολλών χρόνων. Είτε αυτό είναι ένα ενιαίο όχημα με πολλούς άξονες (συνήθως μέχρι 4) είτε ένας συνδυασμός τράκτορα και (ημι)ρυμουλκούμενου, η απόκριση του σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όπως το φρενάρισμα σε στροφή και η αλλαγή λωρίδας είναι ένα σημαντικό προς ανάλυση θέμα. Καταλαβαίνει, όμως, κανείς ότι για παράδειγμα ένα όχημα με συνολικά 6 άξονες (3 ο τράκτορας και 3 το (ημι)ρυμουλκούμενο) καθιστά πραγματικά δύσκολη την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς σε μεταβατικές καταστάσεις. Όσο πιο ακριβή είναι τα μοντέλα, τόσο πιο μεγάλο είναι το υπολογιστικό κόστος της έρευνας. Παρόλα αυτά, η χρήση του λογισμικού TruckSim® έδωσε τη δυνατότητα στους ερευνητές να απαλλαχθούν από το πρόβλημα της μοντελοποίησης και της επίλυσης εκατοντάδων εξισώσεων. Έτσι, η πολυπλοκότητα ενός οχήματος δεν αποτελεί αγκάθι, ενώ στο προσκήνιο της έρευνας στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας βαρέων οχημάτων βρίσκεται πλέον η αύξηση της ευστάθειας.

Ο Z. Bai κ.α. πρότειναν μια μέθοδο αύξησης της εγκάρσιας ευστάθειας ενός τράκτορα με ημιρυμουλκούμενο μέσω επιπλέον ροπής εκτροπής στο τελευταίο [6]. Συνδυάζοντας TruckSim® και Matlab/Simulink δημιούργησαν ένα σύστημα ελέγχου το οποίο υπολογίζει την απαιτούμενη ροπή εκτροπής που χρειάζεται το όχημα για να επανέλθει πρακτικά σε σταθερή κατάσταση. Αυτή η ροπή μοιράζεται στους κατάλληλους τροχούς μέσω μηχανικής πέδησης και ηλεκτρονικής διαφορικής πέδησης από κινητήρα ενσωματωμένο στον τροχό. Ο M. Toumi κ.α. ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο ενός βυτιοφόρου το οποίο μεταφέρει υγρό φορτίο και με χρήση TruckSim® επικύρωσαν τα αποτελέσματα των μαθηματικών εξισώσεων [7]. Το μαθηματικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο sloshing, άρα και τη μεταφορά φορτίου (load transfer) κατά την προσομοίωση ενώ το λογισμικό ορίζει ένα ακλόνητο φορτίο (fixed load). Ο C. Cheng κ.α. δημιούργησαν έναν αλγόριθμο ελέγχου (control algorithm) με στόχο την βελτίωση της ευστάθειας ως προς την περιστροφή ενός τράκτορα-ημιρυμουλκούμενου χρησιμοποιώντας ενεργό σύστημα διεύθυνσης στο ημιρυμουλκούμενο [8]. Το σύστημα ελέγχου παίζοντας το ρόλο ενός εικονικού οδηγού στρίβει το ημιρυμουλκούμενο με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση πορείας και η εγκάρσια επιτάχυνση να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων. Παράλληλα, χρησιμοποιείται φίλτρο Karman για τον προσδιορισμό των άγνωστων μεταβλητών κατάστασης που απαιτεί το σύστημα ελέγχου. Το λογισμικό TruckSim® διευκολύνει την όλη προσπάθεια καθώς παρέχει κατευθείαν το μοντέλο του οχήματος. Ο ίδιος δύο χρόνια αργότερα κ. α. αναπτύσσουν ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο 5 βαθμών ελευθερίας που προσδιορίζουν με ακρίβεια παραμέτρους και την κατάσταση ενός συνδυασμού τράκτορα-τρέιλερ [9]. Το λογισμικό υλοποιεί τις απαραίτητες προσομοιώσεις και επαληθεύει τα αποτελέσματα του μοντέλου. Ο T. Xin κ.α. προσδιόρισαν με χρήση TruckSim® αλλά και ενός θεωρητικού μοντέλου τα επιτρεπόμενα όρια ταχύτητας για ένα τετραξονικό όχημα συνολικού βάρους 30 τόνων σε απότομη στροφή προκειμένου αυτό να μην ανατραπεί [10]. Μετά από μια πληθώρα προσομοιώσεων με διαφορετικές συνθήκες στην κάθε μία, για παράδειγμα διαφορετική ταχύτητα ή τροχιά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το όχημα φτάνει στο σημείο της κρίσιμης ανατροπής όταν το περιθώριο για ανατροπή αγγίζει τα 0.15 g. Ο Z. Ma κ.α. παρουσίασαν έναν υπολογιστικό αλγόριθμο βασισμένο στη μη γραμμική εκτίμηση του φίλτρου Karman (UKF), με στόχο τον υπολογισμό της διαμήκους/εγκάρσιας ταχύτητας και των κάθετων δυνάμεων στα ελαστικά ενός βαρέου οχήματος λαμβάνοντας υπόψη την κλίση του οδοστρώματος [11]. Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου, το οποίο συνδυάζεται και με το μοντέλο Pacejka για τον υπολογισμό των μη γραμμικών κάθετων δυνάμεων, επαληθεύονται μέσω του λογισμικού TruckSim®. Ο J. Deng, πηγαίνοντας κόντρα στο συνηθισμένο, προσπάθησε να προσαρμόσει ένα ήδη υπάρχον μοντέλο του λογισμικού σε πειραματικά δεδομένα ενός τράκτορα-τρέιλερ που φρενάρει [12]. Η ταχύτητα κυμαίνεται από 30 μέχρι 60 m/h και οι συνθήκες φρεναρίσματος μεταβάλλονταν, π.χ. τα φρένα κάποιου τροχού ήταν εκτός λειτουργίας. Ο D. Oberoi διεξήγαγε μια έρευνα με στόχο την βελτίωση της συμπεριφοράς και της ευστάθειας βαρέων οχημάτων ως προς την ανατροπή [13]. Βασισμένος σε ένα τρισδιάστατο γραμμικό μοντέλο οχήματος με 5 βαθμούς ελευθερίας σχεδίασε ένα γραμμικό τετραγωνικό ρυθμιστή (LQR). Κατόπιν,

ανέπτυξε μια μέθοδο βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγορίθμους (genetic algorithms) και τη συνδύασε με ένα μοντέλο οχήματος που παρέχει το λογισμικό TruckSim®.

Αντιλαμβάνεται, λοιπόν, κανείς ότι το λογισμικό TruckSim® δημιούργησε νέα μονοπάτια έρευνας στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας καθώς έλυσε το πρόβλημα της μαθηματικής μοντελοποίησης και ανάλυσης των οχημάτων. Ωστόσο, συγκεκριμένα στον τομέα των βαρέων οχημάτων μεταφοράς υγρών, δηλαδή των βυτιοφόρων, η ερευνητική κοινότητα δεν έχει δείξει το αναμενόμενο ενδιαφέρον και προσπάθεια. Ναι μεν τα οχήματα αυτά μπορεί να είναι διαφόρων διαμορφώσεων, δηλαδή τριαξονικό ή τετραξονικό όχημα ή τράκτορας και ημιρυμουλκούμενο πάνω στο οποίο βρίσκεται η δεξαμενή. Ωστόσο, η αλλαγή της δυναμικής συμπεριφοράς λόγω διαφορετικής διατομής δεξαμενής δεν έχει εξεταστεί καταλλήλως. Η αλλαγή της θέσης του κέντρου βάρους παίζει καθοριστικό ρόλο την ευστάθεια του οχήματος. Επομένως, μέσω αυτής της διπλωματικής γίνεται το πρώτο βήμα για τη συσχέτιση των περιθωρίων ασφαλείας ενός βυτιοφόρου μεταφοράς καυσίμων, κυρίως ως προς την ανατροπή, με χρήση λογισμικού TruckSim®, με βάση τη διατομή της δεξαμενής. Με άλλα λόγια, αποδεικνύεται ποια δεξαμενή είναι η καταλληλότερη για το συγκεκριμένο όχημα. Το επόμενο βήμα αυτής έρευνας είναι η προσθήκη του φαινομένου sloshing μέσω μαθηματικού μοντέλου καθώς το TruckSim® δεν δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης φορτίου που μετακινείται.

3. Περιγραφή λογισμικού

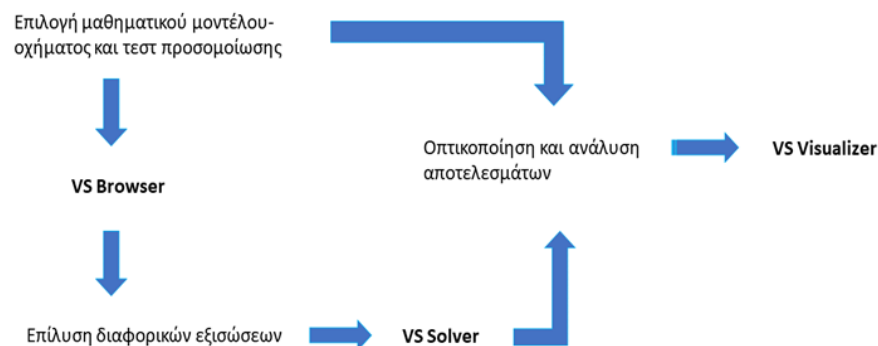
3.1 Γενικά στοιχεία

Το multi-body λογισμικό TruckSim® χρησιμοποιείται για την ανάλυση και μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς βαρέων οχημάτων σε διάφορες συνθήκες και σενάρια μέσω προσομοιώσεων (simulations). Με άλλα λόγια, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα για παράδειγμα να αλλάξει το φορτίο στο τρέιλερ (μάζα, διαστάσεις). Μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιήσει το ίδιο όχημα για την εκτέλεση διαφορετικών προσομοιώσεων σε διπλή αλλαγή λωρίδας, απότομη στροφή και φρενάρισμα σε στροφή.

Έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Mechanical Simulation [14], η οποία έχει και άλλα σχετικά λογισμικά όπως το CarSim και το BikeSim. Η διαμόρφωση όλων των λογισμικών βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική προσομοίωσης, η οποία ονομάζεται VehicleSim (VS), ενώ το λογισμικό αποτελείται από 3 βασικά μέρη:

- VS Browser (GUI)
- VS Solver
- VS Visualizer

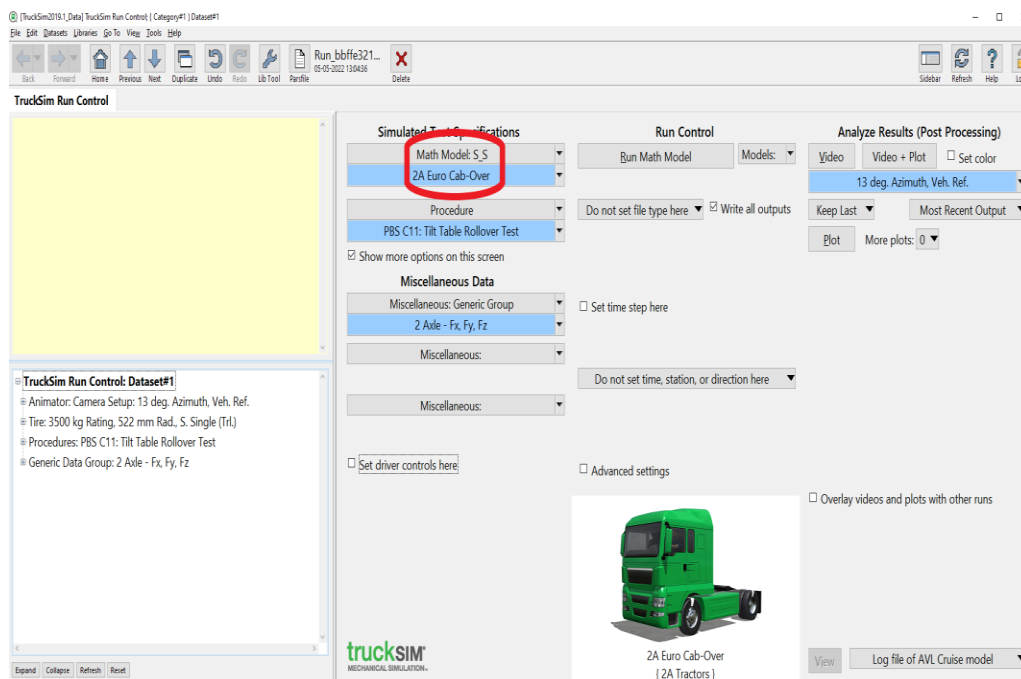
Το λογισμικό χρησιμοποιεί συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (ODE) για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων με βάση τις ενέργειες του οδηγού, το δρόμο και την αεροδυναμική. Οι διαφορικές εξισώσεις ορίζονται στη διεπιφάνεια χρήστη (VS Browser-GUI), επιλύονται στον επιλύτη (VS Solver) και τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται στον VS Visualizer (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Τρόπος λειτουργίας ενός VehicleSim λογισμικού

3.1.1 VS Solver

Ο VS Solver είναι υπεύθυνος για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μαθηματική μοντελοποίηση κάθε φυσικού συστήματος. Η επιλογή του συστήματος εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν, πρακτικά δηλαδή του οχήματος, γίνεται στην αρχική επιφάνεια εργασίας του TruckSim (Run Control) στην ενότητα VS Math Model (Σχήμα 3.2). Καταλαβαίνει, λοιπόν, κανείς ότι κάθε όχημα είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που το περιγράφουν. Πιθανές αλλαγές ή προσθήκες στο μαθηματικό μοντέλο είναι μεν εφικτές, αλλά δεν συστήνονται στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Ο ορισμός του μαθηματικού μοντέλου (math model configuration) γίνεται με τη χρήση ενός αρχείου τύπου Simfile και ενός ή περισσότερων αρχείων τύπου Parsfile, των οποίων η μορφή και το περιεχόμενο αναλύεται παρακάτω.



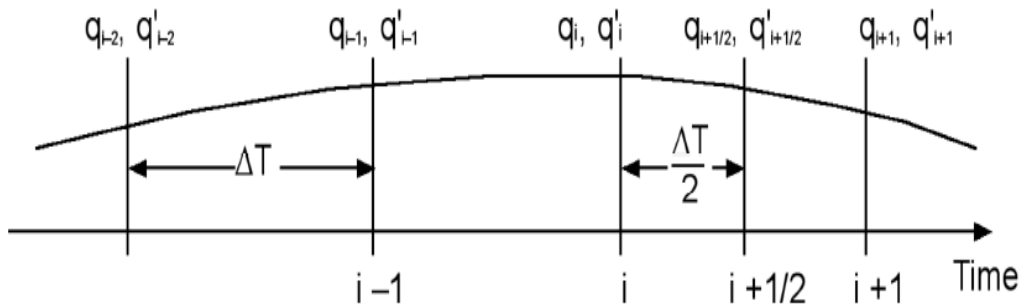
Σχήμα 3.2: Επιλογή μαθηματικού μοντέλου

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται αριθμητικά και οι διαθέσιμες μέθοδοι αριθμητικής ολοκλήρωσης είναι οι εξής:

- Euler 1^{ης} τάξης (Euler)
- Adams-Bashforth 2^{ης} τάξης (AB-2)
- Adams-Moulton 2^{ης} τάξης (AM-2)

- Adams-Moulton 3^{ης} τάξης (AM-3)
- Adams-Moulton 4^{ης} τάξης (AM-4)
- Runge-Kutta 2^{ης} τάξης (RK-2)

Οι πρώτες δύο μέθοδοι υπολογίζουν μια φορά την παράγωγο ανά χρονικό βήμα ΔT . Οι υπόλοιπες μέθοδοι υπολογίζουν δύο φορές την παράγωγο, μία στο μέσο και μία στο τέλος του ΔT (Σχήμα 3.3). Όλες οι μέθοδοι επίλυσης είναι άμεσες (explicit), δηλαδή για την επίλυση των εξισώσεων λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση του συστήματος σε χρόνο μεταγενέστερο σε σχέση με το παρόν. Επίσης, όλες χρησιμοποιούν σταθερό χρονικό βήμα ΔT , όχι όμως απαραίτητα το ίδιο.



Σχήμα 3.3: Πλεγματοποίηση χρονικού διαστήματος [14]

Όσον αφορά στις μεταβλητές που χρησιμοποιεί ο επιλύτης, αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Παράμετροι (Parameters):** Μεταβλητές που ορίζονται στην αρχή, παραμένουν σταθερές κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης π.χ. μάζες και είναι καταγεγραμμένες στα Parsfiles.
- **Μεταβλητές κατάστασης (State variables):** Είναι οι μεταβλητές που ορίζουν την κατάσταση του συστήματος και συνήθως μεταβάλλονται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες, αυτές που υπολογίζονται από την επίλυση διαφορικών εξισώσεων και αυτές που υπακούν μια συνθήκη.

Το λογισμικό TruckSim έχει ως εργαλείο υπολογισμού εξαρτημένων μεταβλητών από ανεξάρτητες κάποιες συναρτήσεις που ονομάζονται Διαμορφούμενες Συναρτήσεις (Configurable Functions). Μια τέτοια συνάρτηση μπορεί να είναι μια μεταβλητή π.χ. η σταθερά ελατηρίου μιας ανάρτησης, ένας πίνακας ή μια εξίσωση. Τέλος, η εκτέλεση του VS Solver δημιουργεί δύο αρχεία. Το πρώτο είναι τύπου VS Echo file (..._echo.par) και περιέχει

την αρχική κατάσταση του συστήματος. Το δεύτερο είναι τύπου VS End file (..._end.par) και περιέχει την τελική κατάσταση.

3.1.2 VS Browser (GUI)

Ο VS Browser είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του λογισμικού και του χρήστη. Μέσω αυτής της διεπιφάνειας, ο χρήστης μπορεί να αλληλοεπιδρά με το λογισμικό κάνοντας ρυθμίσεις και να εξάγει συμπεράσματα βάσει των αποτελεσμάτων. Ο VS Browser βασίζεται σε συγκεκριμένη βάση δεδομένων (VS Database), η οποία έχει 3 επίπεδα:

1. Σύνολο δεδομένων (Dataset)
2. Βιβλιοθήκη (Library)
3. Βάση δεδομένων (Database)

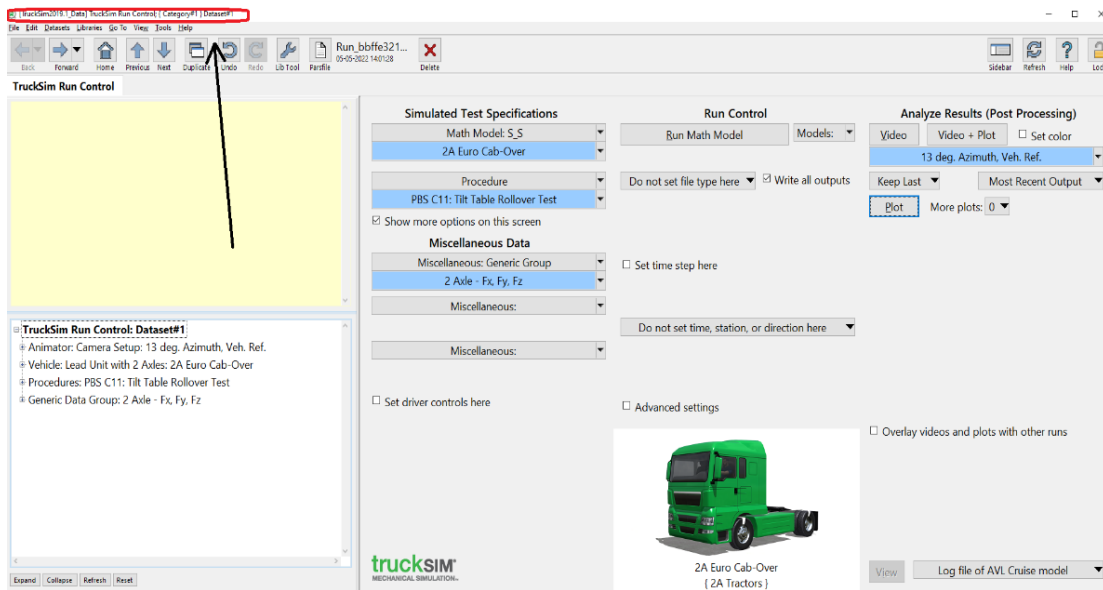
Ως σύνολο δεδομένων ορίζεται ένα σύνολο πληροφοριών π.χ. ένας συγκεκριμένος τύπος ελαστικού, οι οποίες πληροφορίες αποθηκεύονται σε ένα αρχείο τύπου Parsfile. Κάθε σύνολο δεδομένων χαρακτηρίζεται από δύο στοιχεία, την κατηγορία (Category) στην οποία ανήκει και τον τίτλο (Dataset title).

Ως Βιβλιοθήκη ορίζεται ένα σύνολο πολλών συνόλων δεδομένων π.χ. Βιβλιοθήκη ελαστικών.

Ως Βάση δεδομένων ορίζεται ένα σύνολο πολλών βιβλιοθηκών και εμπεριέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την υλοποίηση μιας προσομοίωσης.

Επιπλέον, μέσω της επιφάνειας του VS Browser και συγκεκριμένα μέσω του τίτλου πάνω αριστερά (Σχήμα 3.4) μπορεί κανείς να βρει ολόκληρο το μονοπάτι (path) ενός συνόλου δεδομένων. Εκεί αναγράφεται:

[Database] Library; {*Category} Dataset title



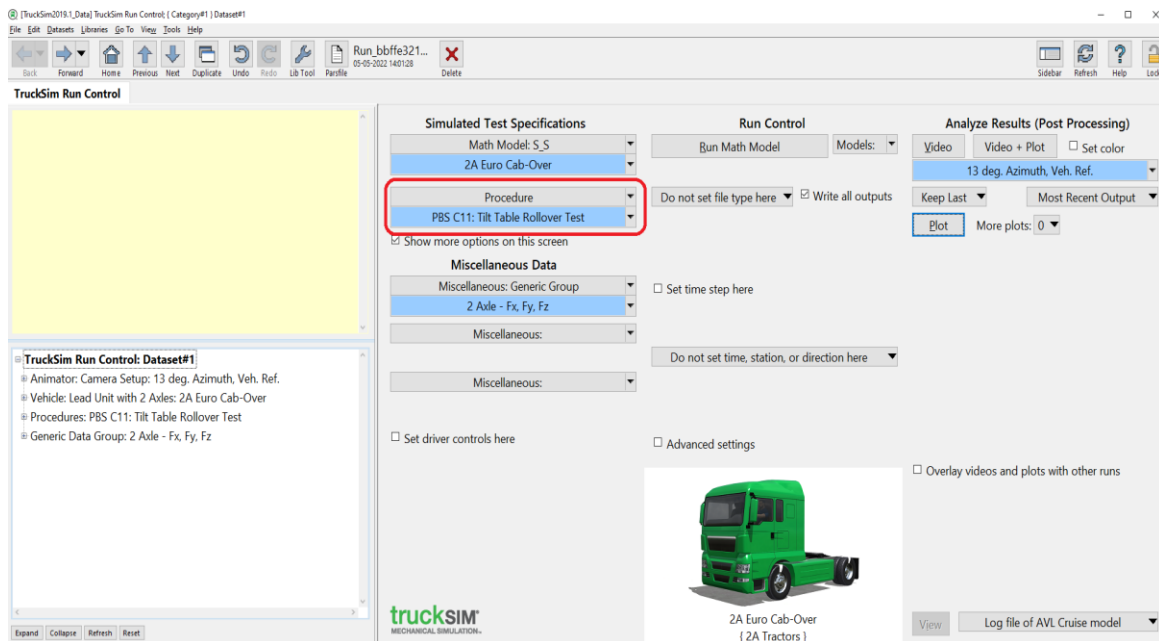
Σχήμα 3.4: Πλήρης χαρακτηρισμός ενός dataset

Πρέπει να σημειωθεί ότι το dataset που βλέπει ο χρήστης στην διεπιφάνεια TruckSim Run Control είναι συνδεδεμένο με πολλά άλλα. Η σύνδεση αυτή φαίνεται μέσω των μπλε πεδίων.

Τα κύρια βήματα της προσομοίωσης, έτσι όπως αυτά υποδεικνύονται από τον κατασκευαστή [14], είναι:

- 1) Εκκίνηση του επιλεγμένου VS Solver (Load the VS Solver)
- 2) Αρχικοποίηση
- 3) Εκτέλεση προσομοίωσης
- 4) Τερματισμός προσομοίωσης
- 5) Τερματισμός του VS Solver (Unload the VS Solver)

Σημαντικό είναι ο χρήστης να καταλάβει τη διαφορά μεταξύ database, library και dataset. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η βάση δεδομένων του TruckSim® περιέχει βαρέα οχήματα διαφορετικών τύπων και σενάρια οδήγησης με καθορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία όμως μπορούν να τροποποιηθούν από το χρήστη. Ο όρος «σενάριο οδήγησης» είναι γενικός και αναφέρεται σε όλα τα datasets που παρέχονται από το λογισμικό μέσω του Library «Procedure» (Σχήμα 3.5). Πρόκειται για πειραματικές διαδικασίες π.χ. ανατρεπόμενη τράπεζα (Tilt table), συνθήκες οδήγησης π.χ. Διπλή αλλαγή λωρίδας με σταθερή ταχύτητα 40 km/h, δοκιμές ευστάθειας, οδήγηση εντός πόλης και πολλά άλλα.



Σχήμα 3.5: Επιλογή Dataset για το σενάριο οδήγησης

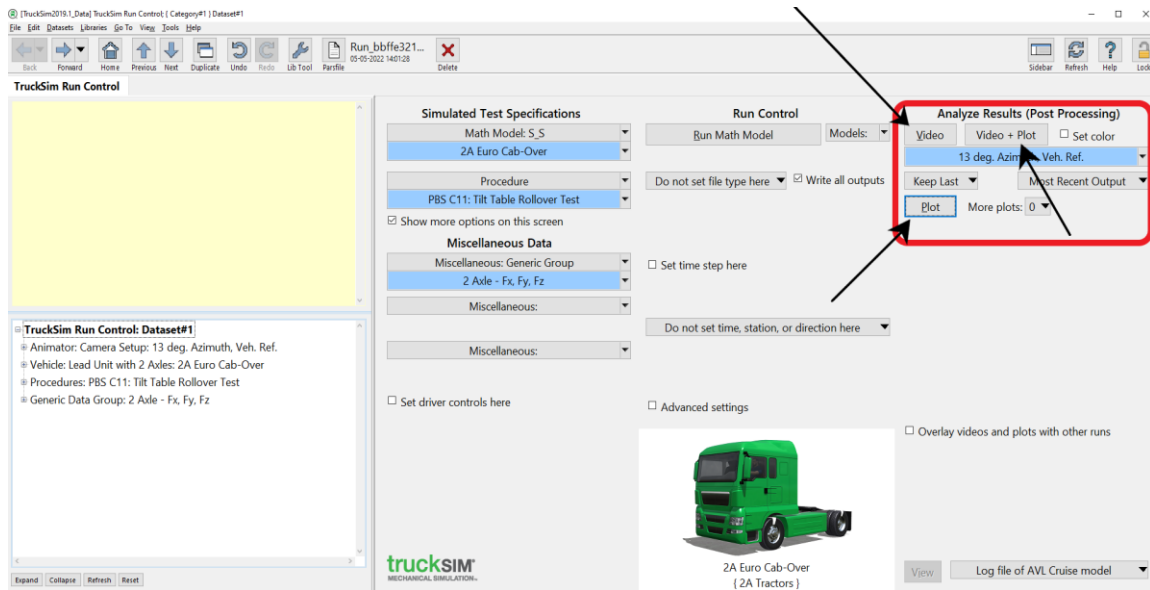
Η προσομοίωση μέσω του λογισμικού TruckSim είναι μια εύκολη και γρήγορη διαδικασία. Το δύσκολο κομμάτι έγκειται στην εκ των προτέρων σωστή οργάνωση όλων των στοιχείων.

3.1.3 VS Visualizer

Ο VS Visualizer είναι υπεύθυνος για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων είτε με τη μορφή διαγραμμάτων είτε με τη μορφή βίντεο. Συνήθως, χρησιμοποιείται μετά το πέρας της προσομοίωσης, δηλαδή τα αποτελέσματα που οπτικοποιεί αναφέρονται σε μια ολοκληρωμένη προσομοίωση (post-processing visualization). Ωστόσο, μπορεί κανείς να το χρησιμοποιήσει και σε προσομοιώσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη, αρκεί να το τροφοδοτεί συνεχώς με τα απαραίτητα δεδομένα (live feed of motion information). Σε αυτή την περίπτωση, όμως, οι δυνατότητες του VS Visualizer περιορίζονται.

Ο χρήστης έχει πρόσβαση στο VS Visualizer μέσω της αρχικής οθόνης (Run control) και οι επιλογές που δίνονται είναι οι εξής (Σχήμα 3.6)

- Μόνο βίντεο (Video)
- Μόνο διαγράμματα (Plot)
- Βίντεο και διαγράμματα (Video + Plot)



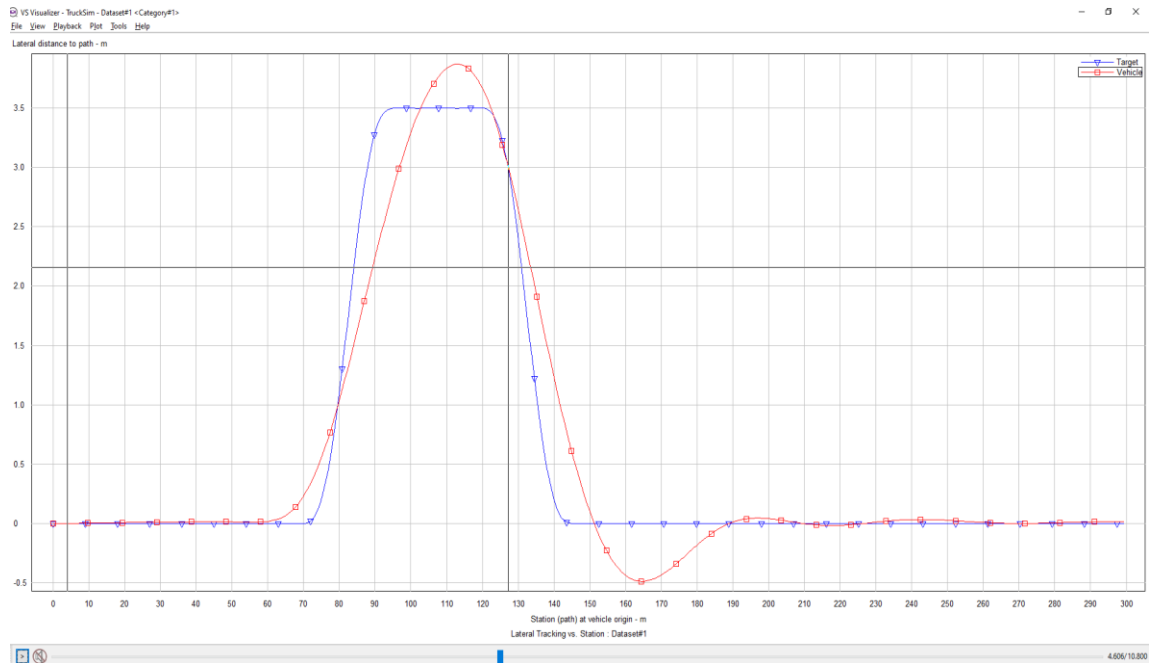
Σχήμα 3.6: Διαθέσιμες επιλογές στο Visualizer

Πατώντας το κουμπί 'Video' εμφανίζεται μόνο το βίντεο προσομοίωσης, δηλαδή το όχημα που εκτελεί μια κίνηση σε δεδομένο χρονικό διάστημα (Σχήμα 3.7). Η κάμερα βρίσκεται σε θέση που καθορίζεται από τον χρήστη. Ο χρήστης μπορεί να μεγεθύνει ή να αλλάξει την οπτική γωνία κάνοντας τους απαραίτητους χειρισμούς.



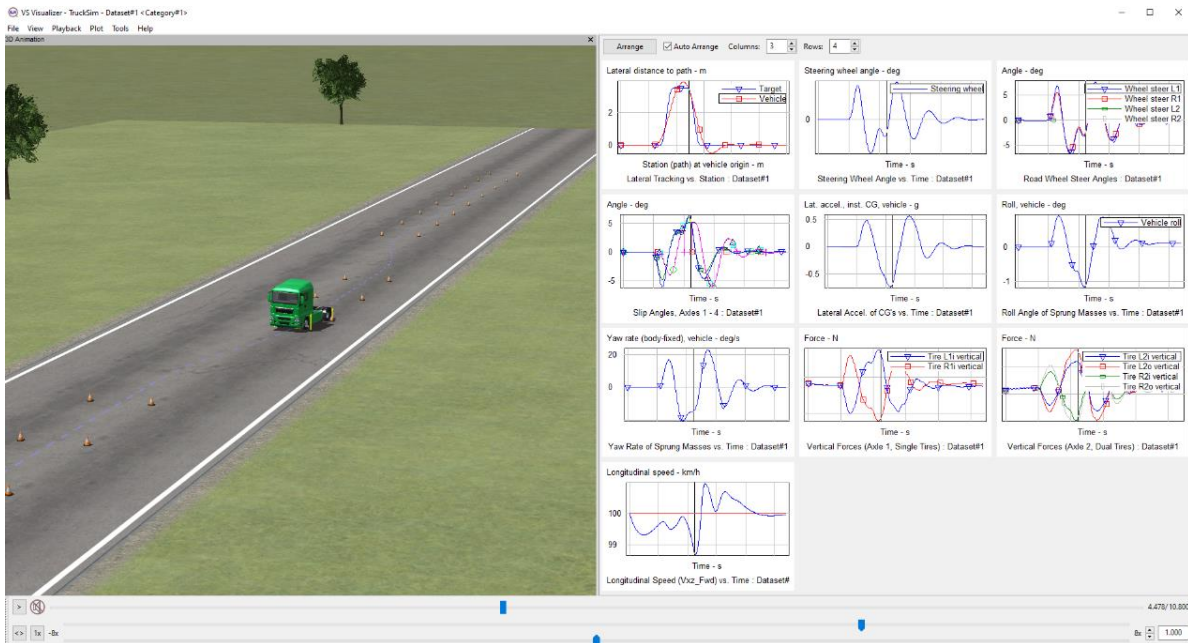
Σχήμα 3.7: Στιγμιότυπο από ένα βίντεο προσομοίωσης

Πατώντας το κουμπί 'Plot' εμφανίζονται μόνο διαγράμματα συγκεκριμένων μεταβλητών (Σχήμα 3.8). Η κάθετη μαύρη γραμμή που υπάρχει σε όλα τα διαγράμματα δείχνει την χρονική στιγμή που απεικονίζεται στο βίντεο. Προφανώς, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης/αφαίρεσης διαγραμμάτων.



Σχήμα 3.8: Εγκάρσια μετατόπιση οχήματος - Με κόκκινο η πραγματική με μπλε η ζητούμενη

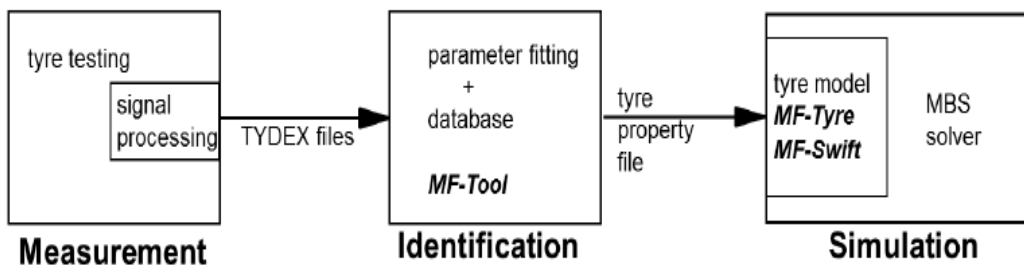
Τέλος, το κουμπί 'Video+Plot' εμφανίζει στο ίδιο παράθυρο (Σχήμα 3.9) το όχημα και δίπλα, ταυτόχρονα, μπορεί κανείς να μελετήσει την εξέλιξη του φαινομένου μέσω των αντίστοιχων διαγραμμάτων.



Σχήμα 3.9: Συνδυασμός βίντεο και διαγραμμάτων

3.2 Μοντελοποίηση ελαστικών

Η μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ οχήματος-ελαστικού-δρόμου γίνεται μέσω του συστήματος TNO Delft-Tyre [15]. Η τρόπος με τον οποίο υλοποιείται η ανάλυση αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Ανάλυση μοντέλου TNO Delft-Tyre [15]

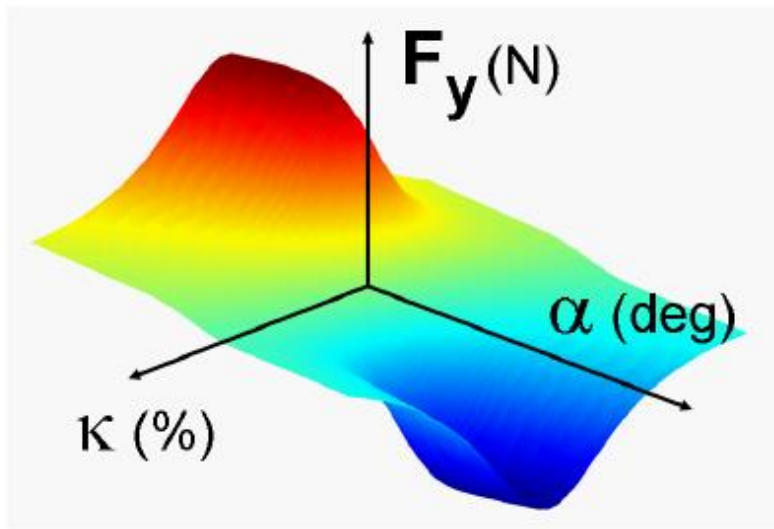
Υπάρχουν δύο διαθέσιμα μοντέλα ελαστικών, το MF-Tyre και το MF-Swift. Η θεμελιώδης διαφορά τους είναι ότι το δεύτερο λαμβάνει υπόψη τη μάζα και τη ροπή αδράνειας της ζώνης του ελαστικού (Tyre belt). Με άλλα λόγια, η ζώνη θεωρείται ένα ξεχωριστό σώμα, το οποίο όμως είναι άκαμπτο. Για αυτό, το μοντέλο ελαστικών MF-Swift λειτουργεί με ακρίβεια σε συχνότητες στις οποίες η κάμψη της ζώνης του ελαστικού μπορεί να αμεληθεί (μέχρι τα 100 Hz). Ωστόσο, και τα δύο μοντέλα αποτελούν την τεχνολογικά πιο πρόσφατη υλοποίηση του μοντέλου ελαστικών Pacejka's 'Magic Formula'.

3.2.1 MF -Tyre

Με το μοντέλο ελαστικού MF-Tyre διεξάγονται οι προσομοιώσεις που αναφέρονται σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Πρόκειται για ένα μοντέλο ελαστικού με ευρεία χρήση καθώς είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις που εξετάζουν τον χειρισμό του οχήματος (vehicle handling), τη δημιουργία πρωτοτύπων ελέγχου (control prototyping) και τον έλεγχο ως προς την ανατροπή (rollover analysis).

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων και των ροπών (Σχήμα 3.11) το μοντέλο χρειάζεται τα εξής δεδομένα:

- Διαμήκης ολίσθηση κ (%)
- Εγκάρσια ολίσθηση α (sideslip angle)
- Ολίσθηση στροφής (Turn slip)
- Γωνία κλίσης τροχού (wheel inclination or camber angle)
- Κάθετη δύναμη στο ελαστικό F_z

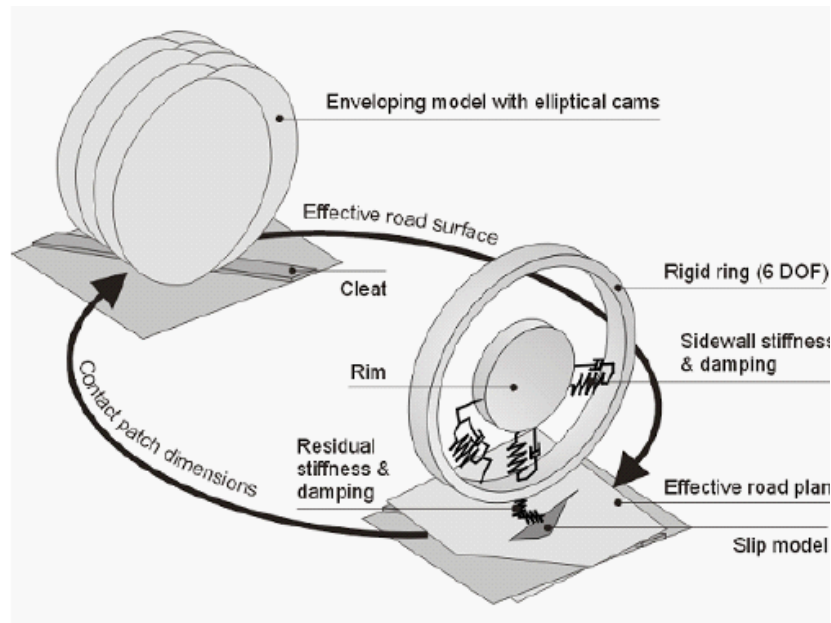


Σχήμα 3.11: Εγκάρσια δύναμη ελαστικού σε μόνιμη κατάσταση ως συνάρτηση της διαμήκουσ και εγκάρσιας ολίσθησης [15]

Τόσο η διαμήκης ολίσθηση, όσο και η εγκάρσια, είναι μεταβλητές που υπολογίζονται από το λογισμικό κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, η εγκάρσια ολίσθηση (ή αλλιώς γωνία β) υπολογίζεται με βάση τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το όχημα. Η διαδρομή δίνεται από τον χρήστη ως είσοδο. Η γωνία ορίζεται μεταξύ της διαμήκους ταχύτητας του οχήματος και της τροχιάς κίνησης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

3.2.2 MF Swift

Με το μοντέλο ελαστικού MF-Swift προσομοιώνεται η δυναμική συμπεριφορά του ελαστικού σε συχνότητες μέχρι τα 100 Hz. Πρόκειται για ένα μοντέλο ελαστικού που είναι πολύ χρήσιμο όταν ερευνάται η άνεση του οχήματος κατά την οδήγηση, η διάρκεια ζωής του ελαστικού αλλά και η ανάλυση κραδασμών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελεί μια επέκταση του μοντέλου MF-Tyre, καθώς η ζώνη ελαστικού λαμβάνεται υπόψη και θεωρείται ένα άκαμπτο σώμα. Για τη μοντελοποίηση της ζώνης χρησιμοποιείται το μοντέλο ενός άκαμπτου δακτυλίου (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12: Γραφική απεικόνιση του μοντέλου MF-Swift [15]

3.3 Γενική περιγραφή διαδικασιών προσομοίωσης στη δυναμική οχημάτων και στο λογισμικό TruckSim®

- **Διπλή αλλαγή λωρίδας ή Double Lane Change** (TruckSim® Path: Procedure → Handling tests): Πρόκειται για μία από τις πιο συνηθισμένες δοκιμές. Σε πραγματικές συνθήκες αντιπροσωπεύει καταστάσεις όπως για παράδειγμα όταν ο οδηγός κάνει

μια προσπέραση και επιστρέφει στη λωρίδα του. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τις ενέργειες του οδηγού όσον αφορά το πάτημα του γκαζιού και τις επιταχύνσεις. Συνήθως, επειδή εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός βαρέος οχήματος, επιλέγεται σταθερή ταχύτητα. Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος. Προφανώς, μπορεί κανείς να προσθέσει και πολλά άλλα μέσω της επιλογής ‘Miscellaneous’.

- **Απότομη στροφή ή Step Steering** (TruckSim® Path: Procedure → Steering tests): Κατά την δοκιμή αυτή ο οδηγός στρίβει το τιμόνι σε πολύ μεγάλες γωνίες π.χ. 180° πολύ απότομα (σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο). Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος.
- **Αλλαγή λωρίδας ή Lane Change** (TruckSim® Path: Procedure → Stability tests → ISO Lane change 14791): Κατά την δοκιμή αυτή ο οδηγός στρίβει με τέτοιο τρόπο ώστε το όχημα να μετατοπιστεί ως προς την εγκάρσια διεύθυνση. Έτσι μεταβάλλονται ταυτόχρονα Χ και Υ συντεταγμένες. Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος.
- **Στροφή σταθερής κατάστασης** (TruckSim® Path: Procedure → Handling tests → ISO Steady state Circle Series): Κατά την δοκιμή αυτή, το όχημα αρχικά κινείται με ταχύτητα 3 km/h σε κυκλική πορεία ακτίνας 100 m. Στη συνέχεια, αυξάνει την ταχύτητα λόγω αύξησης της ζητούμενης εγκάρσιας επιτάχυνσης. Τα στάδια αυτής της προσομοίωσης αναλύονται πιο διεξοδικά παρακάτω. Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος.
- **Στροφή σταθερής ακτίνας ή U-turn** (TruckSim® Path: Procedure → Stability tests → ‘500 m Straight, 45.72 m Left Turn’): Κατά την δοκιμή αυτή, το όχημα αρχικά κινείται σε ευθεία γραμμή για 500 m, ενώ στη συνέχεια συναντά μια στροφή σταθερής ακτίνας 45.72 m και γωνίας 180°, πρακτικά δηλαδή μια αναστροφή. Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος.
- **Στροφή 360° ή SPW₃₆₀** : Κατά την δοκιμή αυτή, το όχημα μπαίνει σε μια κυκλική πορεία σταθερής ακτίνας κατά την οποία και ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή,

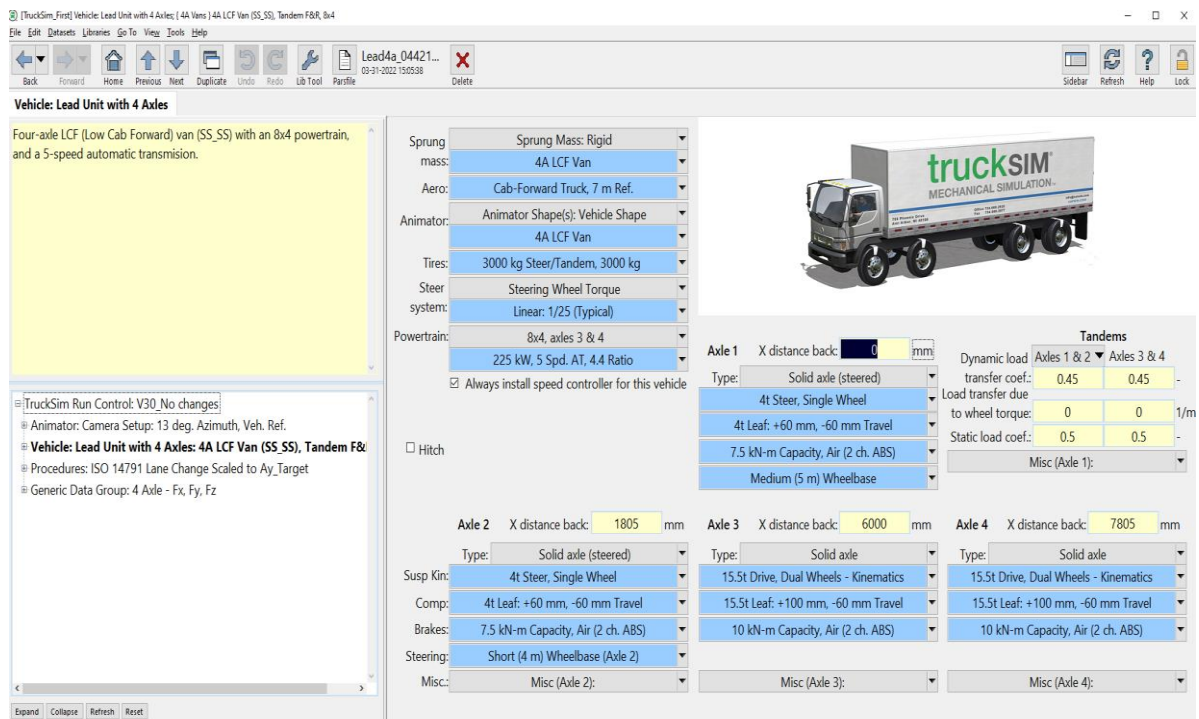
δηλαδή γωνία 360°. Προφανώς, η ταχύτητα του οχήματος είναι κάτι που καθορίζεται από τον χρήστη, καθώς μπορεί να είναι σταθερή, αυξανόμενη ή ακόμα και μειούμενη. Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος.

- **Αποφυγή εμποδίου ή obstacle avoidance:** Πρόκειται για μια αρκετά ρεαλιστική δοκιμή κατά την οποία ο οδηγός καλείται ξαφνικά να αποφύγει ένα εμπόδιο π.χ. μια σύγκρουση οχημάτων. Για μια ολοκληρωμένη προσομοίωση, εκτός από την ταχύτητα, αρκεί να ορίσει κανείς τρία βασικά πράγματα: 1) Τον έλεγχο των φρένων 2) Τις αλλαγές ταχυτήτων και 3) Τον έλεγχο του τιμονιού, δηλαδή την πορεία του οχήματος.

4. Διερεύνηση δυναμικής συμπεριφοράς τετραξονικού φορτηγού οχήματος με φορτίο ορθογωνικής διατομής

4.1 Μοντέλο οχήματος

Το όχημα που επιλέχθηκε υπάρχει στη βάση δεδομένων του TruckSim®, είναι τετραξονικό και είναι το 4A LCF Van(SS_SS), Tandem F&R, 8x4 (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Τετραξονικό όχημα προσομοιώσεων

Όσον αφορά την αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα (sprung/unsprung mass), επιλέγονται τα εκ των προτέρων ορισμένα χαρακτηριστικά από το λογισμικό (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα οχήματος (χωρίς φορτίο)

Αναρτημένη μάζα	4455 kg
Κέντρο μη αναρτημένης μάζας	(X, Y, Z) = (1175, 0, 1115) από την αρχή των αξόνων της αναρτημένης μάζας
Μη αναρτημένη μάζα [kg]	
Διευθυντήριοι άξονας	174
Κινητήριοι άξονας	603
Ελαστικό (Διεύθυνση)	91
Ελαστικό (Κίνηση)	91
Συνολική μη αναρτημένη μάζα	2646 kg

Οι δύο εμπρόσθιοι άξονες είναι διευθυντήριοι και έχουν ονομαστική τεχνική ικανότητα 4t (Τύπου GAWR). Οι δύο οπίσθιοι είναι κινητήριοι, έχουν ονομαστική τεχνική ικανότητα 15.5t και τα ελαστικά τους είναι διπλά, δηλαδή δύο από κάθε πλευρά. Τέλος, στα χαρακτηριστικά των αναρτήσεων δεν έγιναν αλλαγές (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Μηχανικές ιδιότητες αναρτήσεων

Άξονας	Σταθερά ελατηρίου [N/mm]	Ρυθμός απόσβεσης [kN/(m/s)]	Τεχνική ικανότητα [τόνοι]	Απόσταση από την αρχή [mm]
1 - Διευθυντήριοι	200	10	4	0
2 - Διευθυντήριοι	200	10	4	1805
3 - Κινητήριοι	700	30	15.5	6000
4 - Κινητήριοι	700	30	15.5	7805

Όσον αφορά τις αποστάσεις των αξόνων, η αρχή ορίζεται στο κέντρο του άξονα 1.

Ο κινητήρας του οχήματος είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσης πετρελαίου με ονομαστική ισχύ 225 kW στις 2100 rpm. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι αυτόματο με 5 σχέσεις, η αλλαγή των ταχυτήτων γίνεται στις 2100 rpm και έχει διάρκεια 0.25 s

4.2 Φορτίο οχήματος

Το εκ των προτέρων ορισμένο φορτίο του τετραξονικού φορτηγού οχήματος είναι ένα κιβώτιο ορθογωνικής διατομής. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του.

The screenshot shows the TruckSim software interface for configuring a box-shaped payload. The main window displays a 3D model of a red box on a grey truck chassis. The box has a length of 4500 mm, a width of 1300 mm, and a height of 1800 mm. The mass center of the load is marked with a red dot. The origin of the sprung mass coordinate system is at the front axle for motor vehicles and at the hitch for trailers. The Y coordinate of the payload center of gravity is 0 mm relative to the vehicle centerline. The X coordinate of the origin is 0 mm. The mass of the load is 6789 kg. The calculated properties are as follows:

Calculated Properties	
Height of box CG:	1800.00 mm
Roll Inertia (Ixx):	2828.75 kg-m ²
Pitch Inertia (Iyy):	5657.50 kg-m ²
Yaw Inertia (Izz):	7354.75 kg-m ²

Additional information from the interface includes: "All dimensions and coordinates are in millimeters", "Animator: Camera Setup: 13 deg. Azimuth, Veh. Ref.", "Vehicle: Lead Unit with 4 Axles: 4A LCF Van (SS_SS), Tandem F&R, 8x", "Procedures: DLC @ 70 km/h (Ten Point Preview)", and "Generic Data Group: 4 Axle - Fx, Fy, Fz".

Σχήμα 4.2: Στοιχεία εκ των προτέρων ορισμένου φορτίου (default payload) οχήματος

4.3 Σενάρια οδήγησης και επικύρωση μοντέλου λογισμικού

Τα σενάρια οδήγησης που θα αναλυθούν στη συνέχεια είναι:

1. Δοκιμή ανατρεπόμενης τράπεζας
2. Αλλαγή λωρίδας
3. Διπλή αλλαγή λωρίδας
4. Πέδηση σε στροφή και
5. Στροφή μόνιμης κατάστασης

Σε όλα τα παραπάνω σενάρια, εκτός, προφανώς, της δοκιμής σε ανατρεπόμενης τράπεζα, το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα. Εξάιρεση, επίσης, αποτελεί η τελευταία προσομοίωση κατά την οποία η ταχύτητα σταδιακά αυξάνει. Ο συντελεστής τριβής στα ελαστικά θεωρείται ίσος με 1, ενώ ο συντελεστής πρόσφυσης ίσος με 0.85. Επιπλέον, δεν έγινε αλλαγή στη διαδρομή (path) που ορίζει το λογισμικό ή στον τρόπο αλλαγής των ταχυτήτων (shifting control) για κάθε προσομοίωση.

Όσον αφορά το σύστημα συντεταγμένων, αυτό είναι οχηματοπαγές, δηλαδή το κέντρο των αξόνων x , y , z βρίσκεται στο κέντρο βάρους του οχήματος, και παραμένει σταθερό σε κάθε προσομοίωση. Ο άξονας x είναι ο διαμήκης άξονας του οχήματος, ο άξονας y είναι ο εγκάρσιος άξονας και ο άξονας z ο κατακόρυφος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

4.3.1 Ανατρεπόμενη τράπεζα (Tilt table)

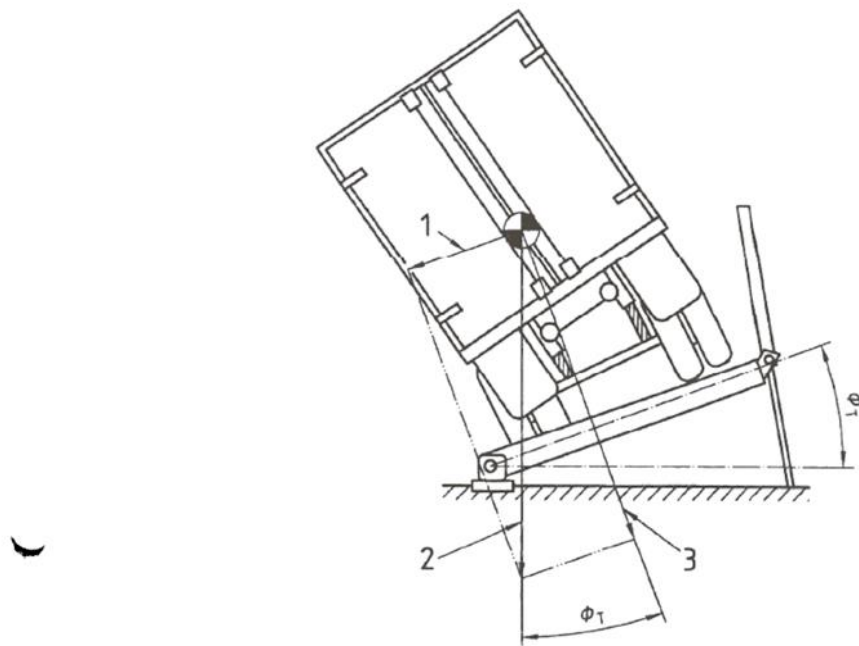
Η προσομοίωση της ανατρεπόμενης τράπεζας γίνεται μέσω της επιλογής: Procedure → PBS C11: Tilt Table Rollover Test. Πρόκειται για μία από πιο τις τυπικές στατικές μεθόδους ελέγχου της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βαρέου οχήματος. Με τη χρήση αυτής εκτιμάται η ασφάλεια του βαρέου οχήματος έναντι ανατροπής. Υπολογίζεται η οριακή κατάσταση που μπορεί να βρεθεί το όχημα προτού ανατραπεί σε μόνιμη κατάσταση (steady state rollover threshold). Με άλλα λόγια, υπολογίζεται η μέγιστη εγκάρσια επιτάχυνση που μπορεί να δεχθεί το όχημα σε στροφή μόνιμης κατάστασης (steady state turning) προτού ανατραπεί [16].

Κατά τη δοκιμή, το όχημα τοποθετείται επάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια η οποία σταδιακά αυξάνει την κλίση της (tilt angle) ως προς το κατακόρυφο επίπεδο. Όσο, όμως, αυξάνεται η κλίση τόσο μειώνεται η ακρίβεια των εκτιμήσεων. Ταυτόχρονα, η συνεχώς αυξανόμενη κλίση δημιουργεί ένα αίσθημα ανασφάλειας και κινδύνου ανατροπής του οχήματος με αποτέλεσμα τη μερική ή και ολική καταστροφή του. Έτσι, εφαρμόζονται κατάλληλα μέτρα ασφαλείας ώστε να αποφευχθεί η ανατροπή του οχήματος όταν αυτό φτάσει στην οριακή κατάσταση.

Ως κρίσιμη ανύψωση τροχού (critical wheel lift) ορίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία ένας ή περισσότεροι τροχοί χάνουν την επαφή τους με το έδαφος με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται η ισορροπία του οχήματος ως προς την ανατροπή. Ως κρίσιμη γωνία κλίσης (critical tilt angle) ορίζεται η γωνία κατά την οποία λαμβάνει χώρα η κρίσιμη ανύψωση τροχού. Προκειμένου, όμως, να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή που το όχημα ανατρέπεται, βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων, πρέπει να βρεθεί η στιγμή που όλοι οι τροχοί της μιας πλευράς χάνουν την επαφή με την ανατρεπόμενη επιφάνεια. Με άλλα λόγια, η ανατροπή έπεται της κρίσιμης ανύψωσης τροχού.

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η δοκιμή αυτή προσομοιώνει τη στροφή του οχήματος σε μόνιμη κατάσταση. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης το όχημα δέχεται μια κεντρομόλο δύναμη και μία δύναμη από το έδαφος λόγω βάρους. Έτσι και εδώ, η συνιστώσα του

βάρους που είναι παράλληλη στην επιφάνεια εκπροσωπεί την κεντρομόλο ενώ η άλλη το βάρος (Σχήμα 4.3).



Key

- 1 simulated centrifugal force = $m \cdot g \cdot \sin(\phi_T)$
- 2 actual weight = $m \cdot g$
- 3 simulated weight = $m \cdot g \cdot \cos(\phi_T)$

Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της προσομοίωσης «Ανατρεπόμενη τράπεζα»

Το κύριο μέγεθος που αντικατροπτίζει την τάση του οχήματος προς την ανατροπή είναι το πηλίκο της κεντρομόλου δύναμης προς την κάθετη. Όσο αυτό τείνει στο μηδέν, το όχημα

τείνει προς την ανατροπή. Έτσι, υπολογίζεται το πηλίκο τη στιγμή που συμβαίνει η κρίσιμη ανύψωση τροχού σύμφωνα με την εξίσωση:

$$TTR = \tan(\varphi_{T_c}) = \frac{m * g * \sin(\varphi_{T_c})}{m * g * \cos(\varphi_{T_c})} \quad (1)$$

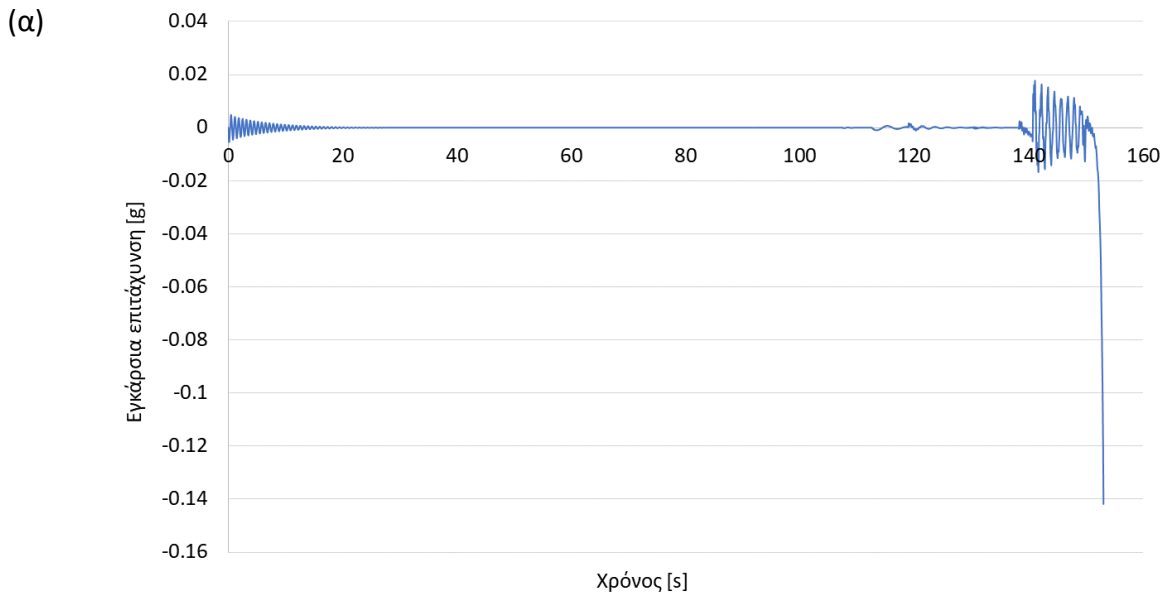
Ο λόγος ανατρεπόμενης επιφάνειας (Tilt-table ratio ή TTR) είναι η εκτίμηση για την οριακή κατάσταση του οχήματος ως προς την ανατροπή ή αλλιώς για τη μέγιστη εγκάρια επιτάχυνση εκφρασμένη σε μονάδες βαρύτητας.

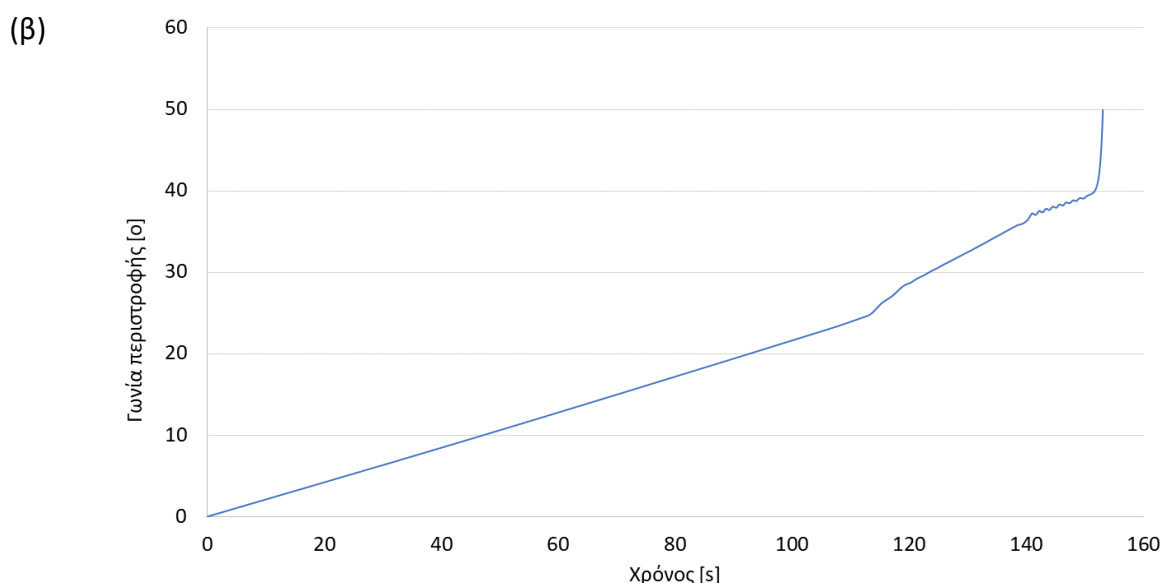
Οι προκαθορισμένες συνθήκες προσομοίωσης σύμφωνα με το λογισμικό TruckSim® είναι:

- Σταθερή μηδενική ταχύτητα
- Σταθερή πίεση στον κεντρικό κύλινδρο (Master cylinder) = 3 MPa
- Καμία σχέση μετάδοσης σε σύμπλεξη, δηλαδή «νεκρά».
- Μηδενική γωνία στροφής στο τιμόνι

Γενικότερα, ένας ρυθμός αύξησης της γωνίας ίσος με 1° ή $2^\circ/s$ είναι κατάλληλος για έλεγχο. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO16333 [16], ο απόλυτος ρυθμός αύξησης της γωνίας κλίσης δεν πρέπει να ξεπερνά τις $0.05^\circ/s$. Προκειμένου, όμως, να εξεταστεί η ψευδο-στατική κατάσταση του οχήματος αλλά και να επιταχυνθεί η εκτέλεση των προσομοιώσεων επιλέγεται ρυθμός αύξησης ίσος με $0.2^\circ/s$.

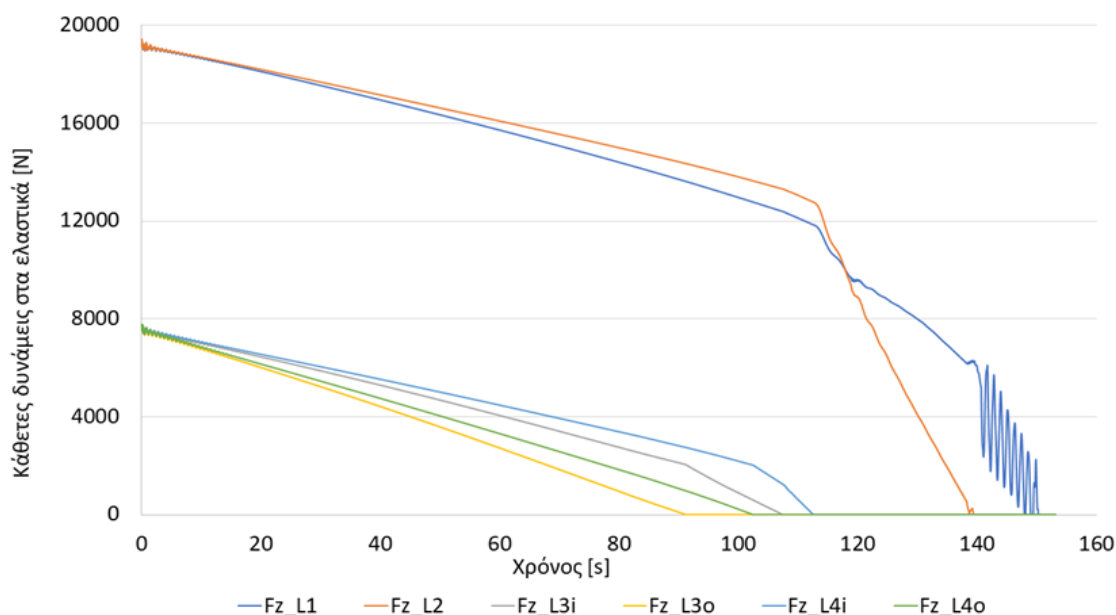
Η καταγραφή αποτελεσμάτων διακόπτεται όταν η γωνία περιστροφής του οχήματος φτάσει τις 50° .





Σχήμα 4.4: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση και (β)Γωνία περιστροφής του οχήματος σε ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό $0.2^\circ/s$

Πράγματι, λοιπόν, η προσομοίωση της ανατρεπόμενης τράπεζας αναφέρεται σε μόνιμη κατάσταση οχήματος καθώς η εγκάρσια επιτάχυνση παραμένει σταθερή (Σχήμα 4.4 (α)). Η μικρής διάρκειας ταλάντωση στην αρχή της προσομοίωσης οφείλεται στην προσπάθεια σύγκλισης του λογισμικού κατά την αρχικοποίηση. Στα τελευταία 10 s πριν την ανατροπή παρατηρεί κανείς, επίσης, μια μεγαλύτερη ταλάντωση λόγω υπολογιστικού σφάλματος καθώς πολλοί τροχοί έχουν ήδη χάσει την επαφή με το έδαφος. Μια αντίστοιχη ανωμαλία εμφανίζεται και στο Σχήμα 4.4(β). Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται ο τερματισμός της προσομοίωσης όταν η γωνία περιστροφής φτάσει τις 50° . Βέβαια, η ανατροπή, δηλαδή η απώλεια επαφής όλων των τροχών με την τράπεζα, έχει συμβεί αρκετά νωρίτερα (Πίνακας 5).



Σχήμα 4.5: Κάθετες δυνάμεις στα ελαστικά της αριστερής πλευράς του οχήματος σε ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό $0.2 \text{ }^\circ/\text{s}$

Από το Σχήμα 4.5 διακρίνεται τόσο η χρονική στιγμή της κρίσιμης ανύψωσης όσο και η στιγμή της ανατροπής. Η κρίσιμη ανύψωση συμβαίνει όταν ένας τροχός χάσει την επαφή με το έδαφος. Επειδή, όμως, το όχημα στους κινητήριους άξονες έχει διπλά ελαστικά, κρίσιμη ανύψωση θεωρείται η στιγμή που και τα δύο ελαστικά του άξονα έχουν χάσει την επαφή με το έδαφος. Συνήθως, ο πρώτος άξονας που ανυψώνεται είναι κινητήριο, όπως και στην περίπτωση μας (Σχήμα 4.5-κίτρινη και γκρι γραμμή). Προφανώς, η ανατροπή λαμβάνει χώρα όταν όλοι οι τροχοί έχουν χάσει την επαφή με το έδαφος (Σχήμα 4.5-μπλε γραμμή). Η ταλάντωση της μπλε γραμμής οφείλεται στην ταλάντωση του οχήματος λίγο πριν ξεκινήσει να ανατρέπεται. Οπότε, μέσω της εξίσωσης (1), υπολογίζεται το πηλίκο ανατρεπόμενης τράπεζας (TTR) που στην πράξη αποτελεί τη μέγιστη δυνατή εγκάρσια επιτάχυνση που μπορεί να έχει το όχημα σε στροφή μόνιμης κατάστασης προτού χαθεί η ευστάθεια ως προς την ανατροπή.

Πίνακας 5: Ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s

Χρονική στιγμή κρίσιμης ανύψωσης τροχού	107.45 s
Κρίσιμη γωνία κλίσης (ϕ_{Tc})	21.49°
Ανατροπή οχήματος	
Χρονική στιγμή ανατροπής	150.23 s
Μέγιστη γωνία περιστροφής οχήματος	39.31°
Γωνία κλίσης τράπεζας	30.05°
TTR	0.394 g

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των διπλών τροχών, δηλαδή για τους άξονες 3 και 4, απώλεια επαφής με το έδαφος θεωρείται όταν και τα δύο ελαστικά (εσωτερικό και εξωτερικό, δηλαδή δείκτης i και ο αντίστοιχα) έχουν χάσει την επαφή με το έδαφος.

4.3.2 Αλλαγή λωρίδας (Lane change)

Η προσομοίωση γίνεται μέσω της επιλογής: Procedure → Stability tests → ISO 14791 Lane Change Scaled to A_y _Target. Όπως λέει και ο τίτλος, πρόκειται για ένα σενάριο οδήγησης που στοχεύει στην επίτευξη δεδομένης εγκάρσιας επιτάχυνσης a_y και είναι μια απλή αλλαγή λωρίδας [17]. Το λογισμικό έχει ως εκ των προτέρων ορισμένες επιλογές τα εξής:

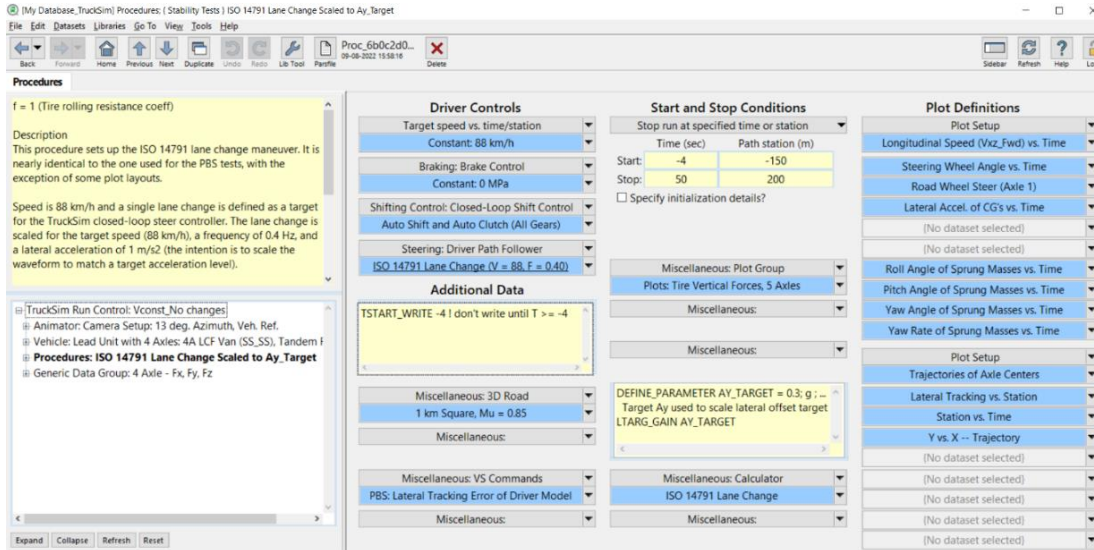
- Σταθερή ταχύτητα $V = 88$ km/h
- Μηδενικό φρενάρισμα
- Αυτόματη αλλαγή και σύμπλεξη σχέσεων μετάδοσης
- Η διαδρομή (συντεταγμένες (x,y)) κατά την αλλαγή λωρίδας ορίζεται μέσω του συστήματος εξισώσεων:

$$X = S \frac{V}{3.6} \quad (2)$$

$$Y = A_y \left(2\pi f \frac{X}{V} - \sin \left(2\pi f \frac{X}{V} \right) \right) / (2\pi f)^2 \quad (3)$$

Η εγκάρσια επιτάχυνση, η ταχύτητα και η συχνότητα είναι οι παράμετροι των εξισώσεων (2) και (3), δηλαδή ορίζονται εξ αρχής και παραμένουν σταθερές. Οι τυπικές τιμές για τα παραπάνω μεγέθη είναι αντίστοιχα 1 m/s², 88 km/h, 0.4 Hz και χρησιμοποιούνται στις (2), (3) για τον ορισμό της διαδρομής.

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα μέσω μιας συνάρτησης διαμόρφωσης (DEFINE_PARAMETER_AY_TARGET) να ορίσει ο χρήστης συγκεκριμένο στόχο για την εγκάρσια επιτάχυνση (Σχήμα 4.6). Η τιμή αυτή δίνει μια επιπλέον μετατόπιση σε σχέση με αυτή που ορίζει η Εξίσωση (3) κατά τον άξονα γ που πρέπει να κάνει το όχημα ώστε να επιτύχει τη ζητούμενη επιτάχυνση.



Σχήμα 4.6: Ορισμός «στόχου» για την εγκάρσια επιτάχυνση

Ο έλεγχος ταχύτητας γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$A_{x_rq} = K_p V_{err} + K_I V_{x_lerr} + K_{p3} V_{err}^3 \quad (4)$$

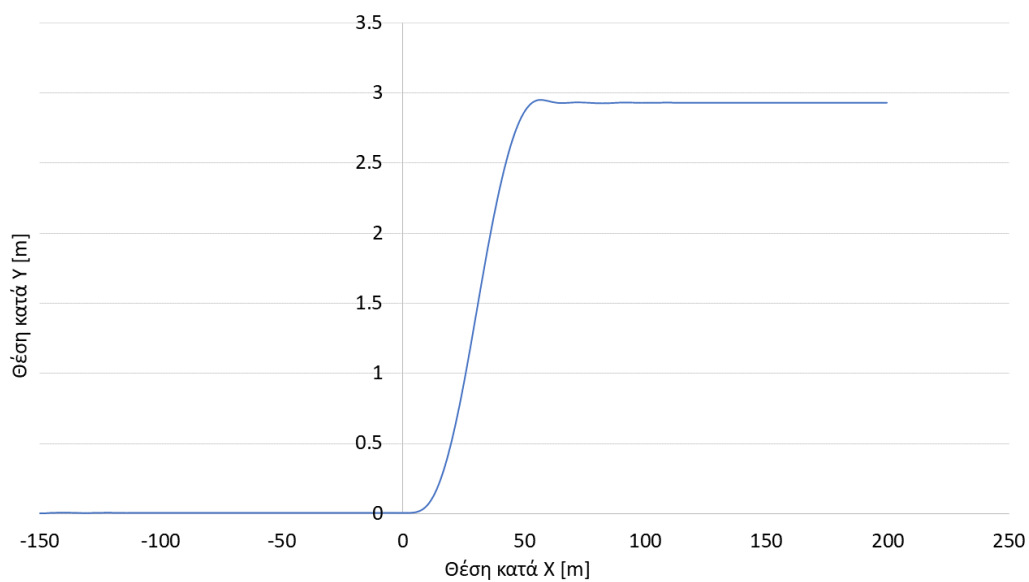
όπου $K_p = 0.141 \text{ s/m}$, $K_I = 0.157 \text{ 1/m}$, $K_{p3} = 0 \text{ s}^3/\text{m}^3$

$V_{err} = V_{x_targ} - V_{xz}$

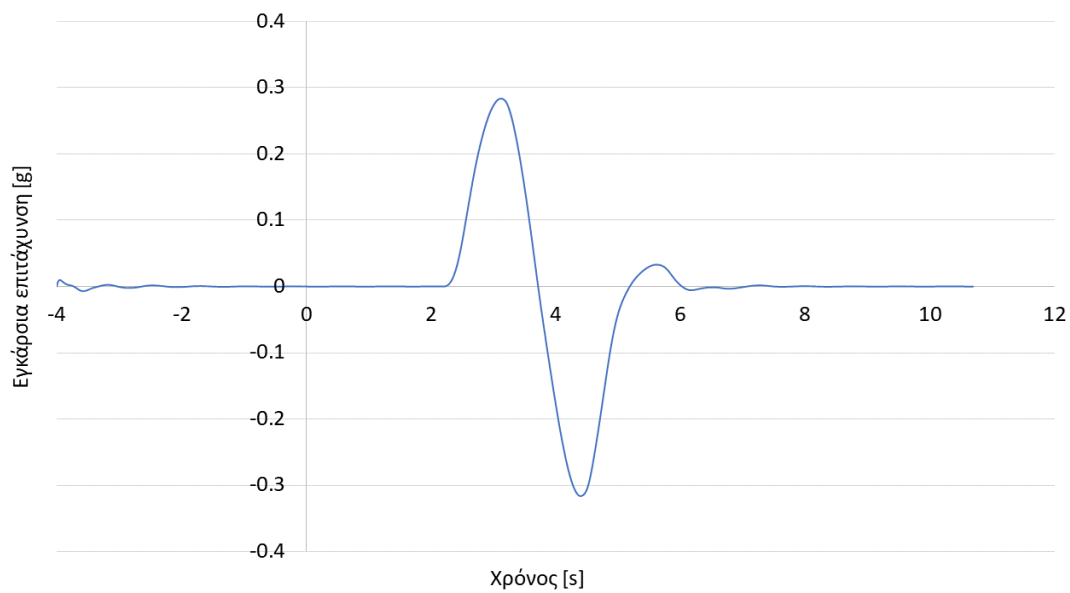
V_{x_lerr} = ολοκλήρωμα του V_{err}

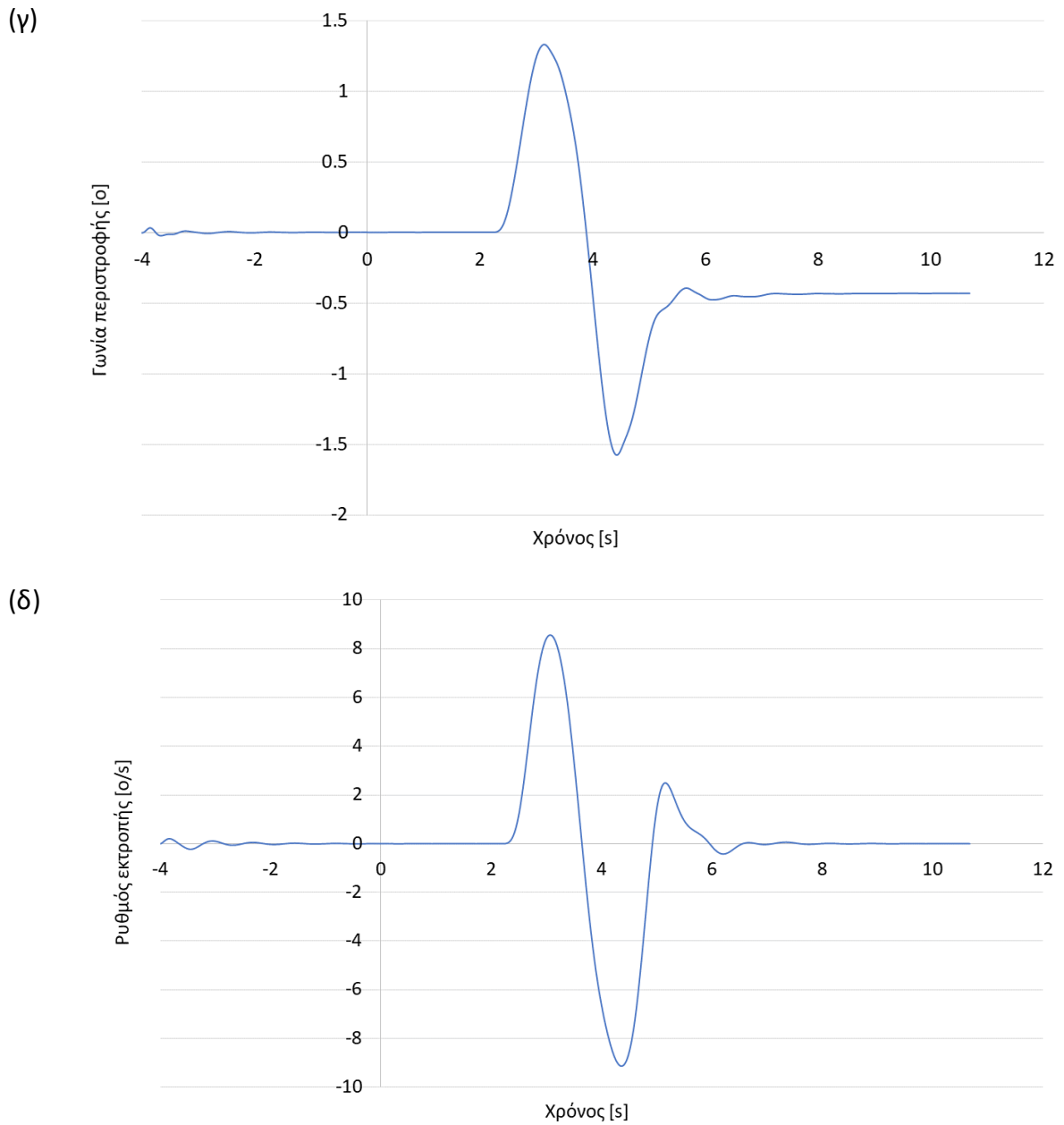
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η καταγραφή των αποτελεσμάτων ξεκινά από τα -4 δευτερόλεπτα ώστε το όχημα να έχει τον απαραίτητο χρόνο για να φτάσει σε ισορροπία (equilibrium) προτού υπάρξει η πρώτη διαταραχή στο σύστημα διεύθυνσης. Η προσομοίωση τερματίζει όταν το όχημα φτάσει τα 200 m κατά τα θετικά του άξονα x ή ο συνολικός χρόνος ξεπεράσει τα 50 s (Σχήμα 4.6 - «Start and Stop Conditions»).

(α)



(β)





Σχήμα 4.7: (α) Διαδρομή (β) Εγκάρσια επιτάχυνση (γ) Γωνία περιστροφής και (δ) Ρυθμός εκτροπής του οχήματος σε αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 88 km/h

Αρχικά, από το Σχήμα 4.7(β) παρατηρείται ότι το όχημα πρώτα προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό το στόχο της εγκάρσιας επιτάχυνσης και τελικά τον φτάνει (Πίνακας 6). Σύμφωνα με την εξίσωση (3), η εγκάρσια μετατόπιση του κέντρου μάζας του οχήματος πρέπει να βρίσκεται μεταξύ $[0, 1]$. Ωστόσο, ο ορισμός ενός «στόχου» για την εγκάρσια επιτάχυνση αλλάζει τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το όχημα προκειμένου αυτό να επιτύχει το Ay_Target . Στη συγκεκριμένη περίπτωση σπρώχνει το όχημα σχεδόν 2m εκτός του προκαθορισμένου ορίου ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλει και τον έλεγχο διεύθυνσής του (Σχήμα 4.7(α)). Επίσης, οι δύο κορυφές της επιτάχυνσης (Σχήμα 4.7(β)) οφείλονται στο ότι ο οδηγός στρίβει δύο φορές το τιμόνι, πρώτα αριστερόστροφα και μετά δεξιόστροφα. Κατά συνέπεια στο διάγραμμα προκύπτει πρώτα θετική επιτάχυνση και στη συνέχεια αρνητική. Ταυτόχρονα, υπάρχουν δύο αντίστοιχες κορυφές στη γωνία περιστροφής ϕ . Προφανώς, όμως, εγκάρσια επιτάχυνση προς τα αριστερά, δηλαδή πρώτη κορυφή, σημαίνει γωνία περιστροφής δεξιόστροφα λόγω φυγόκεντρης δύναμης (Σχήμα 4.7(γ)). Ο ρυθμός εκτροπής των αναρτημένων μαζών (Σχήμα 4.7(δ)) δεν παρουσιάζει ανωμαλίες, προφανώς πέρα από την αρχή. Αυτό σημαίνει ότι το όχημα διεξάγει με επιτυχία την αλλαγή λωρίδας προς τα αριστερά χωρίς να πλαγιολισθαίνει.

Πίνακας 6: Σύνοψη αποτελεσμάτων

Παράμετρος	Τιμή
Ταχύτητα	88 km/h
Ολοκλήρωση προσομοίωσης	10.7 s
Μεταβλητή κατάστασης	Μέγιστη τιμή
Απόλυτη εγκάρσια επιτάχυνση	0.316 g
Απόλυτη γωνία περιστροφής	1.58 °
Απόλυτος ρυθμός εκτροπής	9.13 °/s

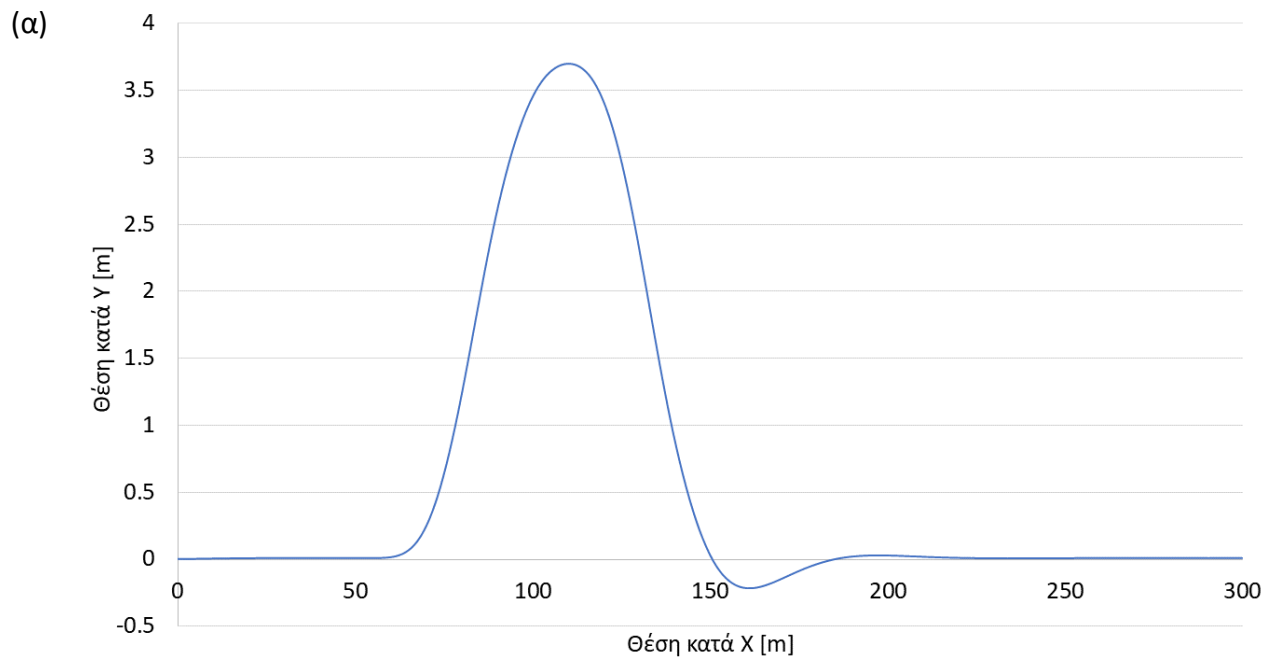
4.3.3 Διπλή αλλαγή λωρίδας (Double lane change)

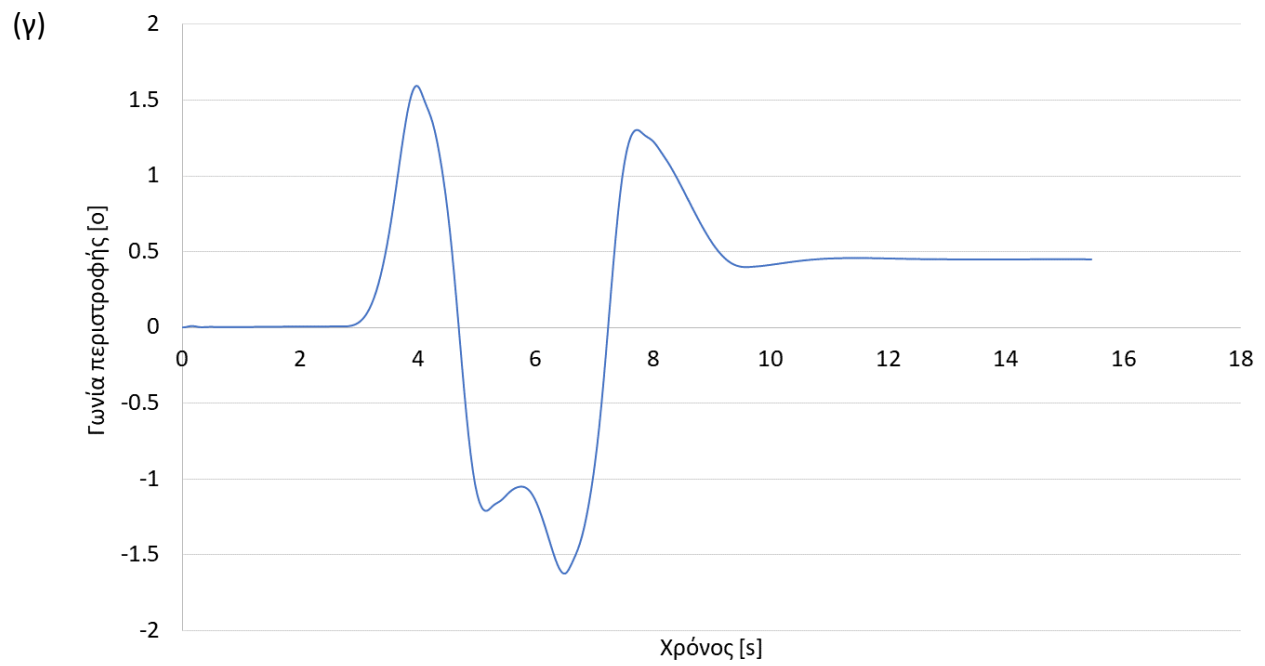
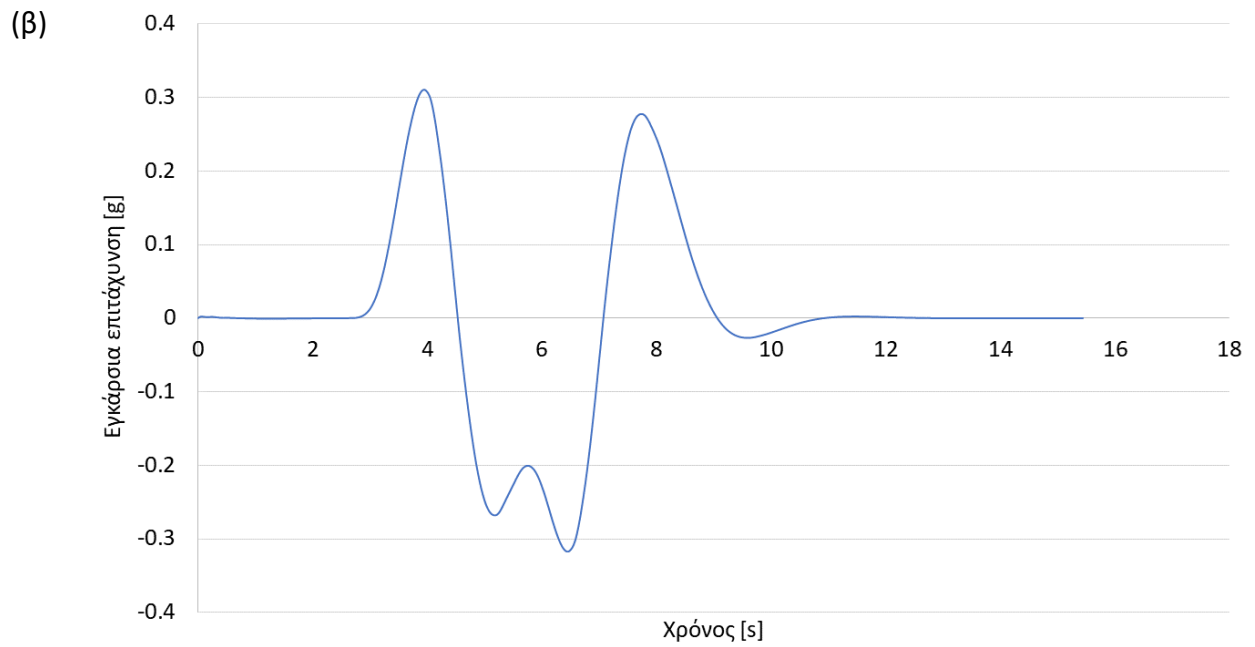
Η προσομοίωση γίνεται μέσω της επιλογής: Procedures → Handling Tests → DLC @ 70 km/h (Ten Point Preview). Η διπλή αλλαγή λωρίδας είναι μια πιο επιθετική μορφή της απλής αλλαγής λωρίδας. Το όχημα κάνει την ίδια μανούβρα δύο φορές διαδοχικά και σε αντίθετη κατεύθυνση η μία από την άλλη εντός μικρής απόστασης. Το λογισμικό έχει ως εκ των προτέρων ορισμένες επιλογές τα εξής:

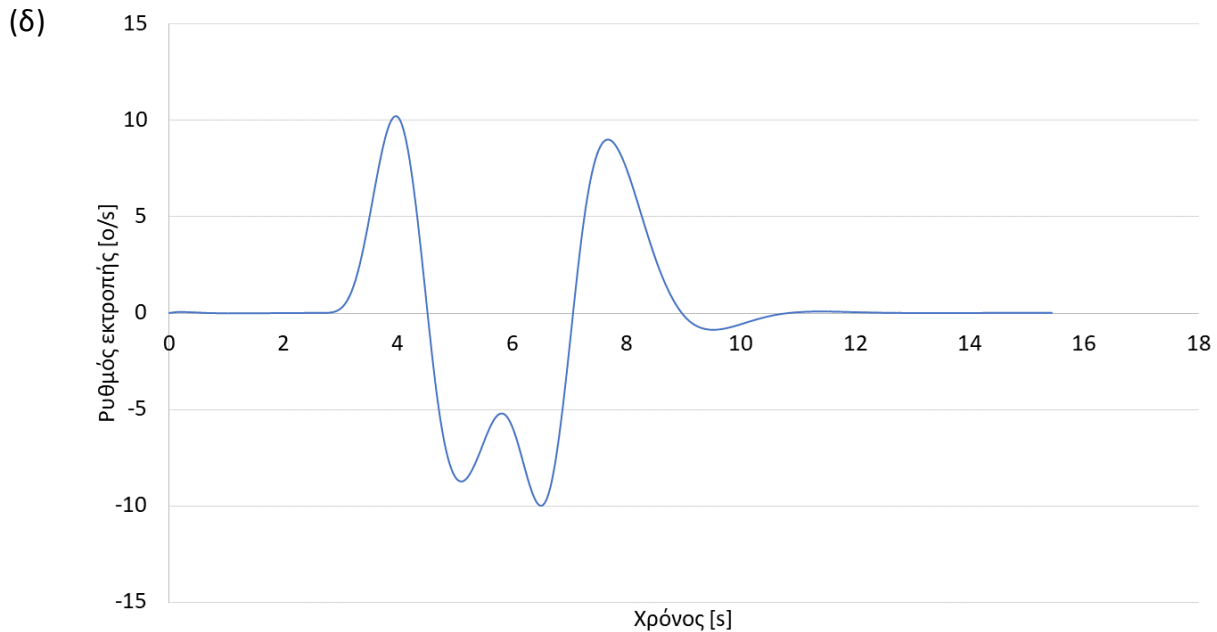
- Σταθερή ταχύτητα 70 km/h
- Μηδενικό φρενάρισμα

- Αυτόματη αλλαγή και σύμπλεξη σχέσεων μετάδοσης
- Η διαδρομή που ακολουθεί το όχημα καθορίζεται από 16 σημεία μέσω της επιλογής: Control: Steering by the Closed-loop Driver Model → Vehicle Dynamics Tests → DLC (Ten Point Preview). Με άλλα λόγια, πρόκειται για ένα έλεγχο κλειστού βρόγχου στο σύστημα διεύθυνσης, ο οποίος προϋπάρχει στο λογισμικό.

Η προσομοίωση τερματίζει όταν το όχημα φτάσει τα 300 m κατά τα θετικά του άξονα x ή ο συνολικός χρόνος ξεπεράσει τα 30 s.







Σχήμα 4.8: (α) Διαδρομή (β) Εγκάρσια επιτάχυνση (γ) Γωνία περιστροφής και (δ) Ρυθμός εκτροπής του οχήματος σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 70 km/h

Μέσω αυτής της προσομοίωσης φαίνεται η σύνδεση της εγκάρσιας επιτάχυνσης με τις μεταβολές στο σύστημα διεύθυνσης. Ειδικότερα, όταν το όχημα, άρα και το τιμόνι στρίβει προς τα αριστερά, η εγκάρσια επιτάχυνση αυξάνει. Όταν το όχημα στρίβει προς τα δεξιά, η εγκάρσια επιτάχυνση μειώνεται, δηλαδή τείνει προς τα αρνητικά. Γενικότερα, μηδενική εγκάρσια επιτάχυνση σημαίνει σταθερή κατάσταση (steady state) ενώ μη μηδενική εγκάρσια επιτάχυνση σημαίνει μεταβατική κατάσταση.

Με βάση το Σχήμα 4.8(α) η προσομοίωση της διπλής αλλαγής λωρίδας πραγματοποιείται σε 4 χρονικά διαστήματα:

1. Κίνηση σε σταθερή κατάσταση (0-3 s). Το όχημα κινείται σε ευθεία με σταθερή ταχύτητα.
2. Πρώτη αλλαγή λωρίδας προς τα αριστερά (3-6 s). Για να γίνει αυτό, το όχημα αρχικά στρίβει προς τα αριστερά, οπότε αναπτύσσεται θετική εγκάρσια επιτάχυνση. Στη συνέχεια προκειμένου να μείνει στη λωρίδα του, ο οδηγός στρίβει το τιμόνι προς τα δεξιά ώστε να το επαναφέρει σε θέση μηδενικής γωνίας. Έτσι, η εγκάρσια επιτάχυνση περνά από τα θετικά στα αρνητικά.

3. Δεύτερη αλλαγή λωρίδας προς τα δεξιά (6-9 s), κατά αντιστοιχία όπως στην πρώτη αλλαγή λωρίδας
4. Κίνηση σε σταθερή κατάσταση (9-15.5 s).

Τόσο η γωνία περιστροφής (Σχήμα 4.8(γ)) όσο και ο ρυθμός εκτροπής (Σχήμα 4.8(δ)) συμβαδίζουν απόλυτα με την εγκάρσια επιτάχυνση (Σχήμα 4.8(β)) ως προς το πρόσημό τους, την καμπυλότητα και, γενικά, στη μορφή του διαγράμματος. Για παράδειγμα, λοιπόν, στροφή του τιμονιού προς τα δεξιά σημαίνει αρνητική κλίση εγκάρσιας επιτάχυνσης, γωνίας περιστροφής και ρυθμού εκτροπής.

Παρατηρεί κανείς ότι η διπλή αλλαγή λωρίδας είναι ένα συμμετρικό σενάριο οδήγησης κατά έναν κάθετο άξονα στα 6 s, παρόλο που η ταχύτητα του οχήματος είναι 70 km/h (Πίνακας 7). Παρατηρείται ότι και στις τρεις βασικές μεταβλητές ενδιαφέροντος (εγκάρσια επιτάχυνση, γωνία περιστροφής και ρυθμός εκτροπής) οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές είναι περίπου συμμετρικές ως προς το μηδέν.

Πίνακας 7: Σύνοψη αποτελεσμάτων

Παράμετρος	Τιμή
Ταχύτητα	70 km/h
Ολοκλήρωσης προσομοίωσης	15.45 s
Μεταβλητή κατάστασης	Μέγιστη τιμή
Απόλυτη εγκάρσια επιτάχυνση	0.32 g
Απόλυτη γωνία περιστροφής	1.62 °
Απόλυτος ρυθμός εκτροπής	10.22 °/s

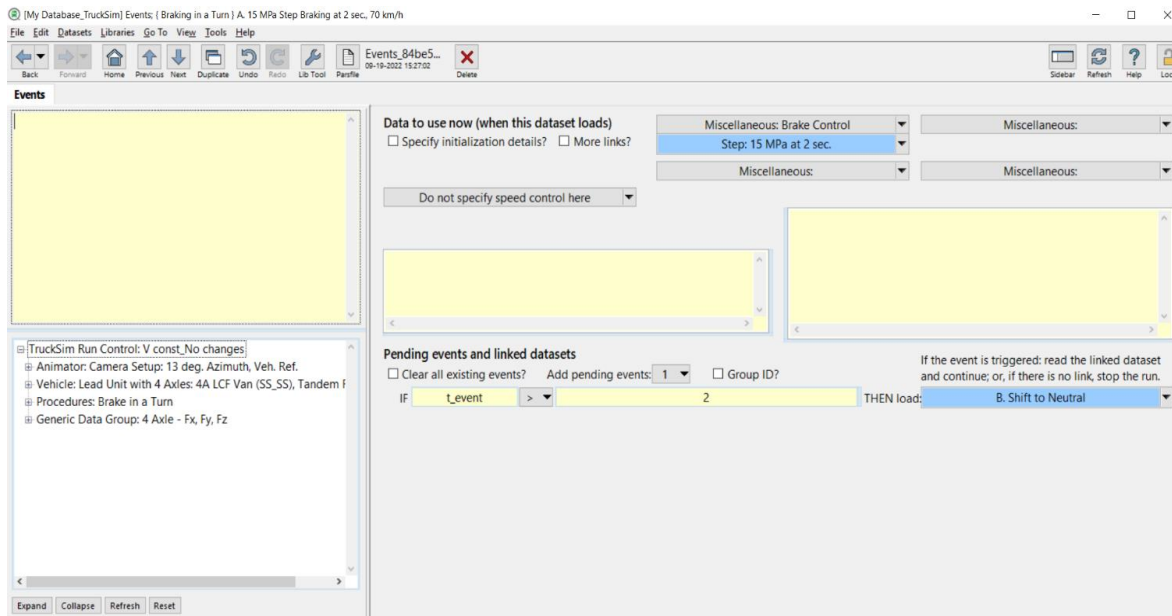
4.3.4 Πέδηση σε στροφή (Brake in a Turn)

Η προσομοίωση γίνεται μέσω της επιλογής: Procedure → Acceleration and Braking → Brake in a Turn. Πρόκειται για ένα σενάριο οδήγησης ανοιχτού βρόχου και είναι αυτό που δεν υπάρχει ως σενάριο για έναν επαγγελματία οδηγό, παρά μόνο σε έκτακτη ανάγκη. Εντός πόλης πραγματοποιείται σε χαμηλές ταχύτητες ενώ στους αυτοκινητοδρόμους το όχημα μπορεί να φρενάρει ενώ βρίσκεται σε στροφή και υψηλή ταχύτητα. Από την άλλη, οι ακτίνες στροφής στις πόλεις είναι μικρότερες από τους αυτοκινητοδρόμους. Το λογισμικό έχει ως εκ των προτέρων ορισμένες επιλογές τα εξής:

- Σταθερή ταχύτητα 70 km/h
- Αυτόματη αλλαγή και σύμπλεξη σχέσεων μετάδοσης
- Κυκλική διαδρομή οχήματος με σταθερή ακτίνα 100 m

- Απότομο φρενάρισμα σε χρόνο 2 s και πίεση στον κύριο κύλινδρο (master cylinder) 15 MPa.
- Τη στιγμή έναρξης του φρεναρίσματος αλλαγή ταχύτητας σε νεκρά (Σχήμα 4.9)

Η προσομοίωση τερματίζει όταν ο συνολικός χρόνος ξεπεράσει τα 10 s. Μέχρι τότε, το όχημα κινείται εμπρός, αν δεν έχει πλήρως ακινητοποιηθεί.

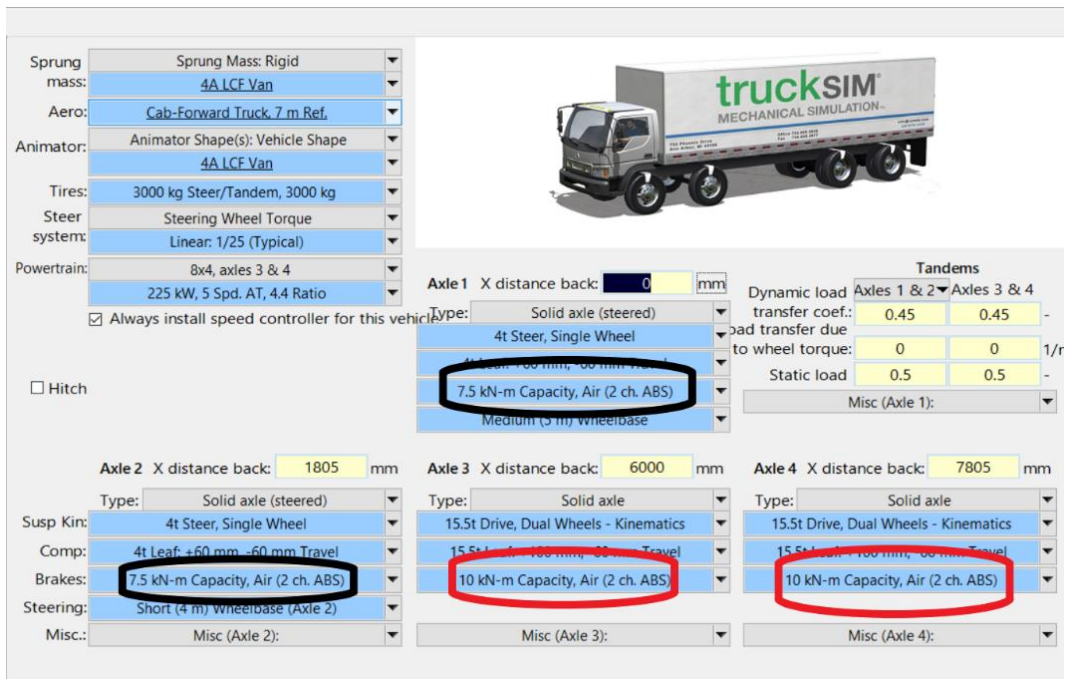


Σχήμα 4.9: Αλλαγή ταχύτητας τη στιγμή έναρξης του φρεναρίσματος σε «νεκρά»

Σύμφωνα με το λογισμικό, η διαδικασία της αρχικοποίησης βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα, κάνει υποθέσεις και αγνοεί κάποιες επιδράσεις καθώς πολλές μεταβλητές του οχήματος στην αρχή είναι στατικά αόριστες. Προκειμένου, λοιπόν, το όχημα να φτάσει σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, τίθεται ως χρόνος έναρξης το -3.6 s. Κατά συνέπεια, αν U είναι η ταχύτητα του οχήματος (σε km/h), τότε ο χρήστης θέτει $-U$ την θέση έναρξης (σε m) ώστε σε χρόνο $t = 0$ s το όχημα να βρίσκεται στη θέση $x = 0$ και σε μόνιμη κατάσταση (steady state).

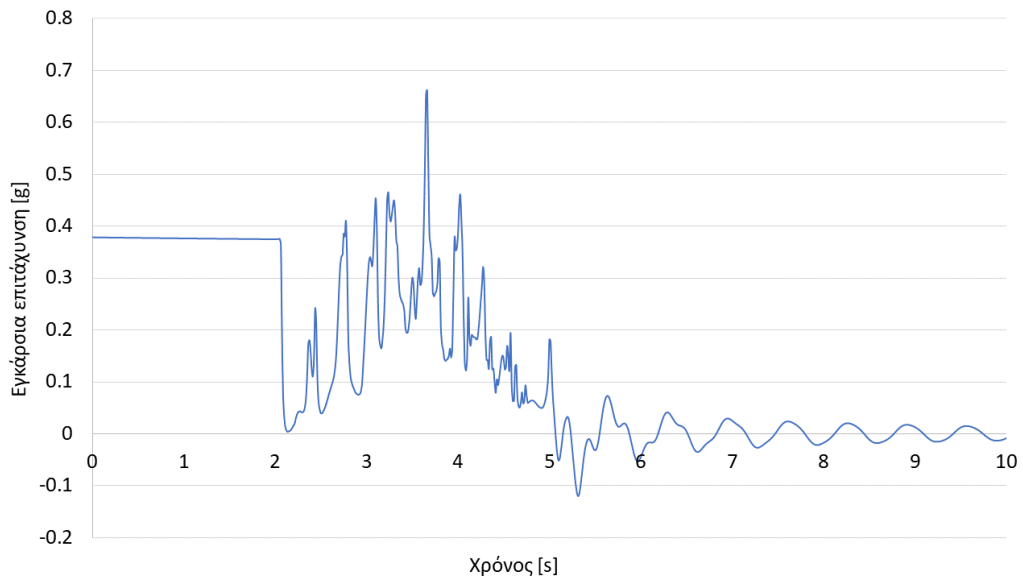
Προφανώς, επιλέγεται $t_{start_write} = 0$, δηλαδή η καταγραφή των αποτελεσμάτων ξεκινάει από χρόνο $t = 0$ s.

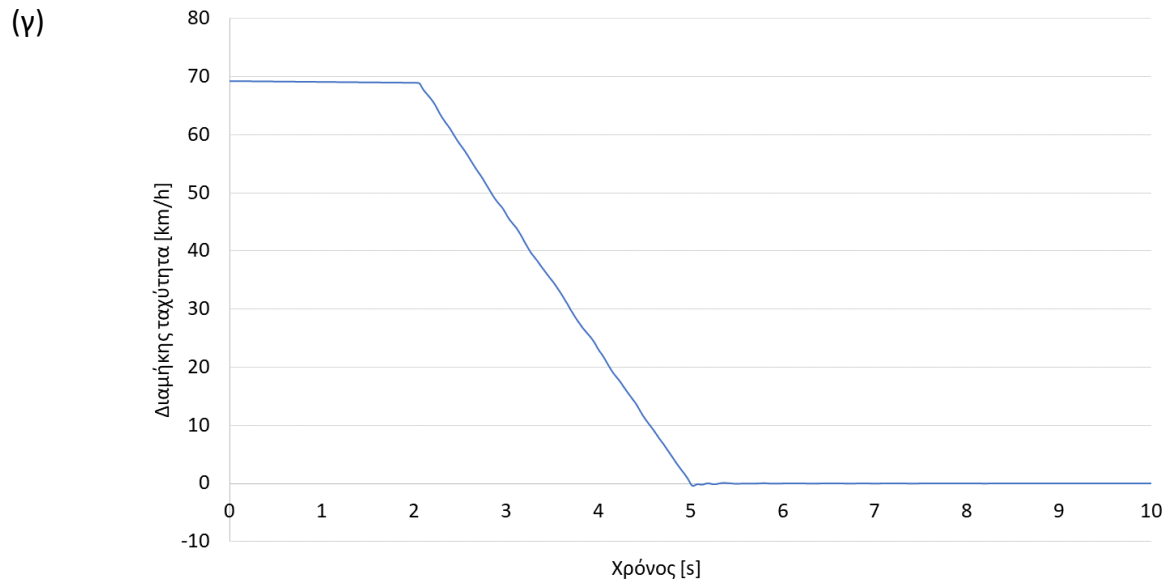
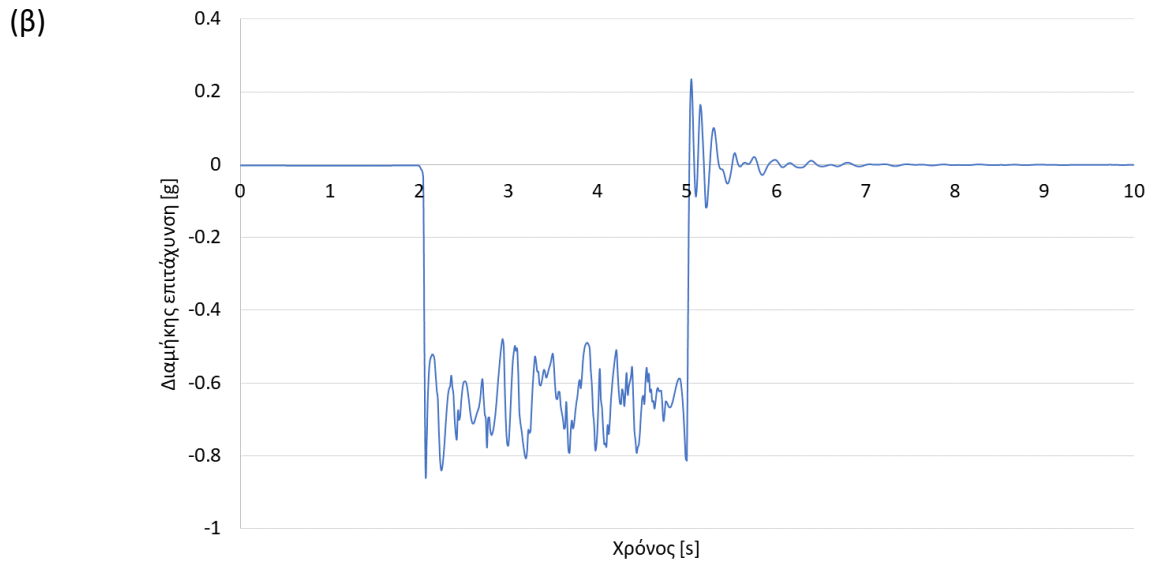
Στο Σχήμα 4.10 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος των φρένων του οχήματος σε κάθε άξονα.



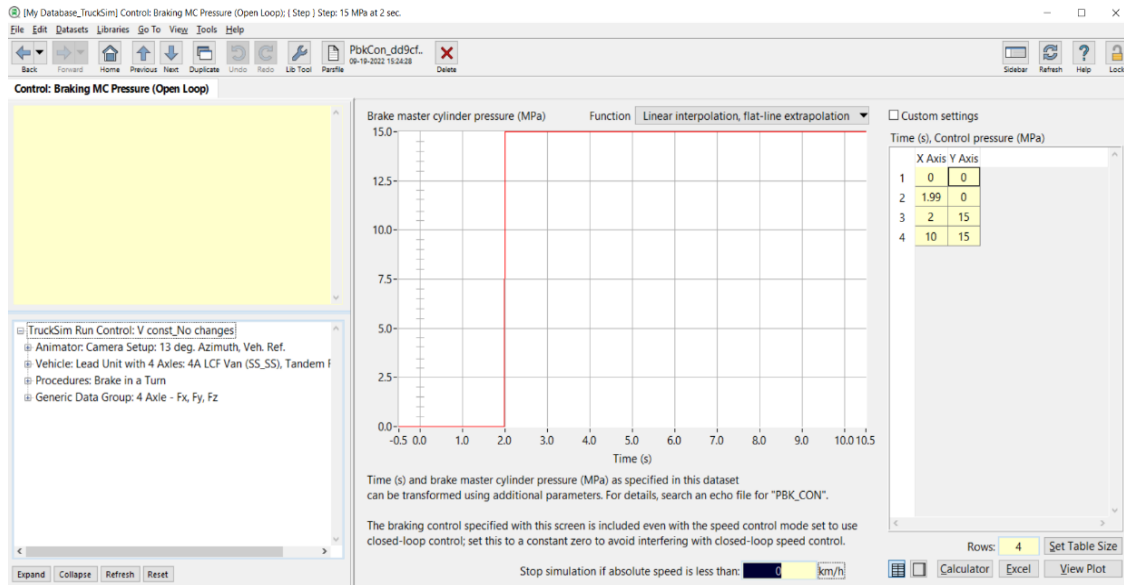
Σχήμα 4.10: Χαρακτηριστικά συστήματος φρένων οχήματος σε κάθε άξονα

(α)





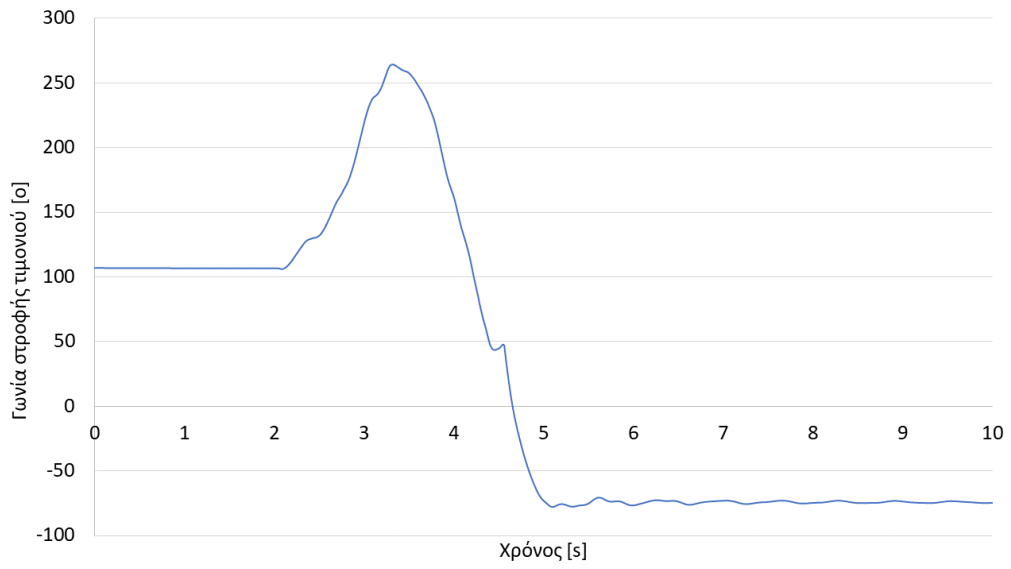
Σχήμα 4.11: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Διαμήκης επιτάχυνση και (γ)Διαμήκης ταχύτητα του οχήματος κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h



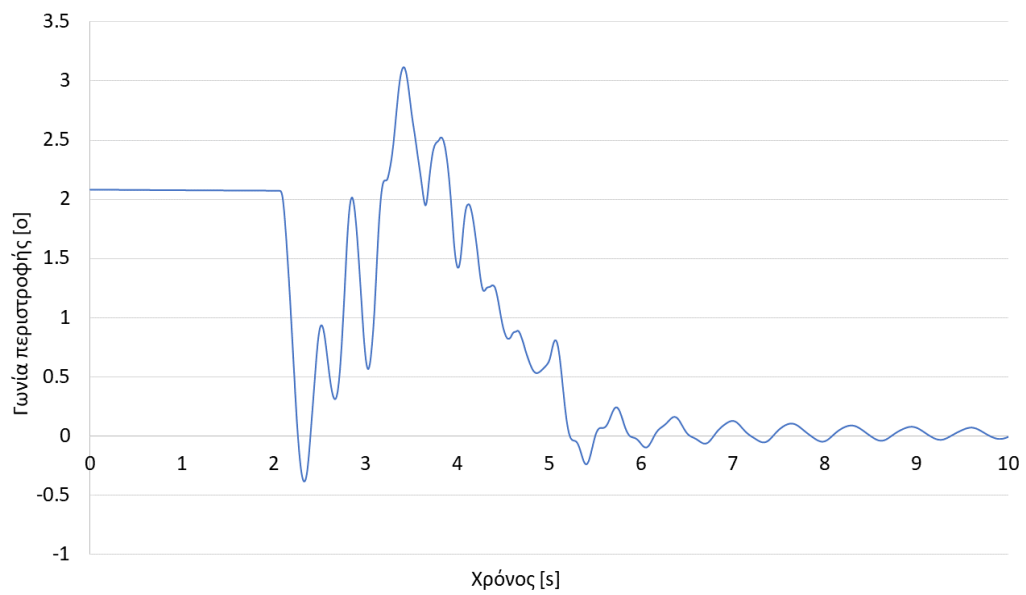
Σχήμα 4.12: Πίεση στον κύριο κύλινδρο του οχήματος κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h

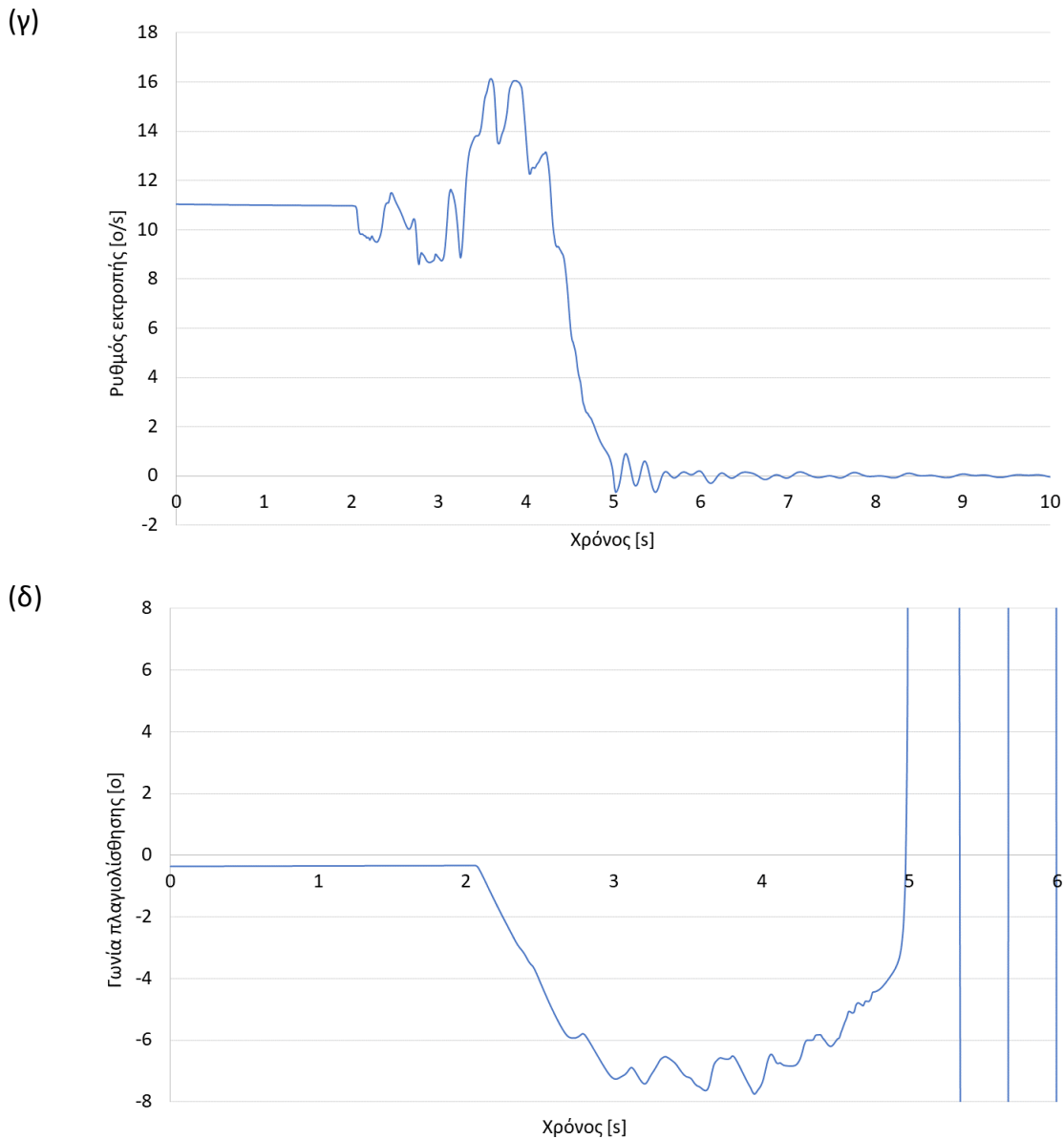
Καταρχάς, στο χρονικό διάστημα 0-2 s το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα σε στροφή σταθερής ακτίνας. Πρόκειται, δηλαδή, για μια μόνιμη κατάσταση καθώς η εγκάρσια επιτάχυνση του οχήματος είναι σταθερή και περίπου ίση με 0.385 g (Σχήμα 4.11(α)). Μετά τα 2 s, το όχημα ξεκινά να φρενάρει. Η εγκάρσια επιτάχυνση υφίσταται αρχικά μια απότομη πτώση ενώ ακολουθεί μια αποσβενόμενη ταλάντωση. Αυτό συμβαίνει γιατί το όχημα προσπαθεί να κρατήσει σταθερή ταχύτητα ενώ ταυτόχρονα φρενάρει. Στην πραγματικότητα αυτό δεν υφίσταται. Η διαμήκης επιτάχυνση είναι επίσης μηδενική μέχρι τα πρώτα 2 s (Σχήμα 4.11(β)). Η μέγιστη κατά μέτρο τιμή της διαμήκους επιτάχυνσης εξαρτάται από την πίεση στον κύριο κύλινδρο. Όσο αυξάνει, τόσο μεγαλύτερη θα είναι πρακτικά η επιβράδυνση οπότε το όχημα θα σταματήσει και πιο γρήγορα. Η απότομη κλίση της επιβράδυνσης οφείλεται στον τρόπο φρεναρίσματος (Σχήμα 4.12). Παρατηρεί κανείς από το Σχήμα 4.11(γ) ότι η ταχύτητα μειώνεται κατά το φρενάρισμα με σταθερό ρυθμό. Αυτό σημαίνει σταθερή επιβράδυνση. Ωστόσο στο Σχήμα 4.11(β) η επιβράδυνση φαίνεται να κάνει μια ταλάντωση μεταξύ 0.5 και 0.8 g (κατά απόλυτη τιμή). Επειδή, όμως, οι εναλλαγές από ύψος σε βάθος είναι πολύ γρήγορες και το όχημα έχει μεγάλη μάζα, άρα μεγάλη αδράνεια, και μεγάλη ταχύτητα, ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά.

(α)



(β)





Σχήμα 4.13: (α)Γωνία στροφής τιμονιού (β)Γωνία περιστροφής (γ)Ρυθμός εκτροπής και (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης του οχήματος σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h

Με βάση το Σχήμα 4.13(α) η γωνία στροφής τιμονιού μόνιμης κατάστασης είναι περίπου 107° . Η μείωση ταχύτητας, άρα και εγκάρσιας επιτάχυνσης, λόγω φρεναρίσματος οδηγεί σε αύξηση της γωνίας στροφής. Κατά συνέπεια, το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση υπερστροφής (oversteering). Επίσης, μείωση της ταχύτητας επιφέρει αύξηση της γωνίας περιστροφής (Σχήμα 4.13(β)) αλλά και του ρυθμού εκτροπής (Σχήμα 4.13(γ)). Με άλλα λόγια, το όχημα ξεκινά να ολισθαίνει μετά τα 2 s. Βέβαια, και οι δύο αυτές μεταβλητές εν

τέλει φθίνουν διότι το απότομο φρενάρισμα ενεργοποιεί τα ABS και οι τροχοί ξεμπλοκάρουν. Κατά συνέπεια το φρενάρισμα δεν είναι συνεχές, γεγονός που δικαιολογεί και την ταλάντωση της διαμήκου επιτάχυνσης στην αρχή του φρεναρίσματος. Στη μόνιμη κατάσταση η γωνία πλαγιολίσθησης είναι σταθερή και περίπου ίση με -0.35° (Σχήμα 4.13(δ)). Μετά την έναρξη του φρεναρίσματος η γωνία γίνεται όλο και πιο αρνητική, δηλαδή μεγαλώνει κατά μέτρο. Στο χρονικό διάστημα πλήρους ακινητοποίησης του οχήματος μέχρι και τον τερματισμό της προσομοίωσης (μετά τα 5 s), η γωνία β , κυμαίνεται στο διάστημα $[-180^\circ, 180^\circ]$. Αυτό, όμως δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα καθώς το όχημα είναι ακίνητο και δεν έχει την τάση να κινηθεί. Επομένως, ότι φαίνεται μετά τα 5 s είναι απόρροια υπολογιστικού σφάλματος.

Σύμφωνα με το ISO14794 [18], εκτός από τις παραπάνω χρονοσειρές, πρέπει να εξεταστούν δύο ακόμα. Αυτές αναφέρονται στο ρυθμό εκτροπής αναφοράς $\dot{\psi}_{Ref}$ και την εγκάρσια επιτάχυνση αναφοράς $\alpha_{Y,Ref}$.

Η τιμή αναφοράς, γενικότερα, είναι αυτή που θα είχε η μεταβλητή στο χρόνο t λόγω της εκάστοτε διαμήκου ταχύτητας, αν το όχημα είχε διατηρήσει την αρχική ακτίνα στροφής. Με άλλα λόγια, η διαφορά μεταξύ μιας μεταβλητής με την αντίστοιχη μεταβλητή αναφοράς την ίδια χρονική στιγμή t οφείλεται στην διαφορετική ακτίνα στροφής.

Το $\dot{\psi}_{Ref,t}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{\psi}_{Ref} = \frac{V_{x,t}}{V_{x,ss}} \dot{\psi}_{ss} \quad (5)$$

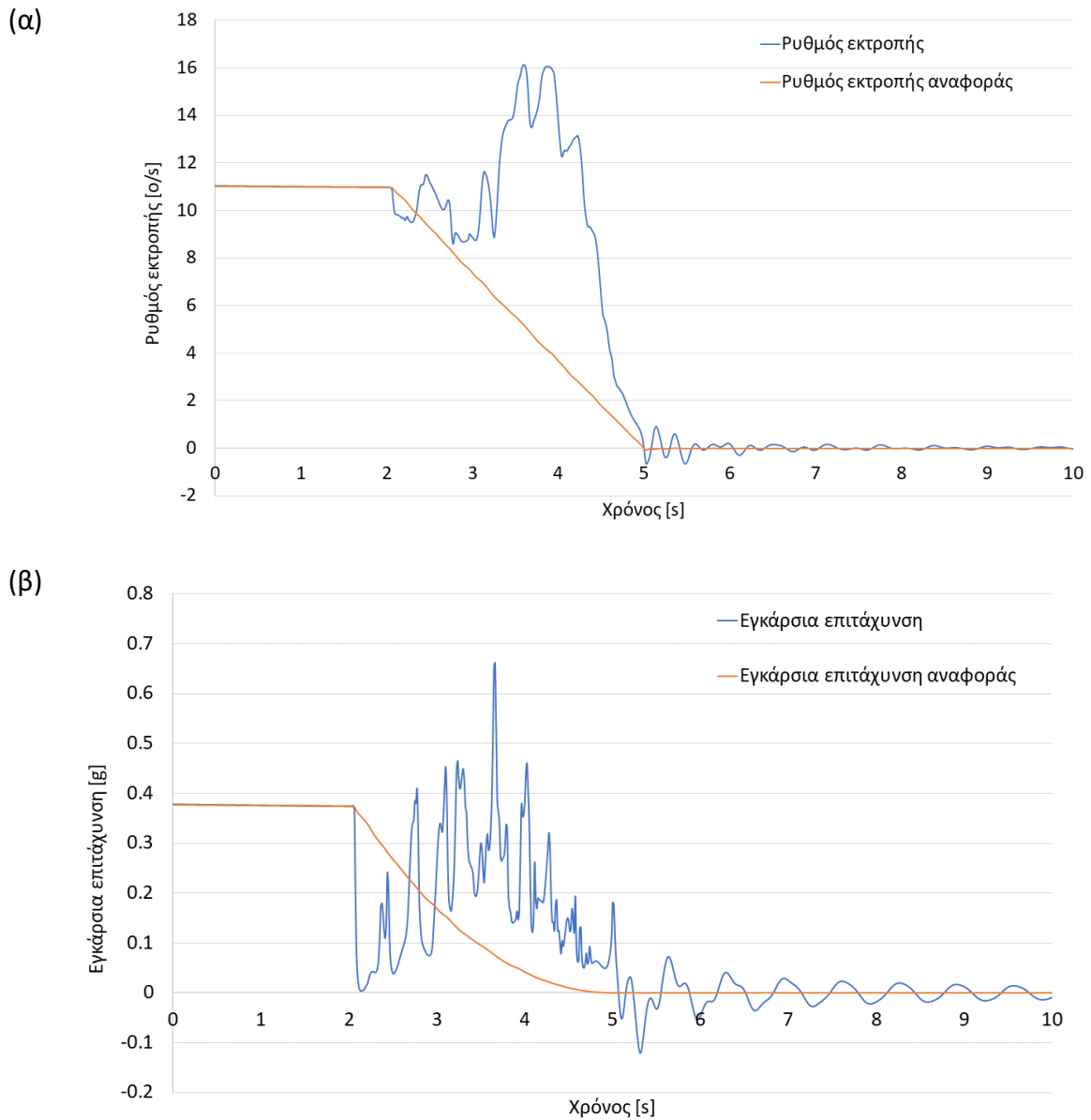
Το $\alpha_{Y,Ref,t}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_{Y,Ref} = \frac{V_{x,t}^2}{V_{x,ss}^2} \alpha_{Y,ss} \quad (6)$$

Οι τιμές των μεταβλητών μόνιμης κατάστασης (δείκτης ss) υπολογίζονται ως η μέση τιμή των τιμών στο χρονικό διάστημα 1.3 έως 0.3 s πριν το t_0 , δηλαδή τα 2 s.

Οι μεταβλητές αναφοράς είναι σημαντικές προς εξέταση παρά μόνο όταν η επιτάχυνση εκτροπής $\ddot{\psi}$ και η γωνία πλαγιολίσθησης β είναι μικρές [18].

Για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, οι χρονοσειρές των μεταβλητών αναφοράς παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα με τις αντίστοιχες μεταβλητές (Σχήμα 4.14). Με κόκκινο χρώμα είναι οι μεταβλητές αναφοράς.



Σχήμα 4.14: (α)Ρυθμός εκτροπής (αναφοράς και μη) και (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (αναφοράς και μη) του οχήματος σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h

Παρατηρώντας τα δύο παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 4.14(α) και Σχήμα 4.14(β)) βλέπει κανείς ότι τα μεγέθη αναφοράς αποτελούν μια παρεμβολή των αντίστοιχων μεγεθών. Μέσω του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8) παρουσιάζονται οι τιμές κάποιων χαρακτηριστικών μεταβλητών για το φρενάρισμα σε στροφή.

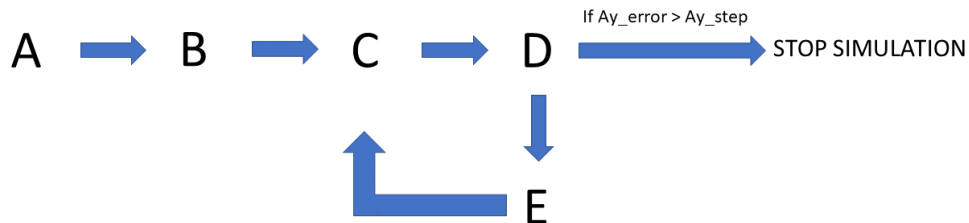
Πίνακας 8: Σύνοψη αποτελεσμάτων

Μεταβλητές σε μόνιμη κατάσταση (steady state)	$a_{Y_{SS}}$	V_{SS}	ψ_{SS}	β_{SS}
	0.376 g	69.053 km/h	10.99 °/s	-0.35°
Χρονική στιγμή αναφοράς t_0	2 s			
Πίεση φρένων (κύριος κύλινδρος)	15 MPa			
Χρονική στιγμή ακινητοποίησης οχήματος	5.3 s			
Μεταβλητή κατάστασης	Μέγιστη τιμή			
Απόλυτη εγκάρσια επιτάχυνση	0.66 g			
Απόλυτη διαμήκης επιτάχυνση	0.85 g			
Απόλυτη γωνία περιστροφής	3.12 °			
Απόλυτος ρυθμός εκτροπής	16.12 °/s			
Απόλυτη γωνία πλαγιολίσθησης	7.75 °			

4.3.5 Στροφή μόνιμης κατάστασης (Steady state circular turn)

Η προσομοίωση υλοποιείται μέσω της επιλογής: Procedure → Handling tests → ISO Steady-State Circle Series. Σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μόνιμης κατάστασης του οχήματος σε δεξιά και αριστερή στροφή [19]. Αυτό μπορεί να γίνει διατηρώντας σταθερές κάποιες παραμέτρους και αλλάζοντας κάποιες άλλες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η προσομοίωση γίνεται για σταθερή ακτίνα και περιοδικά σταθερή ταχύτητα.

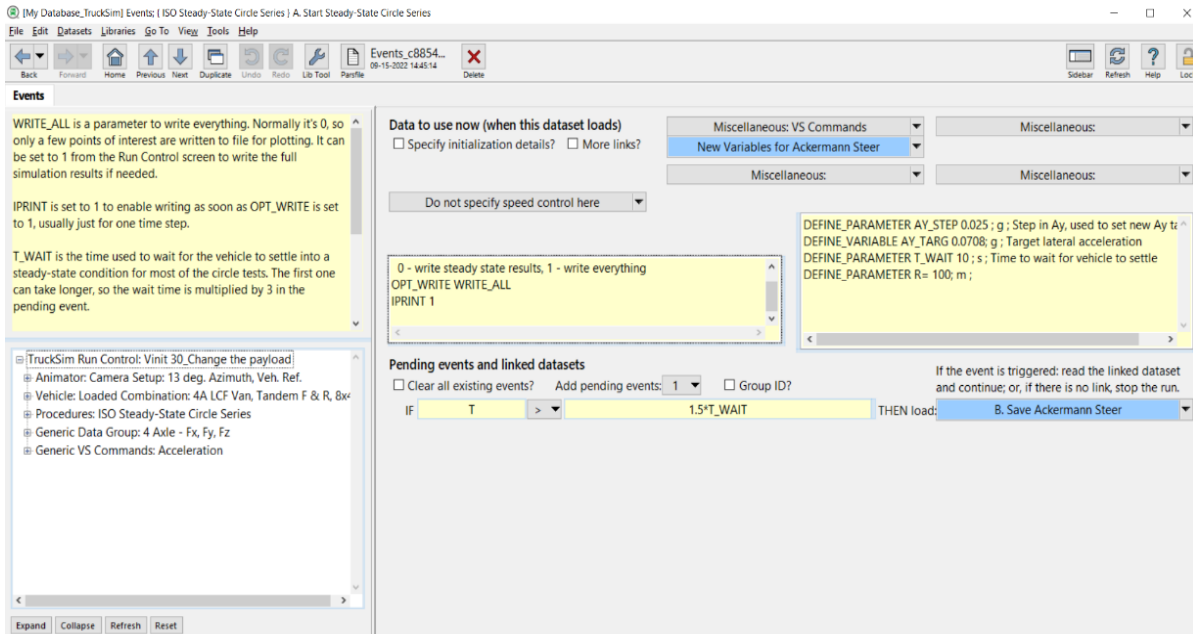
Το λογισμικό έχει εκ των προτέρων διαμορφώσει μια ακολουθία 5 σταδίων (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15: Αλγόριθμος σταδίων προσομοίωσης

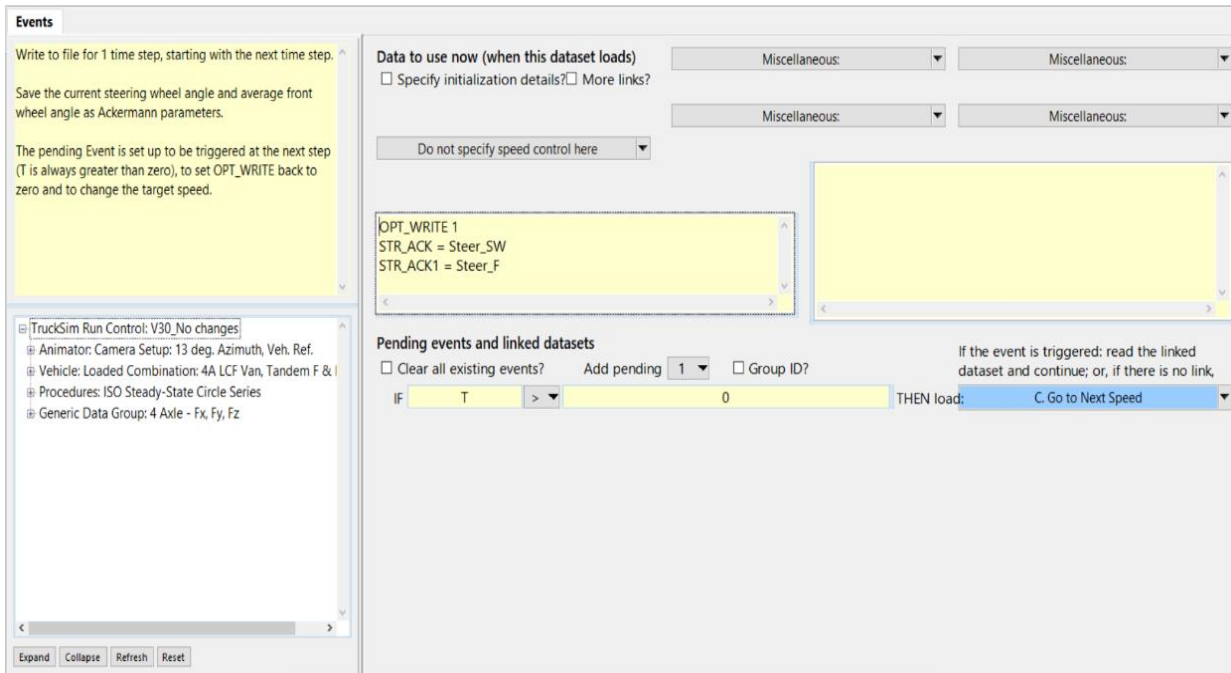
- A. **Έναρξη (Start):** Σε αυτό το στάδιο ορίζονται κάποιες απαραίτητες παράμετροι για την εκτέλεση της προσομοίωσης (Σχήμα 4.16). Αυτές είναι:
- Το βήμα της εγκάρσιας επιτάχυνσης Ay_Step
 - Η ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση Ay_Targ
 - Ο χρόνος αναμονής T_Wait μέχρι το όχημα να φτάσει σε μόνιμη κατάσταση
 - Η ακτίνα στροφής R

Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιηθεί ώστε να ολοκληρωθεί το βήμα A και να προχωρήσει στο βήμα B είναι: $T > 1.5 * T_Wait$. Με άλλα λόγια, η διάρκεια αυτού του σταδίου είναι $1.5 * T_Wait$.



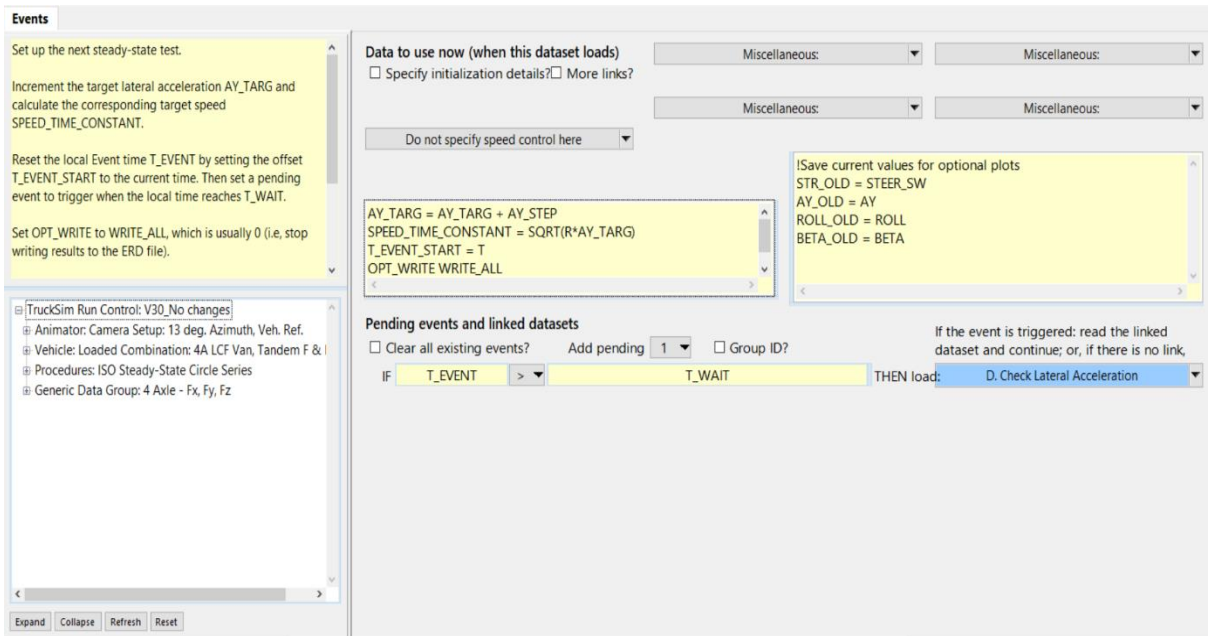
Σχήμα 4.16: Στάδιο Α

- B. **Αποθήκευση (Save):** Σε αυτό το στάδιο γίνεται η αποθήκευση δύο μεταβλητών Ackermann, της γωνίας στροφής του τιμονιού και της μέσης γωνίας στροφής των εμπρόσθιων ελαστικών (Σχήμα 4.17). Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιηθεί ώστε να ολοκληρωθεί το βήμα B και να περάσουμε στο βήμα C είναι: $T > 0$. Η συνθήκη αυτή ισχύει πάντα οπότε η μετάβαση γίνεται αμέσως, ενώ η διάρκεια αυτού του σταδίου είναι αμελητέα.



Σχήμα 4.17: Στάδιο Β

- C. **Επόμενη ταχύτητα (Go to Next Speed):** Σε αυτό το στάδιο γίνεται αύξηση της ζητούμενης εγκάρσιας επιτάχυνσης κατά A_{y_Step} , οπότε και της ταχύτητας (Σχήμα 4.18). Ουσιαστικά, η προσομοίωση αποτελείται από πολλά διαφορετικά τεστ, σε καθένα από τα οποία το όχημα εν τέλει κινείται σε σταθερή ακτίνα με σταθερή ταχύτητα, δηλαδή σε μόνιμη κατάσταση. Το στάδιο αυτό παίζει το μεταβατικό ρόλο μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων. Το όχημα αρχίζει και επιταχύνει μέχρι να φτάσει τη νέα ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση. Η συνθήκη που το εξασφαλίζει και ταυτόχρονα κάνει τη μετάβαση προς το επόμενο στάδιο είναι: $T > T_Wait$. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη παραπάνω συνθήκη ο χρόνος T είναι ο «τοπικός» χρόνος, δηλαδή αυτός που ξεκίνησε να μετράει από τη στιγμή έναρξης του σταδίου C. Επομένως, η διάρκεια του σταδίου είναι T_Wait .

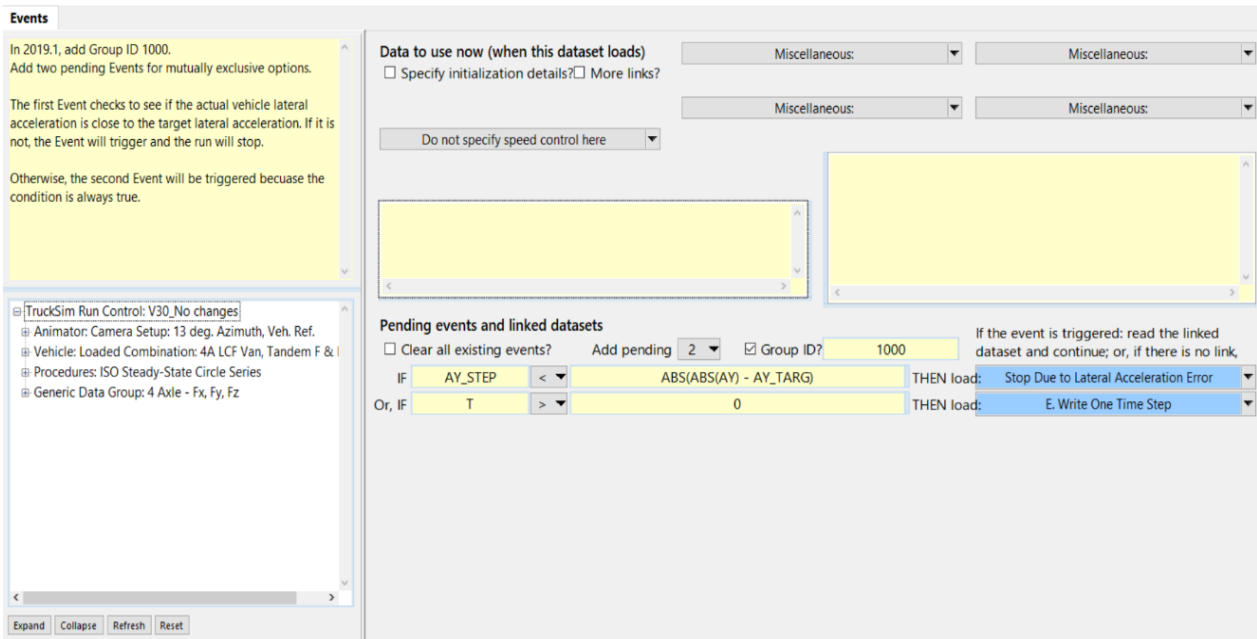


Σχήμα 4.18: Στάδιο C

- D. **Έλεγχος εγκάρσιας επιτάχυνσης (Check Ay):** Σε αυτό το στάδιο γίνεται έλεγχος αν το όχημα έχει πραγματικά την ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση, δηλαδή αν το προηγούμενο στάδιο έφερε τα ζητούμενα αποτελέσματα (Σχήμα 4.19). Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιηθεί ώστε να περάσουμε στο επόμενο στάδιο είναι:

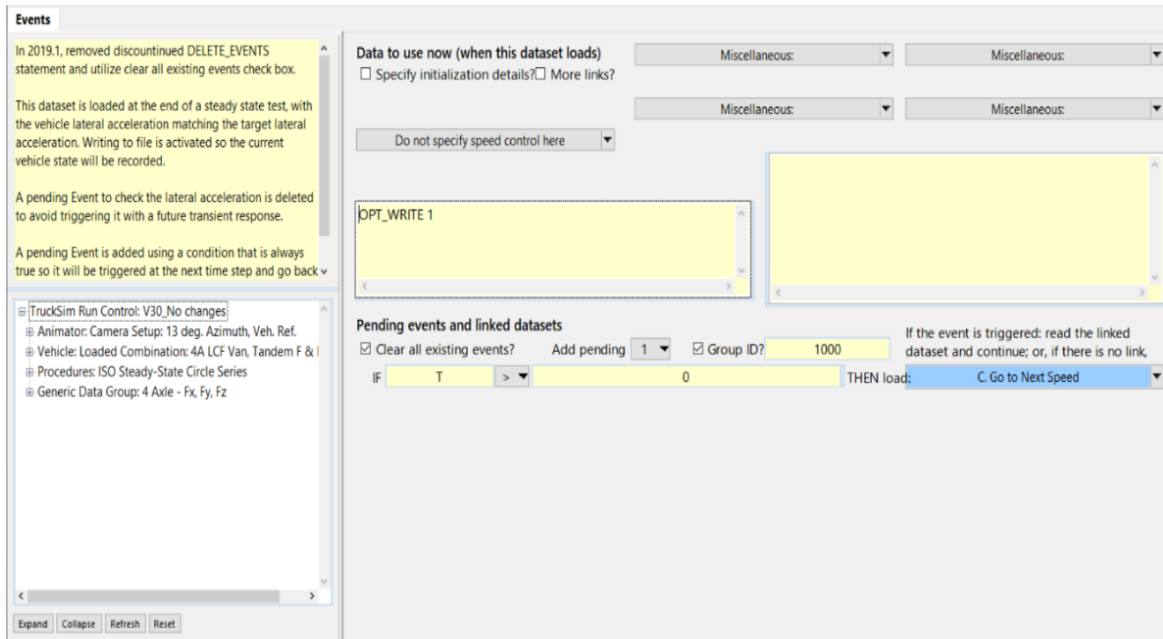
$$||A_y| - A_{y_Targ}| < A_{y_Step}$$

Αν δεν ικανοποιηθεί τότε η προσομοίωση διακόπτεται. Όσον αφορά τη διάρκεια του σταδίου, αυτή είναι αμελητέα.



Σχήμα 4.19: Στάδιο D

- E. **Ανατροφότηση (Write one Time Step):** Σε αυτό το στάδιο γίνεται η ανατροφοδότηση του βρόγχου ώστε να συνεχιστεί η προσομοίωση, δηλαδή να εκτελεστεί το στάδιο C, και να δημιουργηθεί μια νέα κατάσταση του οχήματος (Σχήμα 4.20). Η μετάβαση γίνεται μέσω της συνθήκης $T > 0$, που ισχύει πάντα. Άρα, η διάρκεια του σταδίου είναι αμελητέα.



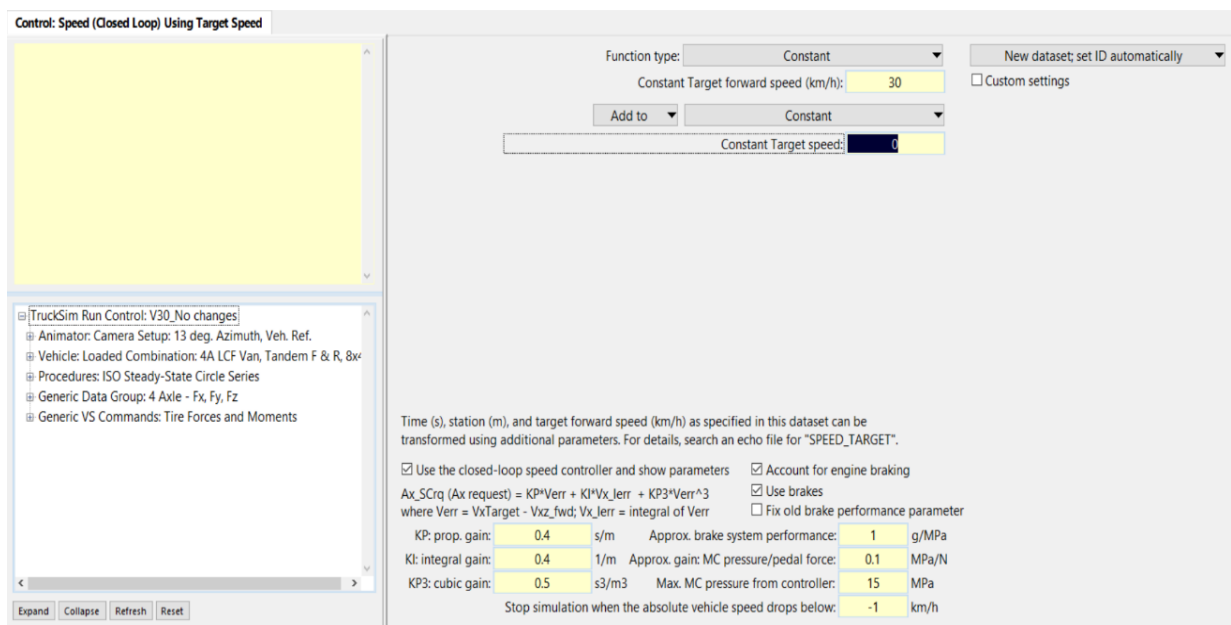
Σχήμα 4.20: Στάδιο Ε

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις τιμές για τις πιο σημαντικές παραμέτρους αυτής της προσομοίωσης (Πίνακας 9).

Πίνακας 9: Παράμετροι προσομοίωσης

Τίτλος	Σύμβολο-Συνάρτηση	Τιμή
Βήμα εγκάρσιας επιτάχυνσης	$A_{y_STEP} = \text{σταθ.}$	0.025 g
Ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση	$A_{y_TARGET} = A_{y_TARGET} + A_{y_STEP}$	$V_x^2(0)/R/g$ g (T = 0)
Χρόνος αναμονής	$T_WAIT = \text{σταθ.}$	10 s
Ακτίνα στροφής	$R = \text{σταθ.}$	100 m
Ackermann γωνία στροφής τιμονιού	$Str_Ack = Steer_SW$	0° (T = 0)

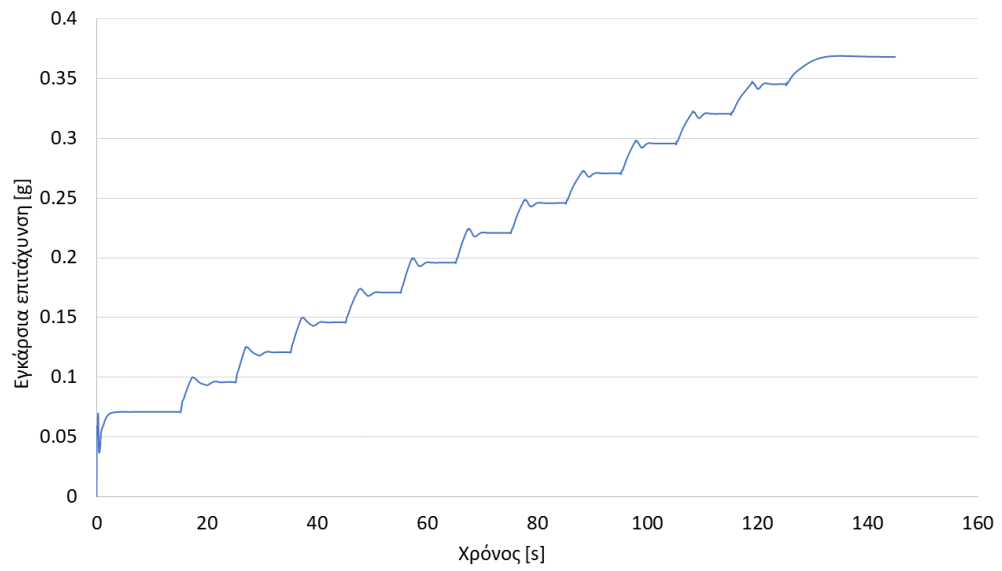
Ackermann μέση γωνία στροφής εμπρόςθιων τροχών	$Str_Ack1 = (Steer_L1 + Steer_R1)/2$	$0^\circ (T = 0)$
Έλεγχος ταχύτητας (Σχήμα 4.21)	$Ax_rq = Kp \cdot Verr + KI \cdot Vx_lerr + Kp3 \cdot Verr^3,$ <ul style="list-style-type: none"> $Kp, KI, Kp3 = \text{σταθ.}$ $Verr = Vx_targ - Vxz$ $Vx_lerr = \text{ολοκλήρωμα του Verr}$ 	$Kp = 0.4 \text{ s/m}$ $KI = 0.4 \text{ 1/m}$ $Kp3 = 0.5 \text{ s}^3/\text{m}^3$
Διαμήκης ταχύτητα Ζητούμενη διαμήκης ταχύτητα	Vx $Vx_targ = \sqrt{R * Ay_targ}$	$Vx = 30 \text{ km/h (T = 0)}$



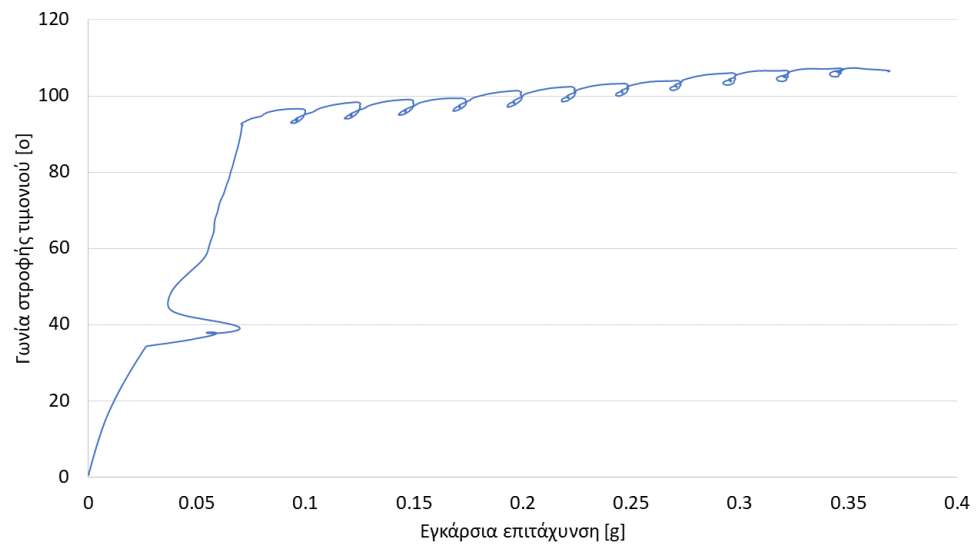
Σχήμα 4.21: Έλεγχος ταχύτητας σε κίνηση κυκλικής τροχιάς και σταθερής κατάστασης

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πιο σημαντικών μεταβλητών κατάστασης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτές είναι η εγκάρσια επιτάχυνση A_y , η γωνία στροφής του τιμονιού δ_H , η διαμήκης ταχύτητα V_x , η γωνία πλαγιολίσθησης β και η γωνία περιστροφής ϕ .

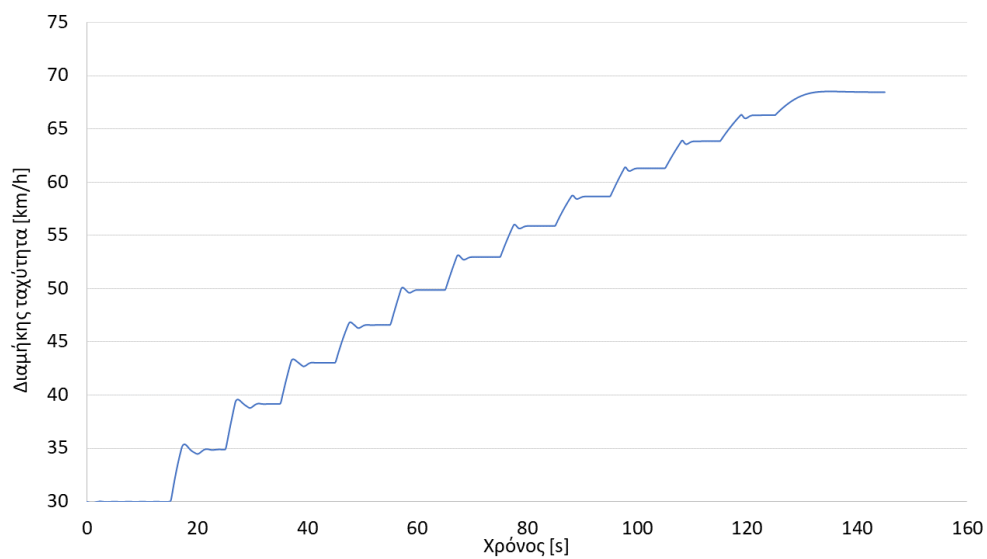
(α)



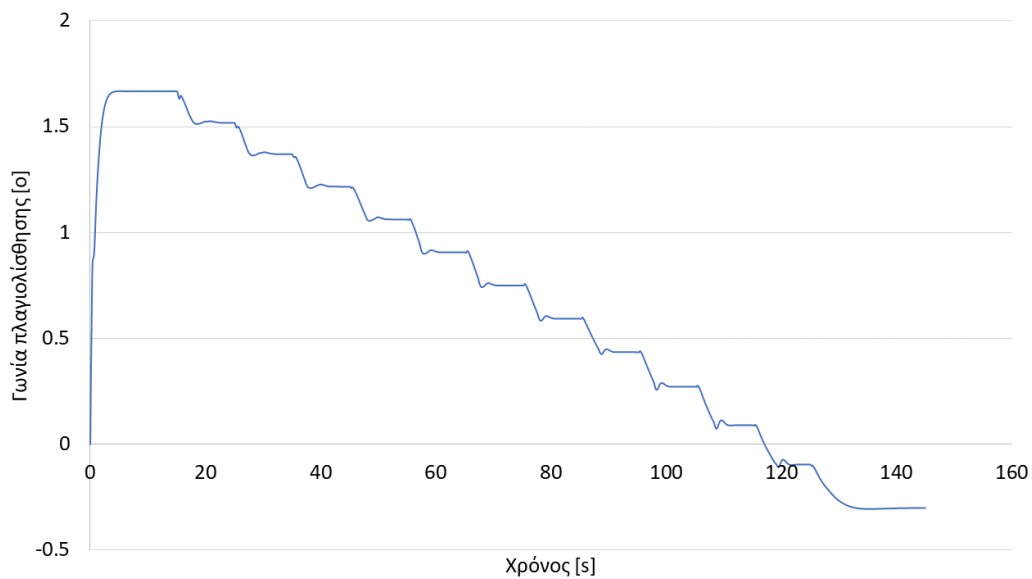
(β)

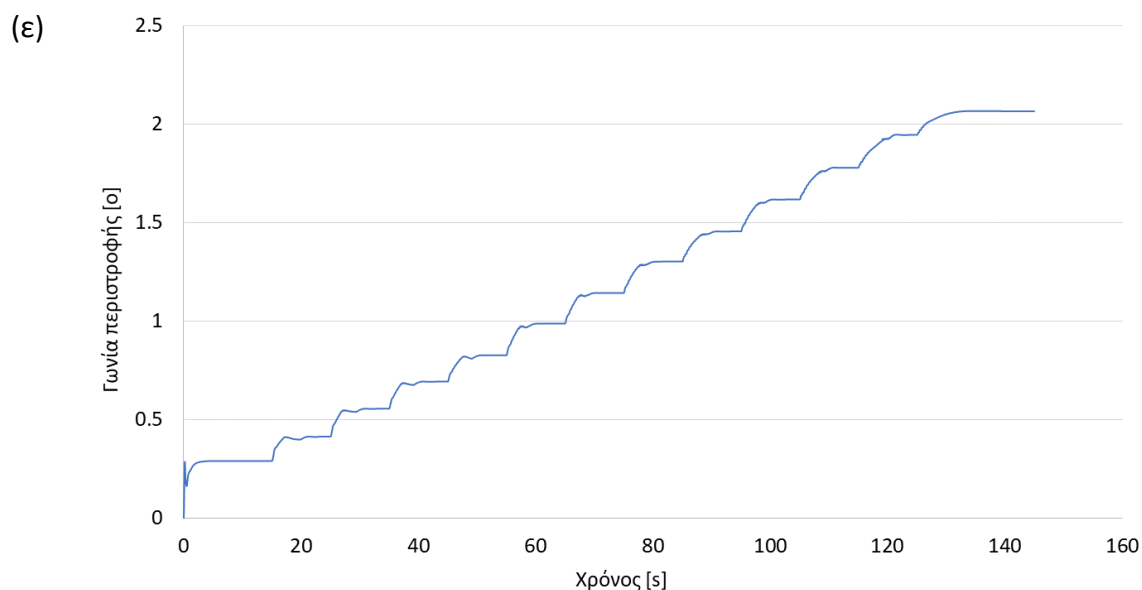


(γ)



(δ)





Σχήμα 4.22: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Γωνία στροφής τιμονιού (γ)Διαμήκης ταχύτητα (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης και (ε)Γωνία περιστροφής του οχήματος σε κυκλική πορεία σταθερής ακτίνας με αρχική ταχύτητα 30 km/h

Στα πρώτα 15 s το όχημα κινείται με εγκάρσια επιτάχυνση 0.0708 g (Σχήμα 4.22(α)), σύμφωνα πάντα και με το στάδιο A (Σχήμα 4.16). Κάθε «σκαλοπάτι» αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα 10 s, ίσο με το T_{wait} , και ουσιαστικά παρουσιάζει μια νέα κατάσταση του οχήματος. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι περίπου 145 s. Αυτό σημαίνει ότι το όχημα δεν προλαβαίνει στο χρονικό διάστημα 125-145 s να φτάσει αφενός στη ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση, αφετέρου σε τέτοια επιτάχυνση ώστε η διαφορά μεταξύ αυτής και της ζητούμενης να είναι μικρότερη από 0.025 g. Με βάση το στάδιο D (Σχήμα 4.19) η προσομοίωση διακόπτεται.

Το διάγραμμα $\delta_H - A_Y$ (Σχήμα 4.22(β))είναι σημαντικό καθώς μέσω αυτού καθορίζεται αν το όχημα βρίσκεται σε υποστροφή ή υπερστροφή. Δηλαδή, αν η αύξηση της εγκάρσιας επιτάχυνσης, η οποία γίνεται κάθε 10 s, μετά τα πρώτα 15 s, απαιτεί αύξηση της γωνίας στροφής του τιμονιού ή μείωση αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, βλέπει κανείς αν το όχημα είναι ευσταθές ή ασταθές. Παρατηρείται ότι η κλίση του διαγράμματος είναι ελαφρά θετική, άρα το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση υποστροφής. Κάθε χρονικό διάστημα των 10 s αποτελείται από δύο τμήματα. Στο πρώτα, το όχημα επιταχύνει μέχρι να φτάσει τη ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση οπότε η γωνία στροφής αυξάνει. Στο δεύτερο, η γωνία στροφής είναι σταθερή καθώς επιτεύχθηκε η ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση και το όχημα βρίσκεται πλέον σε μόνιμη κατάσταση.

Η αρχική ταχύτητα είναι πράγματι 30 km/h ενώ η προσομοίωση τερματίζει όταν το όχημα έχει φτάσει περίπου τα 70 km/h (Σχήμα 4.22(γ)). Επιπλέον, στα πρώτα 60 s, η αλλαγή της κατάστασης είναι τέτοια που το όχημα στο χρονικό διάστημα των 10 s αρχικά επιταχύνει και στη συνέχεια επιβραδύνει για να «πιάσει» τη ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση. Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής «Use brakes» στο Σχήμα 4.21. Αντίθετα, σε μεγάλες ταχύτητες, η μορφή των τμημάτων διαφέρει. Συγκεκριμένα, το όχημα δεν χρειάζεται να φρενάρει για να «πιάσει» τη ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση.

Όταν το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα 30 km/h σε κυκλική πορεία σταθερής ακτίνας ίση με 100 m, η γωνία πλαγιολίσθησης είναι σταθερή και περίπου ίση με 1.67° (Σχήμα 4.22(δ)). Αύξηση της διαμήκου ταχύτητας οδηγεί σε μείωση της γωνίας πλαγιολίσθησης. Σε ταχύτητα περίπου ίση με 63 km/h, η γωνία πλαγιολίσθησης είναι σχεδόν μηδενική. Δηλαδή, η διαμήκης ταχύτητα και η κίνηση του οχήματος είναι στην ίδια κατεύθυνση.

Η γωνία περιστροφής δε φαίνεται να αυξάνεται υπέρμετρα κατά την κίνηση του οχήματος. Άρα, το σενάριο οδήγησης είναι ασφαλές ως προς την ανατροπή (Σχήμα 4.22(ε)).

Τέλος, η προσομοίωση τερματίζει όταν το σφάλμα της εγκάρσιας επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερο του 0.025 g, κάτι που γίνεται στα 145 s (Πίνακας 10). Επομένως, είναι προφανές ότι σε μεγάλες ταχύτητες το όχημα απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο από 10 s ώστε να επιτύχει τη ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση. Χωρίς, όμως, αυτό να σημαίνει ότι θα το καταφέρει εν τέλει, γεγονός που εξαρτάται κυρίως από την ισχύ του κινητήρα του οχήματος.

Πίνακας 10: Σύνοψη αποτελεσμάτων

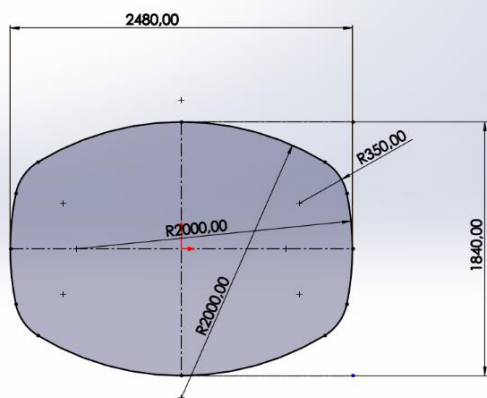
Ολοκλήρωσης προσομοίωσης	145.02 s
Μεταβλητή κατάστασης	Μέγιστη τιμή
Ταχύτητα	68.52 km/h
Εγκάρσια επιτάχυνση	0.37 g
Γωνία περιστροφής	2.1°

5. Αποτελέσματα έρευνας και σχολιασμός

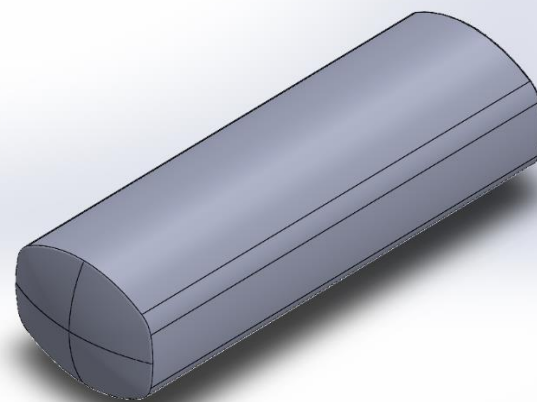
5.1 Μεταλλικές δεξαμενές

Σύμφωνα με το πρότυπο EN13094 [20], οι μεταλλικές δεξαμενές μεταφοράς καυσίμου μπορούν να έχουν κυκλική, ελλειπτική ή κιβωτιοειδή διατομή. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επιλέγεται επιπλέον μια δεξαμενή ορθογωνικής διατομής καθώς αυτή είναι η εκ των προτέρων ορισμένη διατομή του φορτίου για το παραπάνω όχημα στο λογισμικό TruckSim® (Σχήμα 4.2).

Έτσι, λοιπόν, η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος θα γίνει για 4 διαφορετικές δεξαμενές, οι οποίες σχεδιάστηκαν στο λογισμικό Solidworks 3DCAD. Σαν πρότυπο χρησιμοποιήθηκε μια κιβωτιοειδής δεξαμενή (Σχήμα 5.1) με συνολικό όγκο 28187 λίτρα, 7 διαμερίσματα, μήκος 7636 mm και γνωστές όλες τις διαστάσεις της. Εν συνεχεία, σχεδιάστηκε η κυκλική δεξαμενή (Σχήμα 5.2), ίδιου μήκους και διάμετρο τέτοια ώστε να μεταφέρεται ο ίδιος όγκος. Κατόπιν, σχεδιάστηκε η ελλειπτική (Σχήμα 5.3), ομοίως ίδιου μήκους και οριζόντια διάμετρο ίση με το πλάτος της κιβωτιοειδούς (2480 mm). Κατά συνέπεια, η κάθετη διάμετρος είναι τέτοια ώστε να μπορούν να μεταφερθούν τα ίδια λίτρα υγρού. Τέλος, η ορθογωνική (Σχήμα 5.4) έχει, ομοίως, ίδιο μήκος και πλάτος ίσο με το μέγιστο, οπότε το ύψος υπολογίζεται ώστε να μεταφέρεται ο ίδιος όγκος.

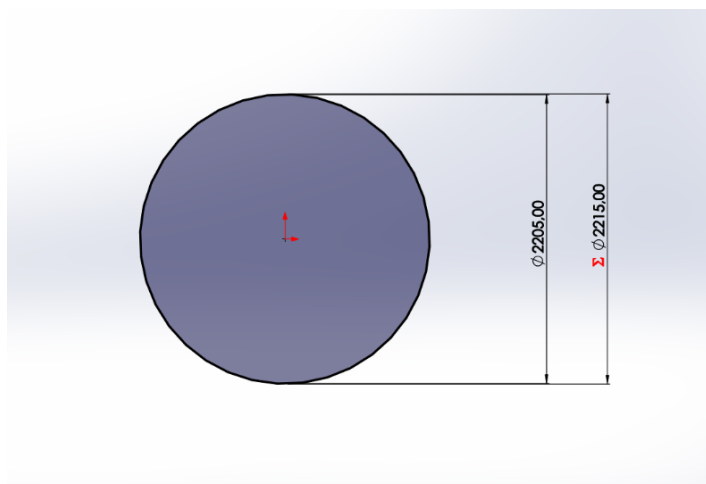


(α)

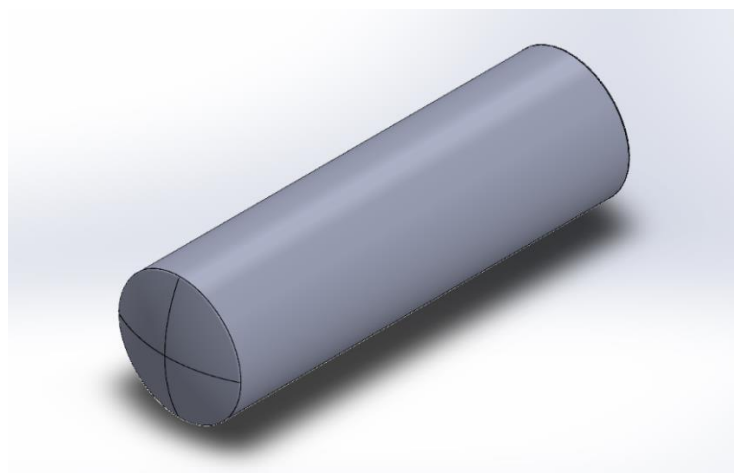


(β)

Σχήμα 5.1: (α) Διατομή και (β) Ισομετρική όψη κιβωτιοειδούς διατομής

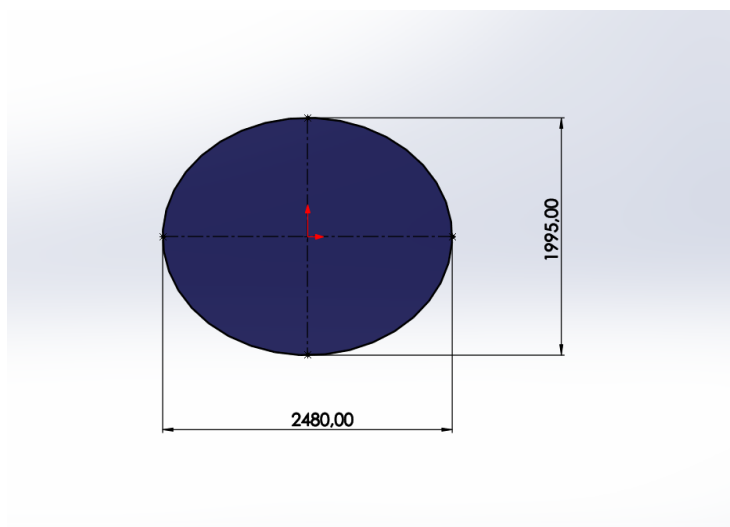


(α)

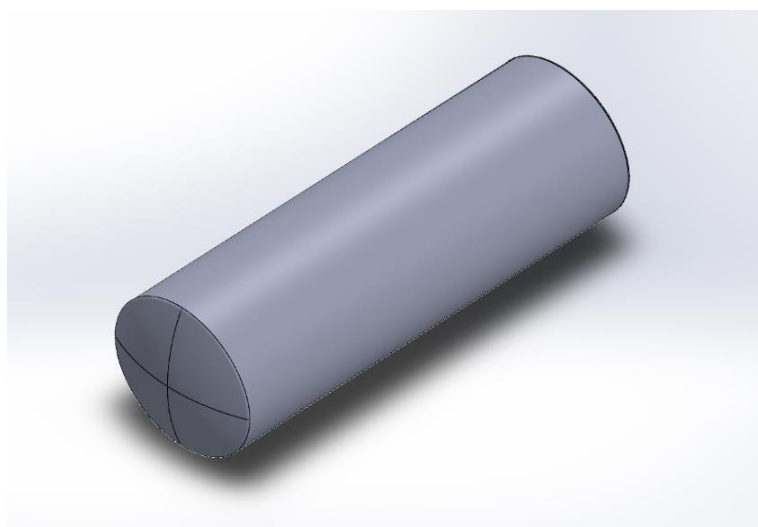


(β)

Σχήμα 5.2: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη κυκλικής διατομής

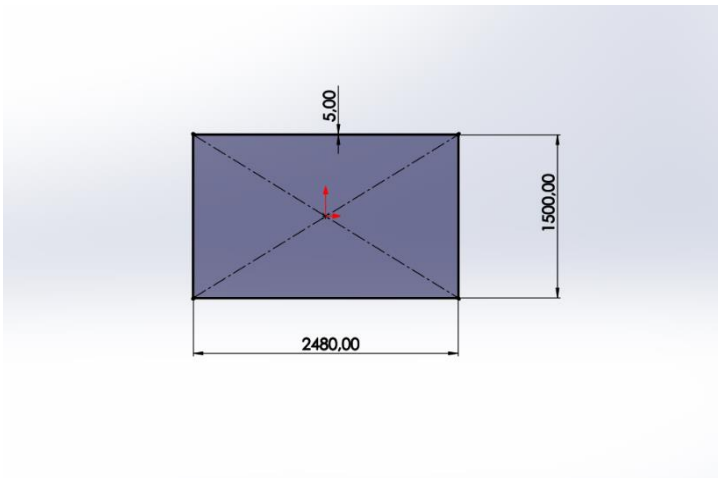


(α)

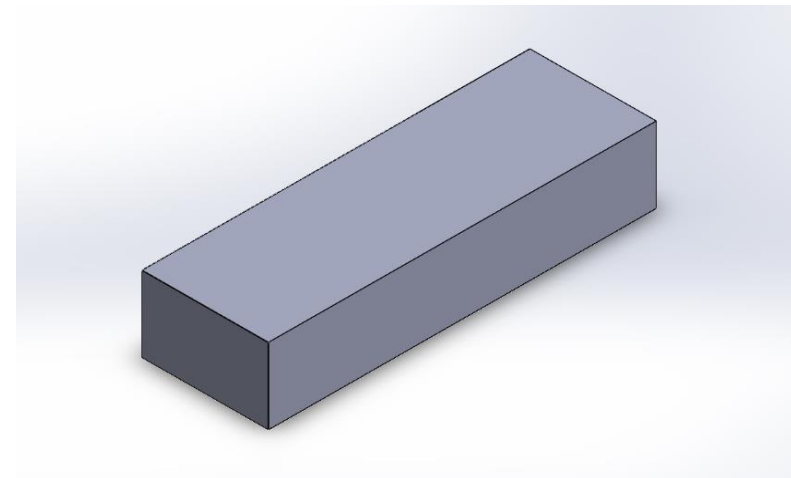


(β)

Σχήμα 5.3: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη ελλειπτικής διατομής



(α)



(β)

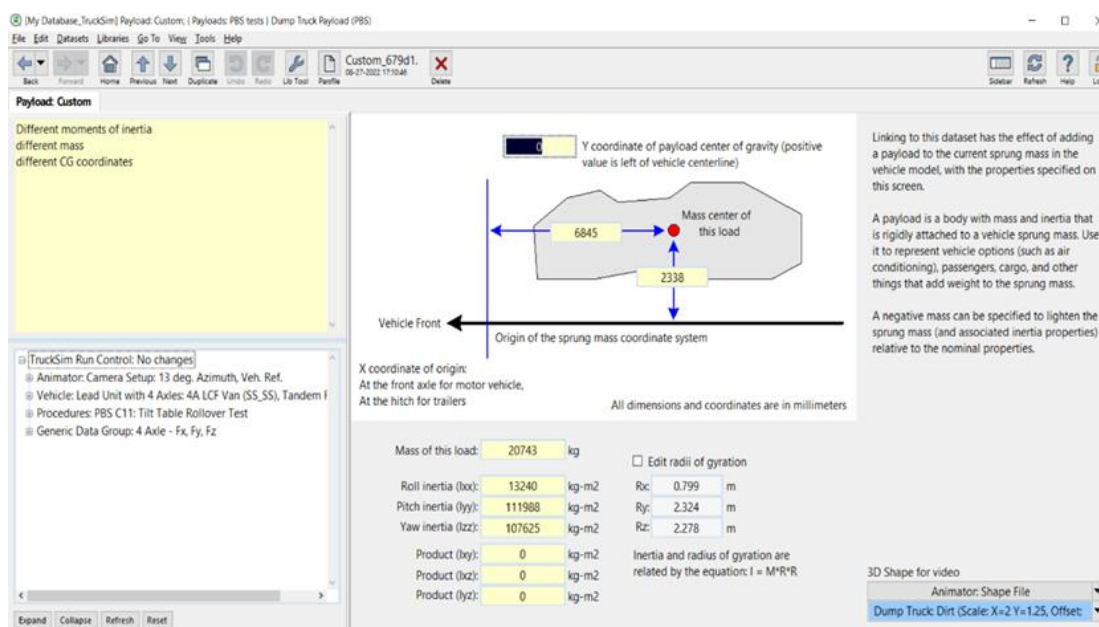
Σχήμα 5.4: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη ορθογωνικής διατομής

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11) παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε διατομής. Το υλικό κατασκευής είναι αλουμίνιο με πυκνότητα 2700 kg/m^3 , ενώ το πάχος κάθε δεξαμενής ισούται με 5 mm σύμφωνα με το πρότυπο EN-13094 [21].

Πίνακας 11: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε διατομής

Διατομή	Όγκος υγρού [λίτρα]	Απόκλιση στον όγκο	Συνολικό Μήκος [mm]	Απόβαρο δεξαμενής [kg]
Κιβωτιοειδής	28062	0.44 %	7636	791
Κυκλική	27990	0.7 %	7636	771
Ελλειπτική	28017	0.6 %	7636	900
Ορθογωνική	28220	0.12 %	7636	922
Κιβωτιοειδής (πρότυπο)	28187	0 %	7636	-

Ο ορισμός του φορτίου στο λογισμικό TruckSim® γίνεται ορίζοντας τη συνολική μάζα του φορτίου, τη θέση του κέντρου μάζας του και τις ροπές αδράνειας για κάθε άξονα (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Ορισμός τυχαίου φορτίου στο λογισμικό TruckSim®

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12) παρουσιάζεται η θέση του κέντρου μάζας του φορτίου κατά το x-z επίπεδο για κάθε δεξαμενή και το συνολικό βάρος του μεταφερόμενου υγρού, εάν θεωρηθεί βαθμός πλήρωσης της δεξαμενής ίσος με 100% . Η αρχή των αξόνων ταυτίζεται με την αρχή των αξόνων της αναρτημένης μάζας του οχήματος. Όσον αφορά στο υγρό που μεταφέρεται από το βυτιοφόρο, αυτό θεωρείται ότι είναι βενζίνη με κωδικό UN1203 και πυκνότητα ίση με 750 kg/m^3 .

Πίνακας 12: Θέση κέντρου μάζας για κάθε δεξαμενή υπό το πλήρες φορτίο

Δεξαμενή	Θέση κ.μ. κατά X [mm]	Θέση κ.μ. κατά Z [mm]	Συνολικό βάρος φορτίου [kg]
Κιβωτιοειδής	6818	2225	21837
Κυκλική	6818	2407.5	21764
Ελλειπτική	6818	2302.5	21913
Ορθογωνική	6818	2055	22087

Επιπλέον, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13) παρουσιάζεται η αλλαγή στις ροπές αδρανείας σύμφωνα με τη διατομή της δεξαμενής.

Πίνακας 13: Ροπή αδράνειας κάθε δεξαμενής υπό το πλήρες φορτίο

Ροπή αδράνειας [kg·m ²]	Κιβωτιοειδής	Κυκλική	Ελλειπτική	Ορθογωνική
I _{xx} (Περιστροφή)	14402	13554	14436	16055
I _{yy} (Κλυδωνισμός)	105139	106632	108876	112913
I _{zz} (Εκτροπή)	109625	106632	111923	120255

5.2 Διερεύνηση ως προς τη διατομή της δεξαμενής

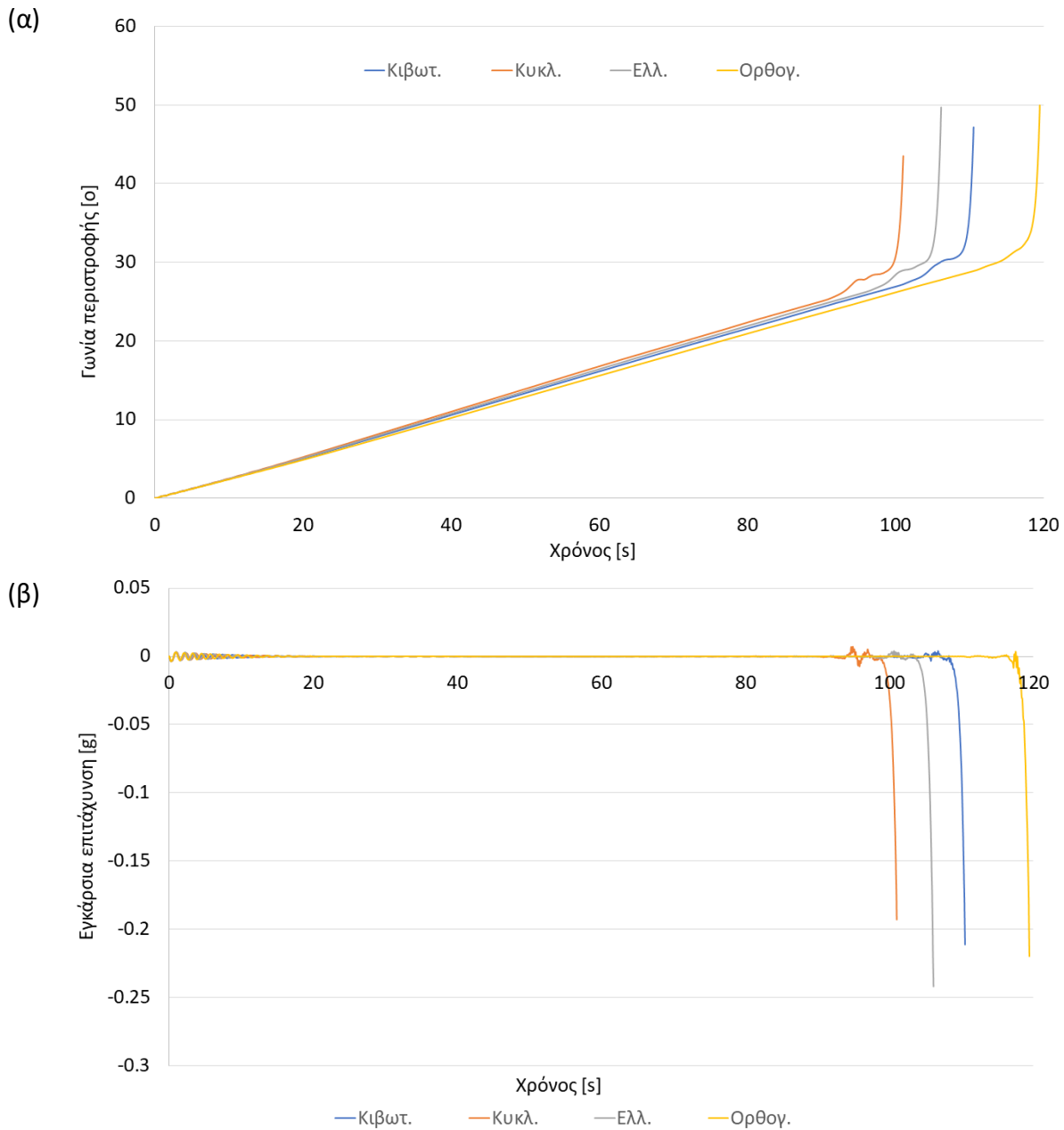
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης της δυναμικής συμπεριφοράς του βυτιοφόρου οχήματος με βάση τις 4 πιθανές διατομές δεξαμενών, την κιβωτιοειδή (Κιβωτ.), την κυκλική (Κυκλ.), την ελλειπτική (Ελλ.) και την ορθογωνική (Ορθογ.). Οι προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν είναι αυτές της ενότητας 4.3. Στόχος είναι η εύρεση της καταλληλότερης δεξαμενής προκειμένου το όχημα να είναι ευσταθές κυρίως ως προς την ανατροπή σε όλα τα σενάρια οδήγησης. Το εκ των προτέρων ορισμένο φορτίο του οχήματος είναι 6789 kg.

Λαμβάνοντας υπόψη αναρτημένες και μη αναρτημένες μάζας, το συνολικό βάρος των οποίων ανέρχεται στα 7101 kg (Πίνακας 3), το συνολικό βάρος του οχήματος (μικτό βάρος) ανέρχεται περίπου στα 14000 kg. Με βάση τον Πίνακα 12, το μεικτό βάρος του οχήματος για κάθε δεξαμενή είναι περίπου 29000 kg, δηλαδή τουλάχιστον 2 φορές πάνω.

Κατά συνέπεια, επιλέχθηκε η εκτέλεση των προσομοιώσεων με ταχύτητα μισή από αυτή που ορίζει το λογισμικό, δηλαδή ταχύτητα ίση με 30 km/h. Προφανώς, η προσομοίωση της ανατρεπόμενης τράπεζας δεν επηρεάζεται από αυτή την επιλογή.

5.2.1 Ανατρεπόμενη τράπεζα

Παρακάτω παρουσιάζεται η γωνία περιστροφής και η εγκάρσια επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου για κάθε δεξαμενή.



Σχήμα 5.6: (α)Γωνία περιστροφής και (β)Εγκάρσια επιτάχυνση του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s

Πίνακας 14: Ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s

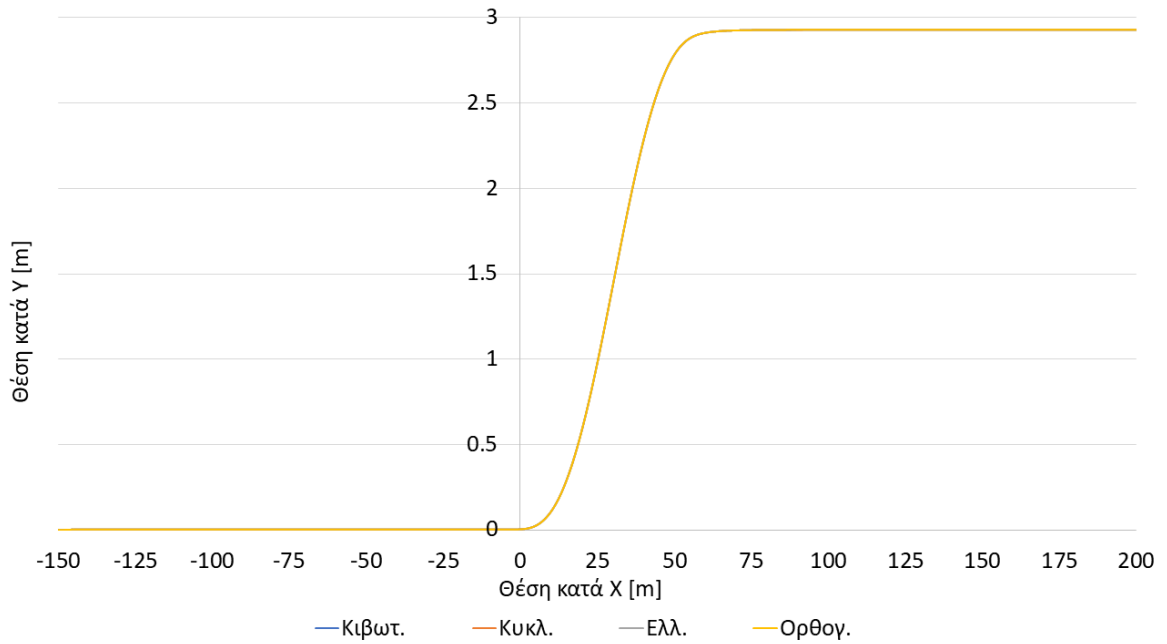
Διατομή δεξαμενής	Κιβωτιοειδής	Κυκλική	Ελλειπτική	Ορθογωνική
Χρονική στιγμή κρίσιμης ανύψωσης τροχού	100.29 s	90.3 s	95.66 s	110.39 s
Άξονας κρίσιμης ανύψωσης	Άξονας 3	Άξονας 3	Άξονας 3	Άξονας 3
Κρίσιμη γωνία κλίσης (ϕ_{TC})	20.06°	18.06°	19.13°	22.08°
Ανατροπή οχήματος				
Χρονική στιγμή ανατροπής	108.24 s	98.73 s	103.25 s	117.49 s
Μέγιστη γωνία περιστροφής οχήματος	30.67°	28.83°	29.7°	32.46°
TTR	0.365 g	0.326 g	0.347 g	0.406 g

Με βάση το Σχήμα 5.6 και τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 14) προκύπτει ότι η δεξαμενή ορθογωνικής διατομής είναι αυτή που ανατρέπεται τελευταία, ακολουθούμενη από τη κιβωτιοειδή. Απεναντίας, πρώτη ανατρέπεται η δεξαμενή κυκλικής διατομής. Παρόλο που οι τιμές της μέγιστης γωνίας περιστροφής που φτάνει το όχημα με κάθε δεξαμενή δεν διαφέρουν πολύ (1°-2° διαφορά), η μέγιστη επιτρεπόμενη εγκάρσια επιτάχυνση (TTR) παρουσιάζει σημαντική διαφορά. Δεν πρέπει να ξεχνάει κανείς ότι αυτή υπολογίζεται με βάση την χρονική στιγμή κρίσιμης ανύψωσης τροχού (Εξίσωση 1) καθώς τότε το όχημα θεωρητικά χάνει την ευστάθεια του ως προς την ανατροπή. Επιπλέον, παρατηρείται μια ομοιότητα ως προς τον άξονα που λαμβάνει χώρα η κρίσιμη ανύψωση τροχού. Συνήθως αυτός είναι κινητήριος [16], όπως συμβαίνει και τώρα.

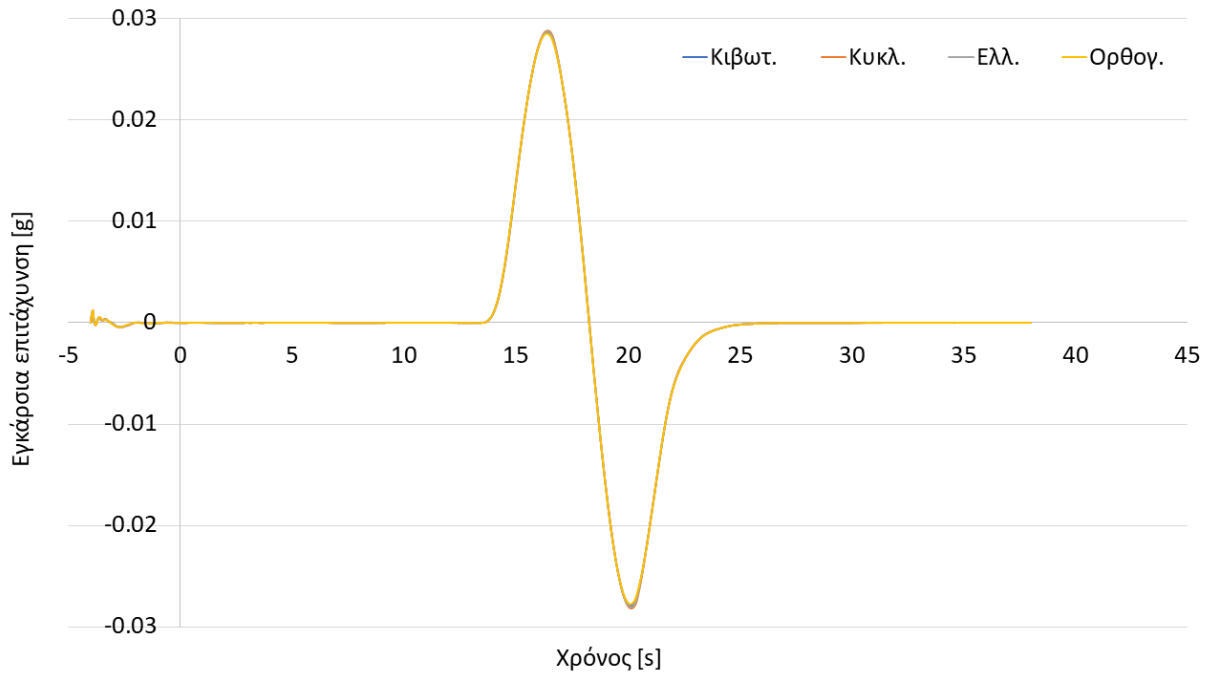
5.2.2 Αλλαγή λωρίδας

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδρομή που ακολουθεί το όχημα, δηλαδή η μεταβολή της θέσης κατά X και Y. Επίσης, δίνεται η εγκάρσια επιτάχυνση, η γωνία περιστροφής και ο ρυθμός εκτροπής συναρτήσει του χρόνου.

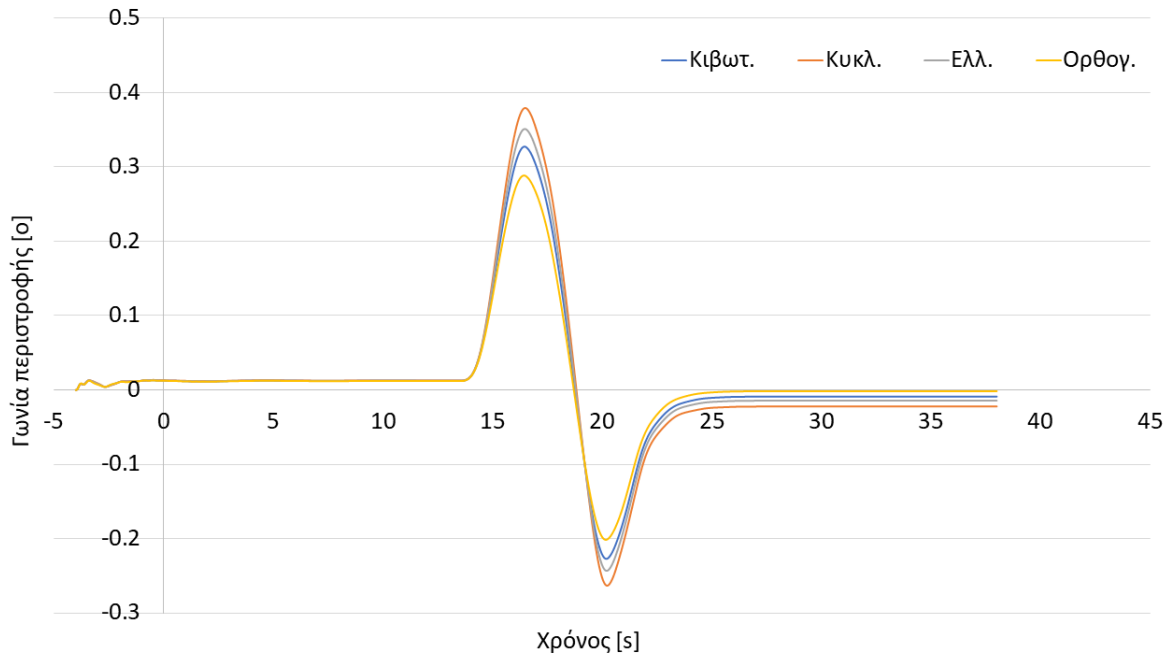
(α)



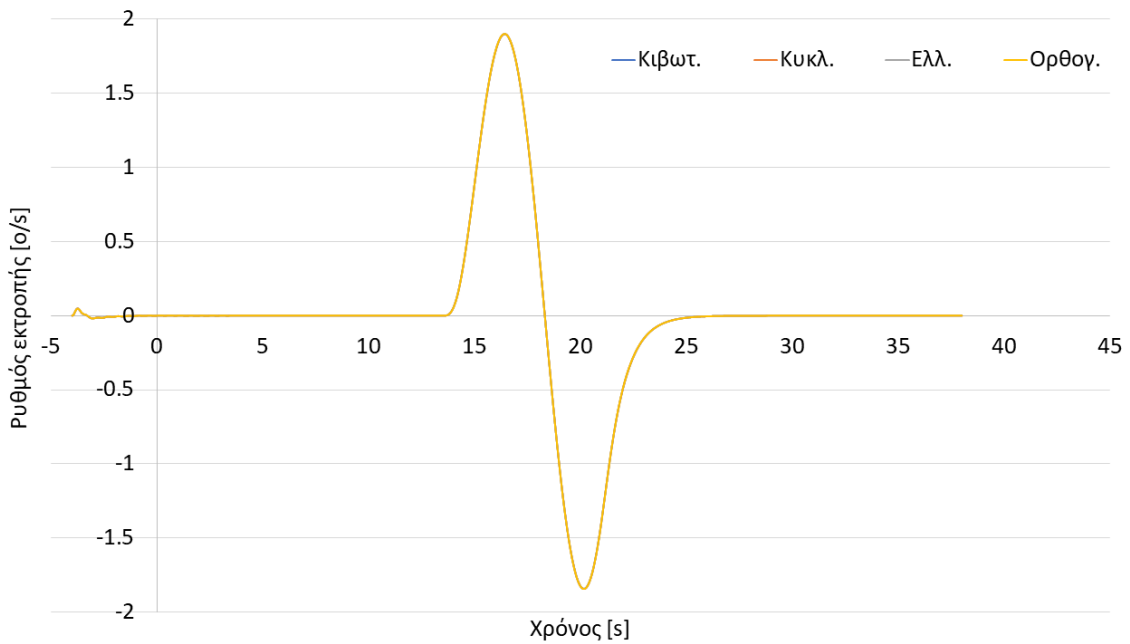
(β)



(γ)



(δ)



Σχήμα 5.7: (α) Διαδρομή (β) Εγκάρσια επιτάχυνση (γ) Γωνία περιστροφής και (δ) Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30 km/h

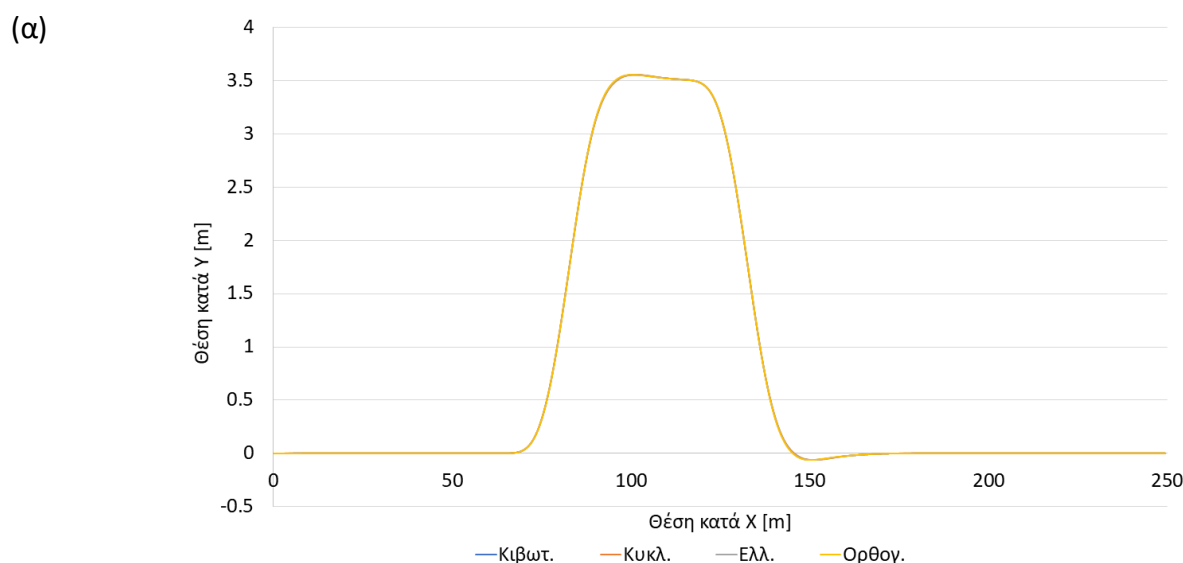
Πίνακας 15: Παράμετροι προσομοίωσης

Συχνότητα f	«Στόχος» εγκάρσια επιτάχυνσης	Ταχύτητα οχήματος
0.4 Hz	0.3 g	30 km/h

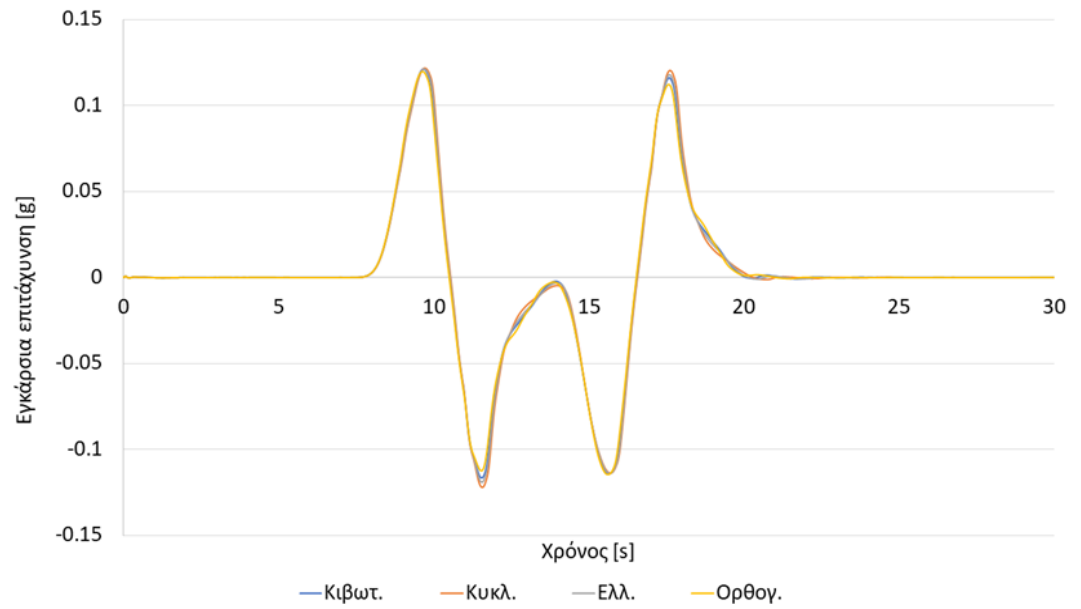
Καταρχάς, η διαδρομή του οχήματος (Σχήμα 5.7(α)) ταυτίζεται με αυτή που έχουμε για εκ των προτέρων καθορισμένες συνθήκες φορτίου και ταχύτητας (Σχήμα 4.7(α)), παρόλο που η ταχύτητα αλλάζει (Πίνακας 15). Ταυτόχρονα, ούτε η διατομή της δεξαμενής φαίνεται να επηρεάζει την συμπεριφορά του οχήματος, καθώς η εγκάρσια επιτάχυνση (Σχήμα 5.7 (β)) και ο ρυθμός εκτροπής (Σχήμα 5.7 (δ)) έχουν ίδια απόκριση για κάθε διατομή. Μια ελάχιστη μεν εμφανή δε διαφορά υπάρχει στο διάγραμμα της γωνίας περιστροφής (Σχήμα 5.7(γ)). Η κυκλική δεξαμενή επιφέρει τη μεγαλύτερη περιστροφή ενώ η ορθογωνική τη μικρότερη. Ωστόσο, το μέγεθος των τιμών είναι πρακτικά αμελητέο.

5.2.3 Διπλή αλλαγή λωρίδας

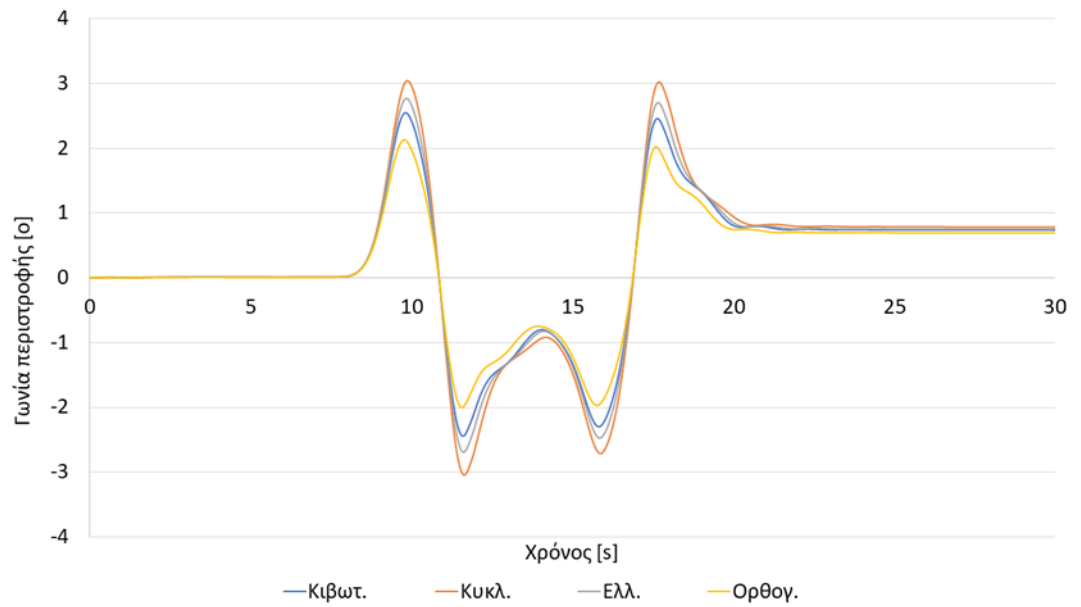
Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδρομή που ακολουθεί το όχημα, δηλαδή η μεταβολή της θέσης κατά X και Y. Επίσης, δίνεται η εγκάρσια επιτάχυνση, η γωνία περιστροφής και ο ρυθμός εκτροπής συναρτήσει του χρόνου.

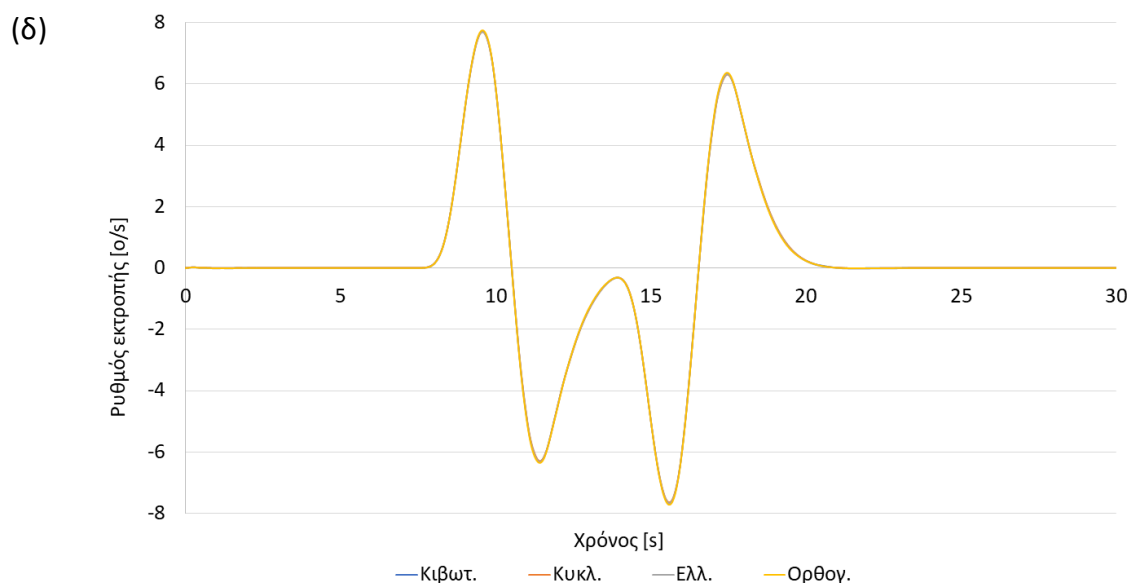


(β)



(γ)

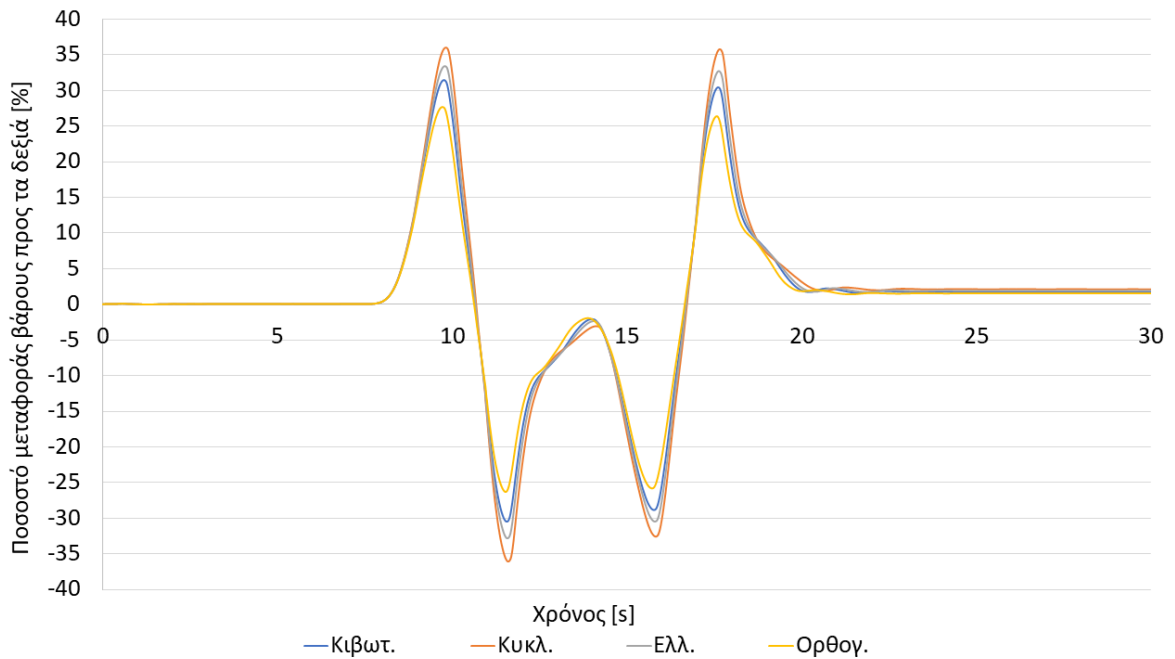




Σχήμα 5.8: (α) Διαδρομή (β) Εγκάρσια επιτάχυνση (γ) Γωνία περιστροφής και (δ) Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30 km/h

Με βάση το Σχήμα 5.8, η διατομή της δεξαμενής δεν επηρεάζει τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το όχημα αλλά ούτε και το ρυθμό εκτροπής αυτού. Μια πολύ μικρή διαφορά παρατηρείται στην απόκριση της εγκάρσιας επιτάχυνσης. Η γωνία περιστροφής λαμβάνοντας τις μέγιστες τιμές στην περίπτωση της κυκλικής κυμαίνεται μεταξύ -3° και 3° ενώ στην περίπτωση της ορθογωνικής ταλαντώνεται με το ελάχιστο πλάτος μεταξύ -2° και 2° . Προφανώς, δεν τίθεται κάποιο πρόβλημα ως προς την ευστάθεια του οχήματος καθώς η ταχύτητα κίνησης είναι μικρή (30 km/h). Ωστόσο, καταλαβαίνει κανείς ότι αυξάνοντας την ταχύτητα θα μεγαλώσουν τα πλάτη ταλάντωσης για κάθε δεξαμενή και αυτή που αναμένεται να ανατραπεί πρώτα είναι η κυκλική.

Μετά την ολοκλήρωση της διπλής αλλαγής λωρίδας, η γωνία περιστροφής για κάθε διατομή φαίνεται να συγκλίνει σε μια τιμή διαφορετική του μηδενός. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι το όχημα αποκτά μια μόνιμη γωνία περιστροφής. Βέβαια, οι τιμές αυτές μπορεί να είναι απόρροια υπολογιστικού σφάλματος. Προκειμένου να διερευνηθεί αυτό το ζήτημα, καταγράφονται οι κάθετες δυνάμεις στα ελαστικά του οχήματος καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, υπολογίζεται το άθροισμα των φορτίων στη δεξιά και αριστερή πλευρά και εν τέλει το πηλίκο μεταφοράς βάρους (Load Transfer Ratio – LTR). Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η μεταφορά βάρους κατά τη δεξιά πλευρά στη διάρκεια της διπλής αλλαγής λωρίδας.



Σχήμα 5.9: Ποσοστιαία μεταφορά φορτίου προς τη δεξιά πλευρά του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής κατά την διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30 km/h

Παρατηρεί, λοιπόν, κανείς ότι στο ξεκίνημα η μεταφορά βάρους είναι μηδενική, δηλαδή η κατανομή βάρους μεταξύ αριστερής και δεξιάς πλευράς είναι συμμετρική. Κατά τη διάρκεια της διπλής αλλαγής λωρίδας, η μεταφορά βάρους αγγίζει μέχρι και το 35%, ενώ στο τέλος παραμένει σταθερή και ίση περίπου με 2%. Επομένως, η παραμένουσα γωνία περιστροφής οφείλεται στην παραμένουσα μεταφορά βάρους μετά την διπλή αλλαγή λωρίδας.

Επίσης, προκειμένου να διερευνηθεί η κατανομή βάρους του οχήματος εμπρός και πίσω, υπολογίζονται τα φορτία σε κάθε άξονα για τα δύο διαστήματα μόνιμης κατάστασης (Πίνακας 16), 0-7.5 s και 20-30 s .

Πίνακας 16: Φορτίο κάθε άξονα για κάθε διατομή δεξαμενής σε σταθερή κατάσταση

Διατομή	Χρονικό διάστημα	Δύναμη ανά άξονα (N)				Συνολικό φορτίο [kg]
		1	2	3	4	
Κιβωτιοειδής	0-7.5 s	25664	25984	116013	117018	29019
	20-30 s	25893	26054	114849	117904	29021
Κυκλική	0-7.5 s	25590	25910	115730	116734	28946
	20-30 s	25858	26019	114278	117830	28948
Ελλειπτική	0-7.5 s	25634	25955	116414	117422	29095
	20-30 s	25915	26076	114864	118590	29097
Ορθογωνική	0-7.5 s	25737	26059	117161	118173	29269
	20-30 s	25989	26151	115841	119170	29271

Από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 16) σημειώνεται ότι για κάθε περίπτωση διατομής της δεξαμενής υπάρχει μια διαμήκης μεταφορά φορτίου (Longitudinal Load Transfer), συγκεκριμένα από τον άξονα 3 προς τους υπόλοιπους άξονες. Το φορτίο που φέρει ο άξονας 3 στο χρονικό διάστημα 0-7.5 s είναι μεγαλύτερο, σε κάθε διατομή, από το αντίστοιχο στο διάστημα 20-30 s. Από την άλλη, το φορτίο που φέρουν οι άξονες 1, 2 και 4 για την ίδια δεξαμενή στο χρονικό διάστημα 0-7.5 s είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στο διάστημα 20-30 s.

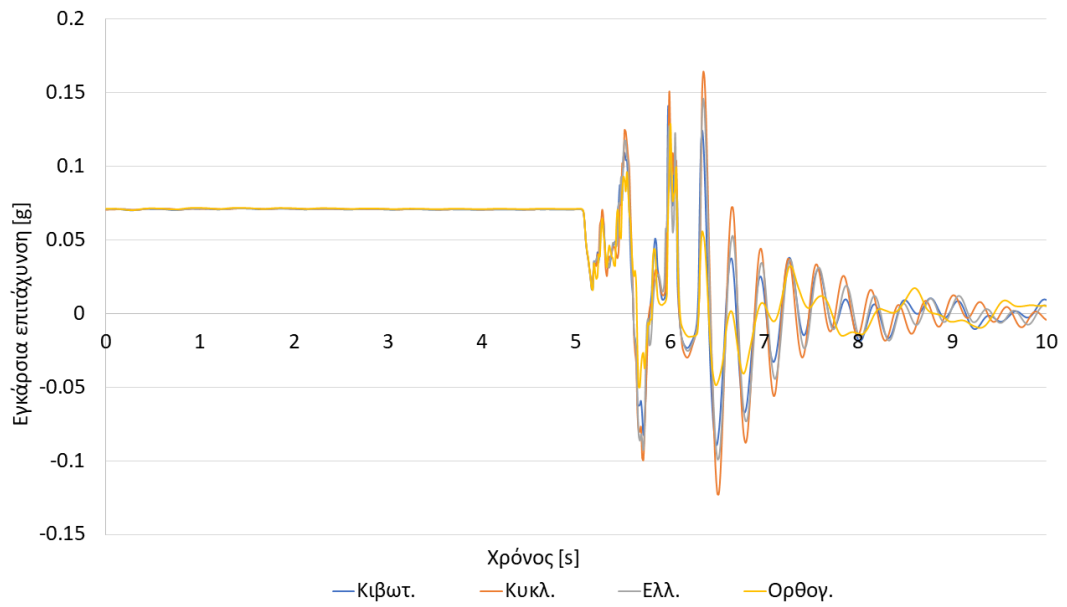
5.2.4 Πέδηση σε στροφή

Οι παράμετροι της προσομοίωσης διαφέρουν ως προς τα εκ των προτέρων καθορισμένα στα εξής:

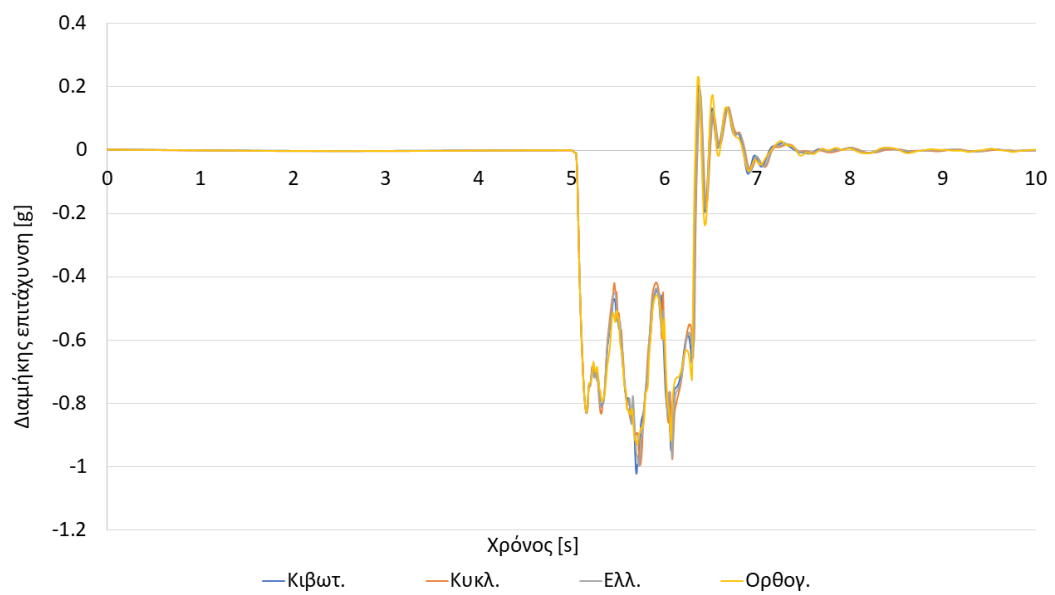
- Ταχύτητα 30 km/h
- Απότομο φρενάρισμα σε χρόνο 5 s και πίεση στον κύριο κύλινδρο (master cylinder) 5 MPa.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εγκάρσια και διαμήκης επιτάχυνση, η διαμήκης ταχύτητα όπως και η πίεση στον κύριο κύλινδρο συναρτήσει του χρόνου.

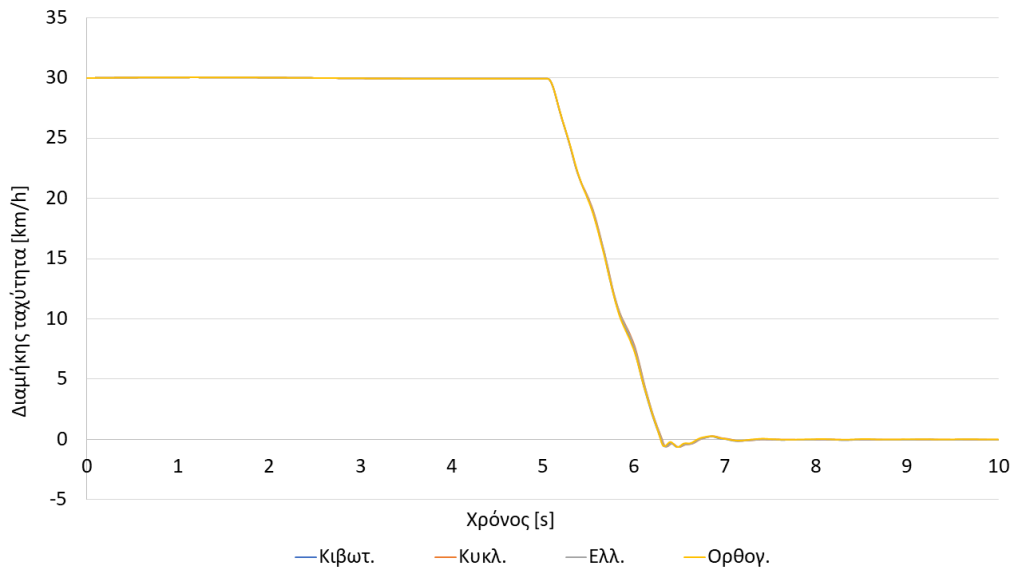
(α)



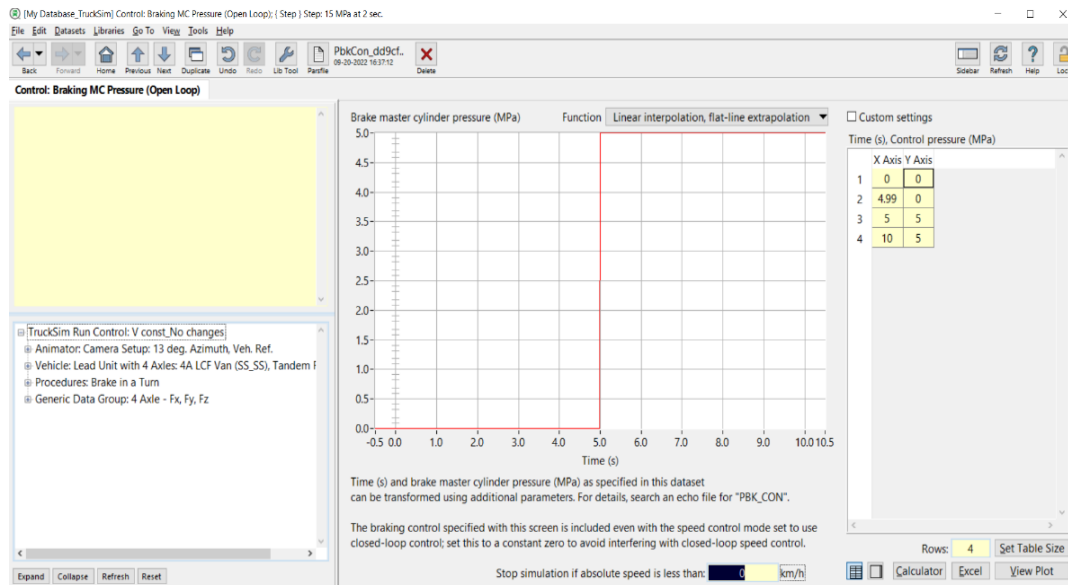
(β)



(γ)



(δ)



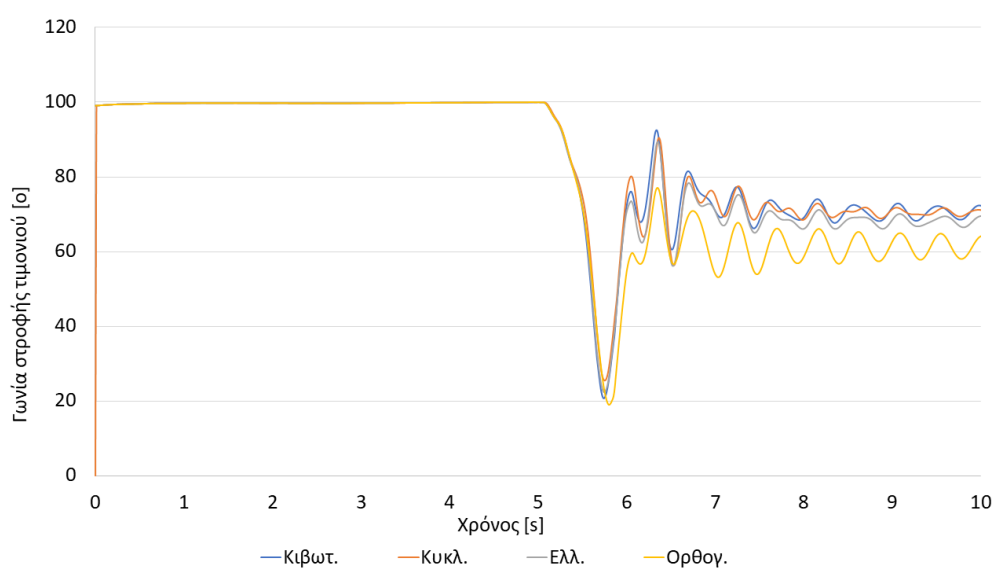
Σχήμα 5.10: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Διαμήκης επιτάχυνση (γ)Διαμήκης ταχύτητα και (δ)Πίεση στον κύριο κύλινδρο του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30 km/h

Με βάση το Σχήμα 5.10, η διατομή της δεξαμενής δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το φρενάρισμα του οχήματος. Η διαμήκης επιτάχυνση ταλαντώνεται μεταξύ των τιμών 0.4-1 g σε όλη τη διάρκεια του φρεναρίσματος, το οποίο διαρκεί κάτι λιγότερο από 2 s. Όσον αφορά την εγκάρσια επιτάχυνση, η ταλάντωση είναι αρκετά μεγαλύτερη. Το εύρος της ταλάντωσης φθίνει αλλάζοντας με σειρά από κυκλική σε ελλειπτική, σε

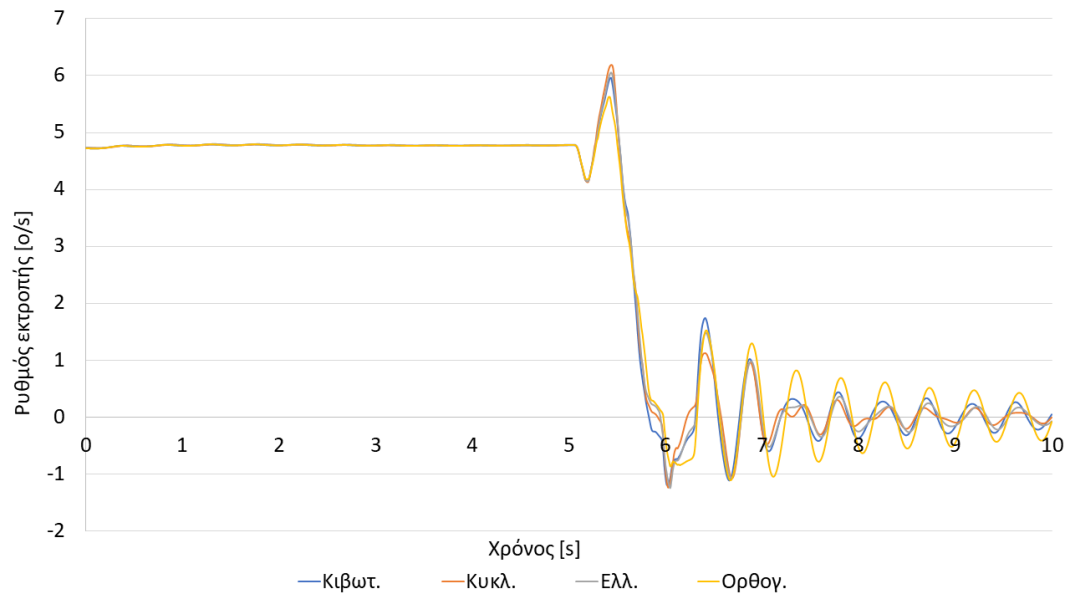
κιβωτιοειδή και τέλος σε ορθογωνική. Κατά συνέπεια, καμία διατομή δεν προσεγγίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη εγκάρσια επιτάχυνση σε στροφή σταθερής κατάστασης (Πίνακας 14), γεγονός που αποδεικνύει ότι όλες οι διατομές είναι ασφαλές ως προς την ανατροπή. Τα πιο σημαντικά αριθμητικά δεδομένα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17).

Παρακάτω παρουσιάζεται η γωνία στροφής τιμονιού, ο ρυθμός εκτροπής, η γωνία περιστροφής και η γωνία πλαγιολίσθησης συναρτήσει του χρόνου.

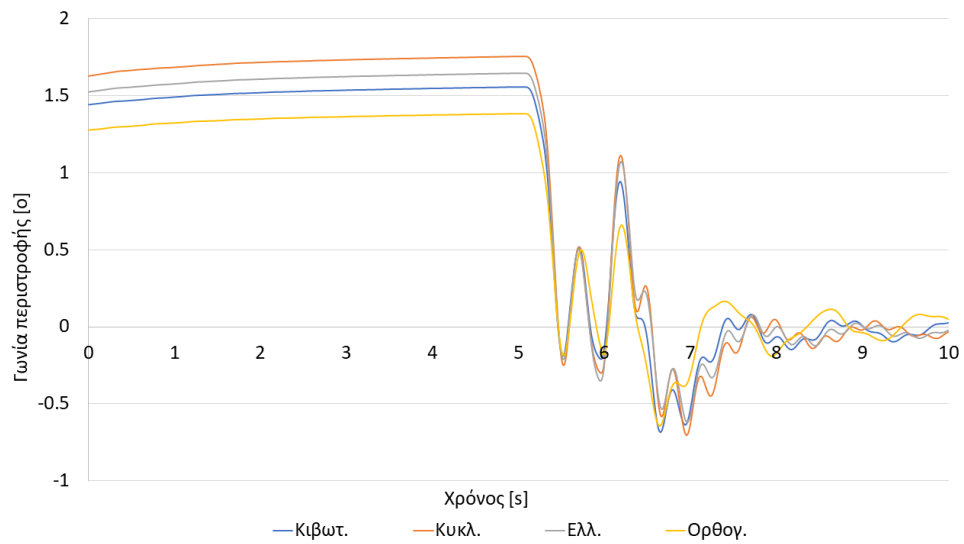
(α)

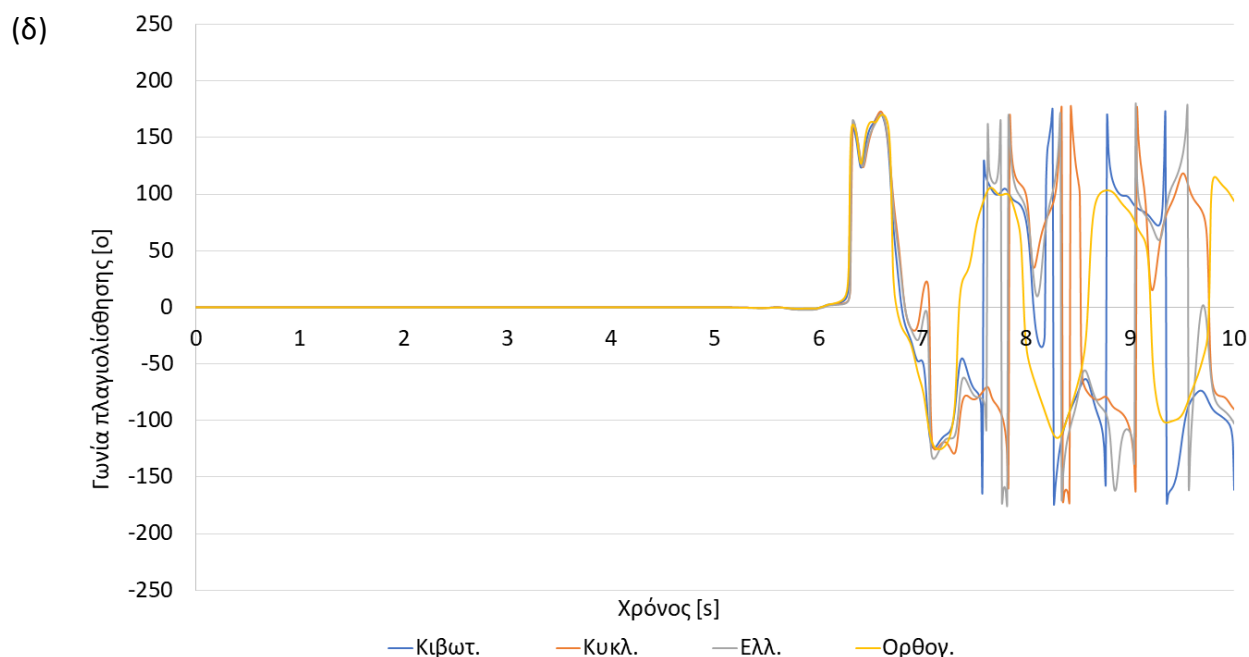


(β)



(γ)





Σχήμα 5.11: (α)Γωνία στροφής τιμονιού (β)Ρυθμός εκτροπής (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30 km/h

Καταρχάς, η γωνία στροφής τιμονιού σε σταθερή κατάσταση είναι ίδια για κάθε διατομή (Σχήμα 5.11(α)) και ίση με 100° . Όταν το όχημα φρενάρει, η ταχύτητα μειώνεται, άρα μειώνεται η εγκάρσια επιτάχυνση. Ταυτόχρονα, μειώνεται και η γωνία στροφής τιμονιού για κάθε διατομή. Αυτό σημαίνει ότι και οι 4 διατομές δημιουργούν κατάσταση υποστροφής. Αντιθέτως, η έναρξη του φρεναρίσματος προκαλεί μια απότομη αύξηση τόσο στο ρυθμό εκτροπής (Σχήμα 5.11(β)) όσο και στη γωνία πλαγιολίσθησης (Σχήμα 5.11(δ)), τα οποία στη συνέχεια φθίνουν. Συνεπώς, το όχημα ξεκινά να ολισθαίνει κατά το φρενάρισμα λόγω μπλοκαρίσματος των τροχών, ενεργοποιούνται τα ABS και το όχημα γίνεται ξανά ευσταθές. Η επίδραση της διατομής στις δύο αυτές μεταβλητές είναι αντίστοιχη με αυτή της γωνίας περιστροφής (Σχήμα 5.11(γ)). Συγκεκριμένα, η κυκλική διατομή έχοντας το ψηλότερο κέντρο βάρους οδηγεί σε μεγαλύτερη γωνία περιστροφής, τόσο κατά την μόνιμη κατάσταση όσο και κατά το φρενάρισμα. Η ορθογωνική διατομή, απεναντίας, με χαμηλότερο κέντρο μάζας δίνει καλύτερη δυναμική συμπεριφορά. Τέλος, οτιδήποτε απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11 μετά τη χρονική στιγμή 7 s, που το όχημα πρακτικά ακινητοποιείται, είναι υπολογιστικό σφάλμα ή προσπάθεια σύγκλισης του λογισμικού. Οι τιμές μετά τα 7 s δεν λαμβάνονται υπόψη στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17).

Πίνακας 17: Αποτελέσματα φρεναρίσματος σε στροφή για κάθε διατομή δεξαμενής

Δεξαμενή	Κιβωτιοειδής	Κυκλική	Ελλειπτική	Ορθογωνική
Χρονική στιγμή αναφοράς t_0 [s]	2	2	2	2
Πίεση φρένων (κύριος κύλινδρος) [MPa]	5	5	5	5
Χρονική στιγμή ακινητοποίησης οχήματος [s]	7	7	7	7
Μέγιστη εγκάρσια επιτάχυνση [g]	0.139	0.164	0.146	0.129
Μέγιστη κατά απόλυτη τιμή διαμήκης επιτάχυνση [g]	1.022	0.995	0.998	0.931
Μέγιστη γωνία περιστροφής [°]	1.56	1.76	1.65	1.38
Μέγιστος ρυθμός εκτροπής [°/s]	5.96	6.19	6.05	5.63
Μέγιστη γωνία πλαγιολίσθησης [°]	171.37	172.97	171.04	170.68

5.2.5 Στροφή μόνιμης κατάστασης

Η συνθήκες και τα στάδια προσομοίωσης είναι τα ίδια με αυτά της ενότητας 4.3.5. Για διευκόλυνση του αναγνώστη παρουσιάζονται ξανά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 18).

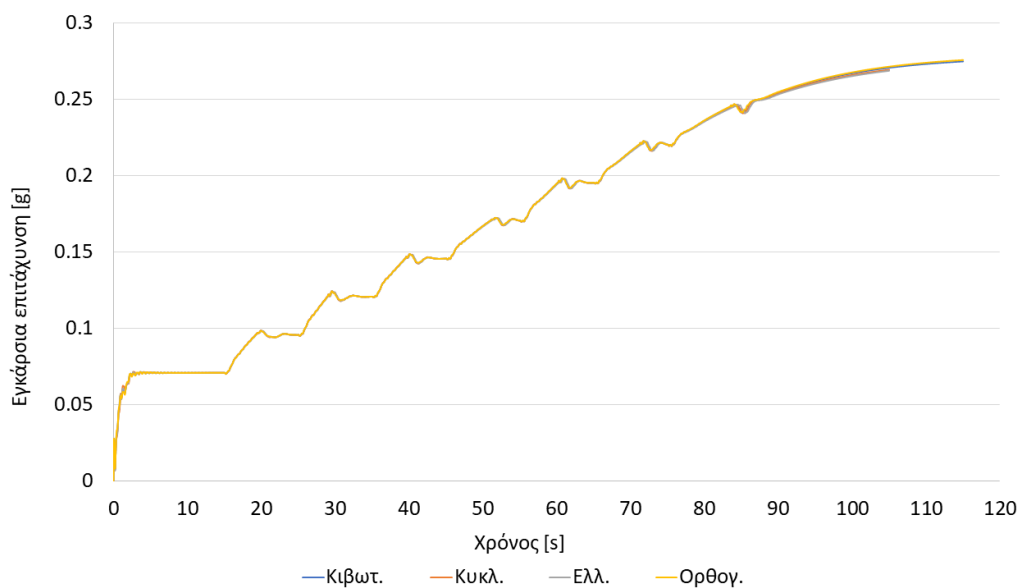
Πίνακας 18: Συνθήκες και παράμετροι προσομοίωσης

Παράμετρος	Σύμβολο-Συνάρτηση	Τιμή
Βήμα εγκάρσιας επιτάχυνσης	$A_y_STEP = \text{σταθερή}$	0.025 g
Ζητούμενη εγκάρσια επιτάχυνση	$A_y_TARGET = A_y_TARGET + A_y_STEP$	$V_x^2(0)/R/g$ [g] ($t = 0$)
Χρόνος αναμονής	$T_WAIT = \text{σταθερός}$	10 s
Ακτίνα στροφής	$R = \text{σταθερή}$	100 m
Ackermann γωνία στροφής τιμονιού	$Str_Ack = Steer_SW$	0° ($t = 0$)

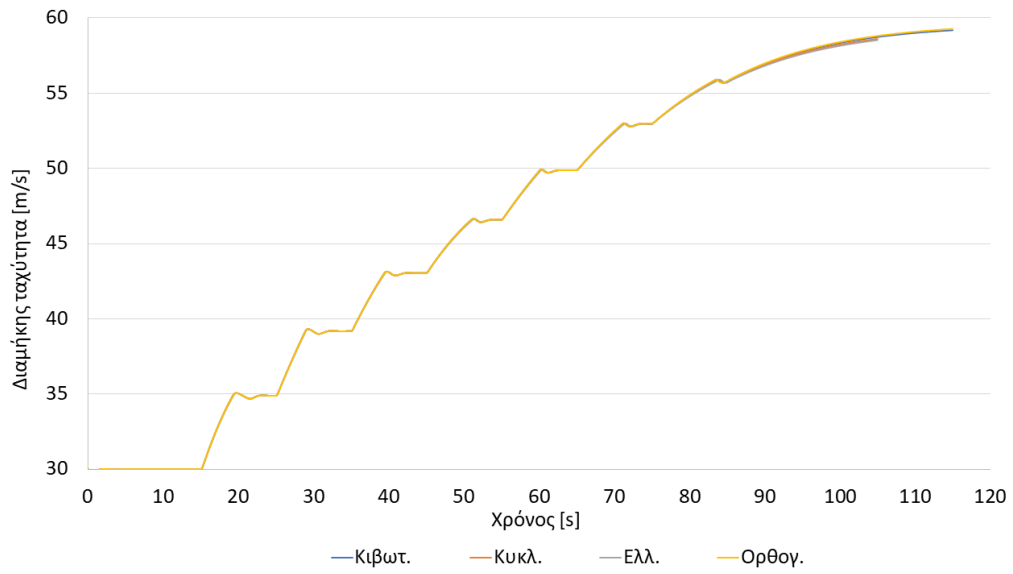
Ackermann μέση γωνία στροφής εμπρόσθιων τροχών	$Str_Ack1 = (Steer_L1 + Steer_R1)/2$	$0^\circ (t = 0)$
Έλεγχος ταχύτητας (Σχήμα 4.21)	$Ax_rq = Kp * Verr + Ki * Vx_lerr + Kp3 * Verr^3,$ <ul style="list-style-type: none"> • $Kp, Ki, Kp3 =$ σταθερά • $Verr = Vx_targ - Vx$ • $Vx_lerr =$ ολοκλήρωμα του $Verr$ 	$Kp = 0.4 \text{ s/m}$ $Ki = 0.4 \text{ 1/m}$ $Kp3 = 0.5 \text{ s}^3/\text{m}^3$
Διαμήκης ταχύτητα Ζητούμενη διαμήκης ταχύτητα	Vx $V_{x_targ} = \sqrt{R * A_{y_targ}}$	$Vx = 30 \text{ km/h (t = 0)}$

Παρακάτω παρουσιάζεται η εγκάρσια επιτάχυνση, η διαμήκης ταχύτητα, η γωνία περιστροφής και πλαγιολίσθησης συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, μπορεί να δει κανείς πως μεταβάλλεται η γωνία στροφής τιμονιού συναρτήσει της εγκάρσιας επιτάχυνσης.

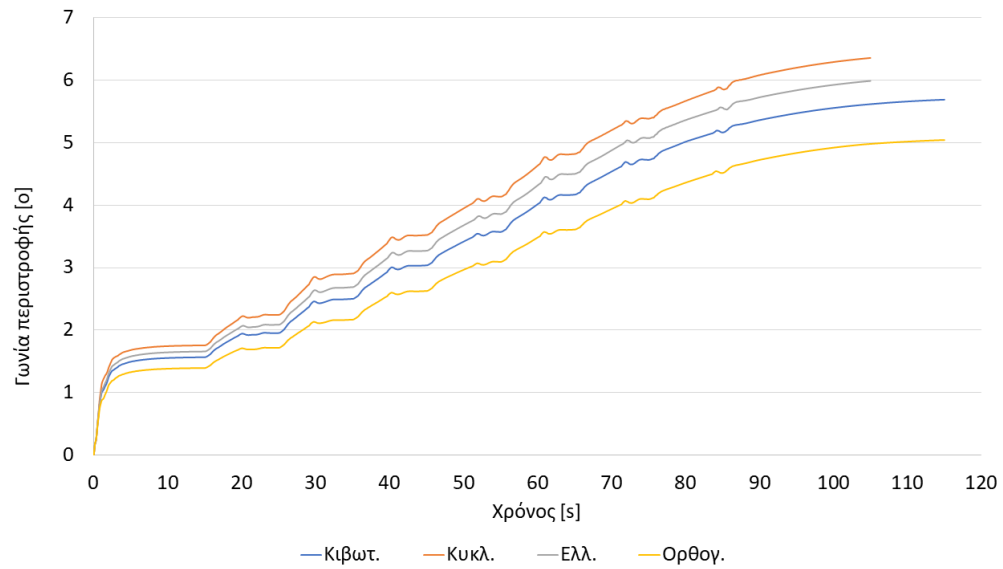
(α)



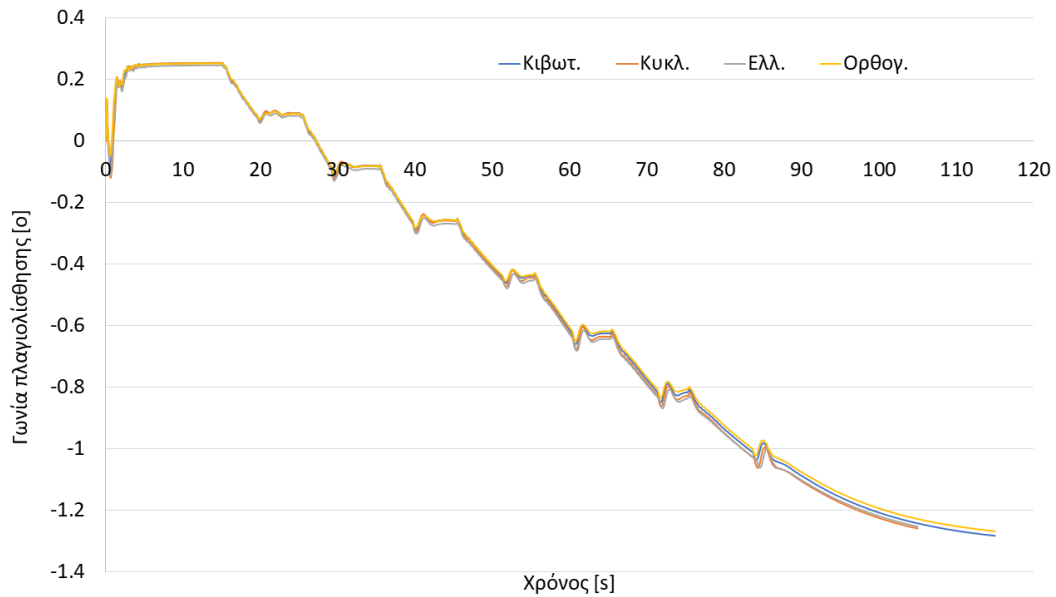
(β)



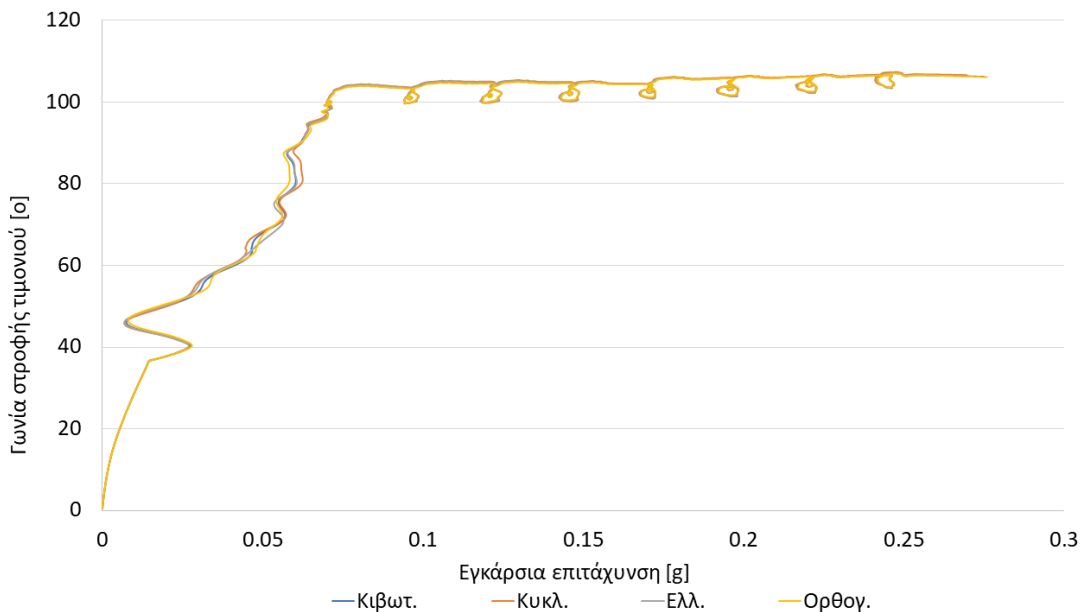
(γ)



(δ)



(ε)



Σχήμα 5.12: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Διαμήκης ταχύτητα (γ)Γωνία περιστροφής (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης συναρτήσει του χρόνου και (ε)Γωνία στροφής τιμονιού του οχήματος συναρτήσει της εγκάρσιας επιτάχυνσης για κάθε διατομή δεξαμενής σε κυκλική πορεία σταθερής κατάστασης με αρχική ταχύτητα 30 km/h

Με βάση το Σχήμα 5.12(α) και το Σχήμα 5.12(β), η αλλαγή της διατομής της δεξαμενής δεν επηρεάζει την βηματική αύξηση της εγκάρσιας επιτάχυνσης, άρα και της ταχύτητας του οχήματος, ανά 10 s. Κατά προσέγγιση, το όχημα με οποιαδήποτε δεξαμενή χρειάζεται 5 s

για να επιταχύνει ενώ στα υπόλοιπα 5 s κινείται με σταθερή ταχύτητα σε στροφή σταθερής ακτίνας, άρα σε μόνιμη κατάσταση. Παρόλα αυτά, μετά τα 55 km/h η επιτάχυνση του οχήματος δυσχεραίνει σημαντικά. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία του συστήματος κίνησης (κινητήρας και κιβώτιο) να παρέχει την απαιτούμενη ροπή ώστε το όχημα βάρους περίπου 30 τόνων να επιταχύνει. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση διακόπτεται λόγω σφάλματος στην εγκάρσια επιτάχυνση. Όμως, η προσομοίωση για κυκλική και ελλειπτική διατομή διακόπτεται νωρίτερα, συγκεκριμένα 10 s πιο νωρίς, από ότι για κιβωτιοειδή και ορθογωνική. Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι αυτό οφείλεται στη διαφορά βάρους. Με βάση τον Πίνακα 12, ο ισχυρισμός αυτός καταρρίπτεται, καθώς για παράδειγμα η ελλειπτική έχει μεγαλύτερο συνολικό βάρος από την κιβωτιοειδή. Επομένως, η κιβωτιοειδής και η ορθογωνική διατομή δεξαμενής συμβάλουν στην καλύτερη επιτάχυνση του οχήματος σε στροφή για ταχύτητα μεγαλύτερη των 55 km/h.

Η δεξαμενή κυκλικής διατομής έχει τη μεγαλύτερη γωνία περιστροφής ενώ η ορθογωνική τη μικρότερη (Σχήμα 5.12(γ)). Καμία, όμως, διατομή δεν δημιουργεί πρόβλημα ευστάθειας ως προς την ανατροπή. Μέχρι και τα 45 km/h η γωνία πλαγιολίσθησης είναι αρκετά μικρή (Σχήμα 5.12(δ)) και σχεδόν ίδια για κάθε διατομή δεξαμενής. Αυξάνοντας περαιτέρω την ταχύτητα, παρουσιάζεται μια μικρή διαφορά, με την κυκλική και δεύτερη την ελλειπτική να δημιουργούν τη μεγαλύτερη γωνία πλαγιολίσθησης. Μέσω του Σχήμα 5.12(ε) παρουσιάζεται η δυναμική απόκριση του οχήματος σε αύξηση της ταχύτητας. Και στις 4 περιπτώσεις δεξαμενών, αύξηση της εγκάρσιας επιτάχυνσης οδηγεί σε αύξηση της γωνίας στροφής του τιμονιού, δηλαδή κατάσταση υποστροφής.

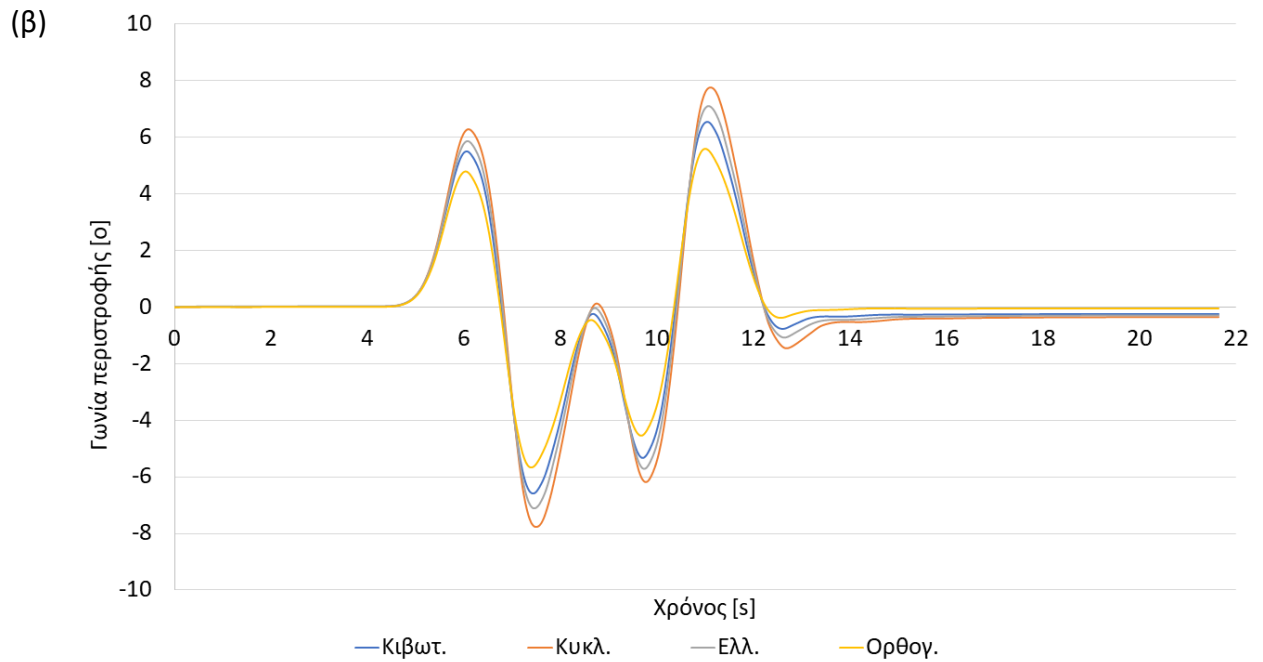
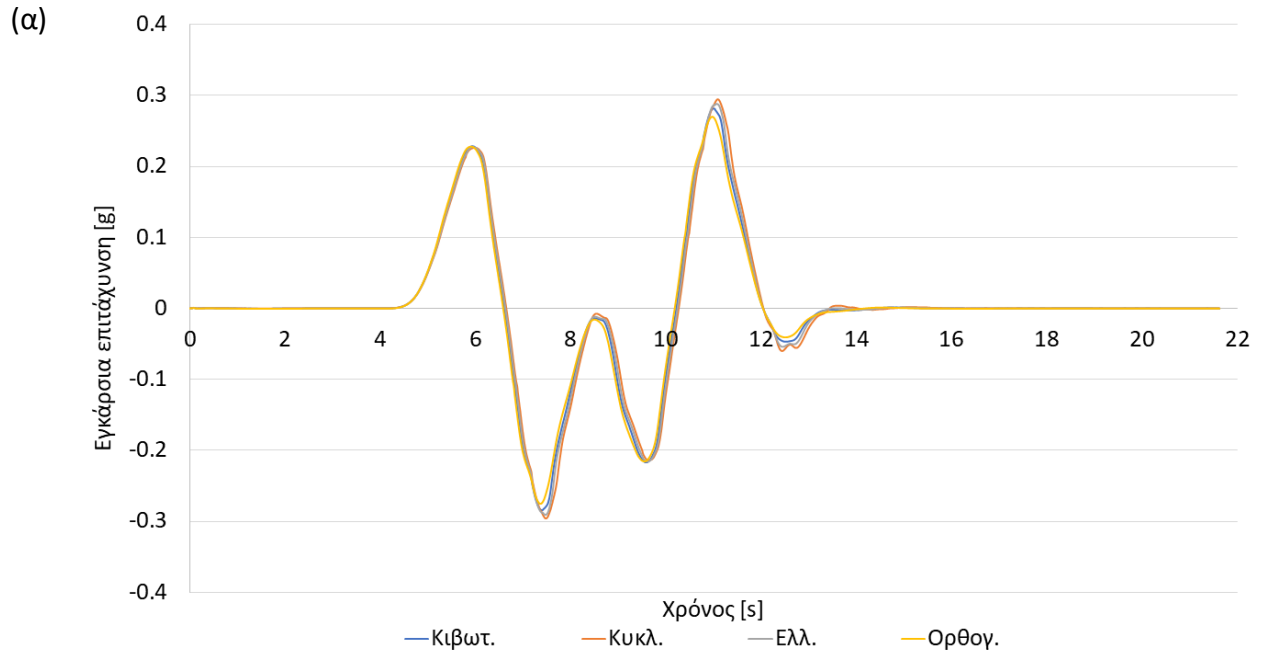
5.3 Διερεύνηση ως προς την ταχύτητα του οχήματος

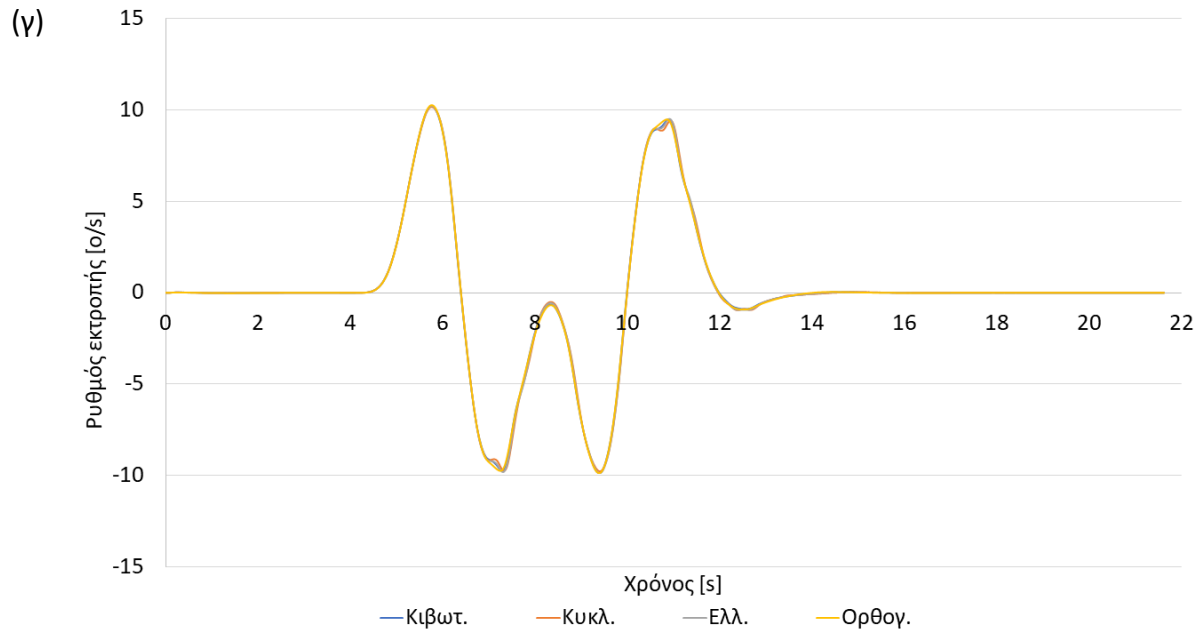
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης της δυναμικής συμπεριφοράς του βυτιοφόρου οχήματος ως προς τις 4 πιθανές διατομές δεξαμενών και ως προς την ταχύτητα του οχήματος. Τα σενάρια οδήγησης που επιλέχθηκαν είναι η διπλή αλλαγή λωρίδας και η πέδηση σε στροφή. Η ταχύτητα είναι σταθερή και ίση με 30/50/70 km/h στη διπλή αλλαγή λωρίδας, ενώ 30/40/60 km/h στο φρενάρισμα σε στροφή. Η προσομοίωση «Ανατρεπόμενη τράπεζα» είναι στατικό τεστ οπότε δεν μπορεί να αξιοποιηθεί κατά την παραμετρική έρευνα ως προς την ταχύτητα. Στη προσομοίωση «Στροφή σταθερής κατάστασης» εξ' ορισμού αυξάνεται η ταχύτητα, ενώ η αλλαγή λωρίδας είναι ενσωματωμένη σαν σενάριο οδήγησης στη διπλή αλλαγή λωρίδας.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μεταβλητών ενδιαφέροντος στη διπλή αλλαγή λωρίδας, δηλαδή εγκάρσια επιτάχυνση, γωνία περιστροφής και ρυθμός εκτροπής, για σταθερή ταχύτητα, εκτός από τα 30 km/h που υπάρχουν ήδη στην ενότητα 5.2.

Με ταχύτητα 50 km/h προκύπτουν τα παρακάτω 3 διαγράμματα.

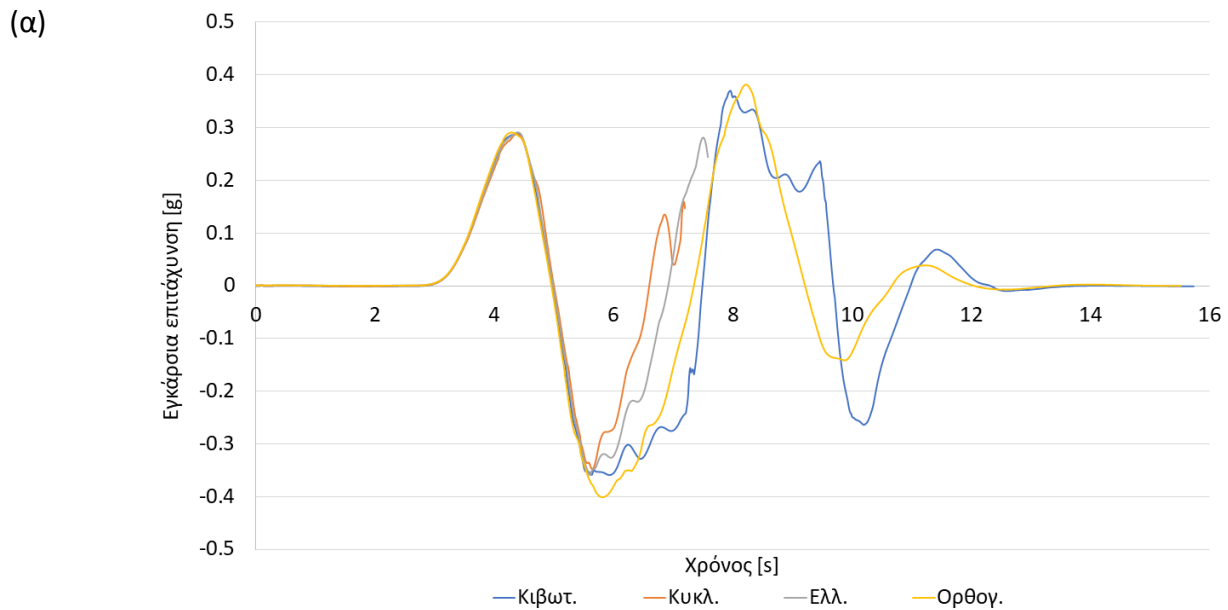
5.3.1 Διπλή αλλαγή λωρίδας

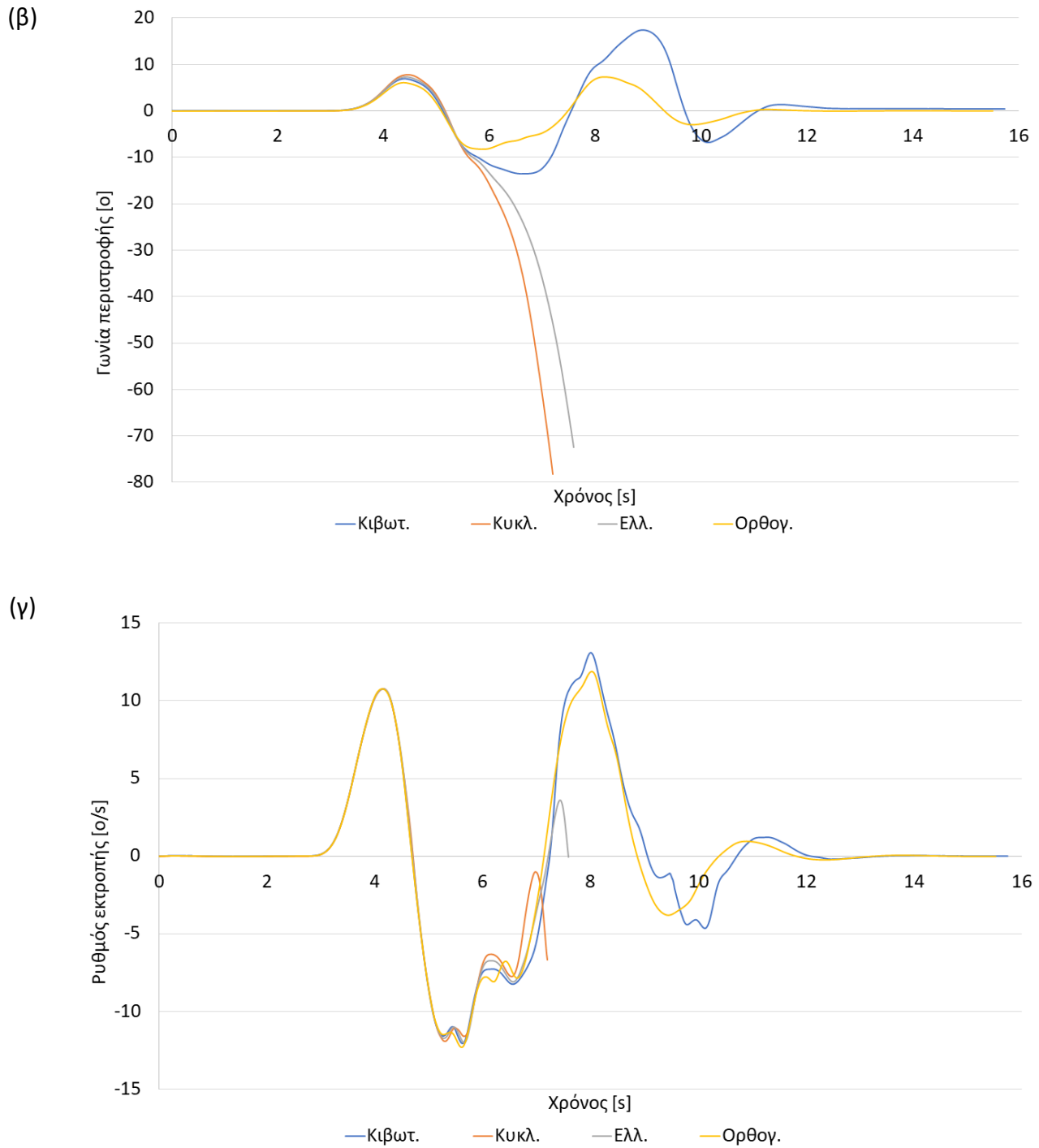




Σχήμα 5.13: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Γωνία περιστροφής και (γ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 50 km/h

Με ταχύτητα 70 km/h προκύπτουν τα παρακάτω 3 διαγράμματα.

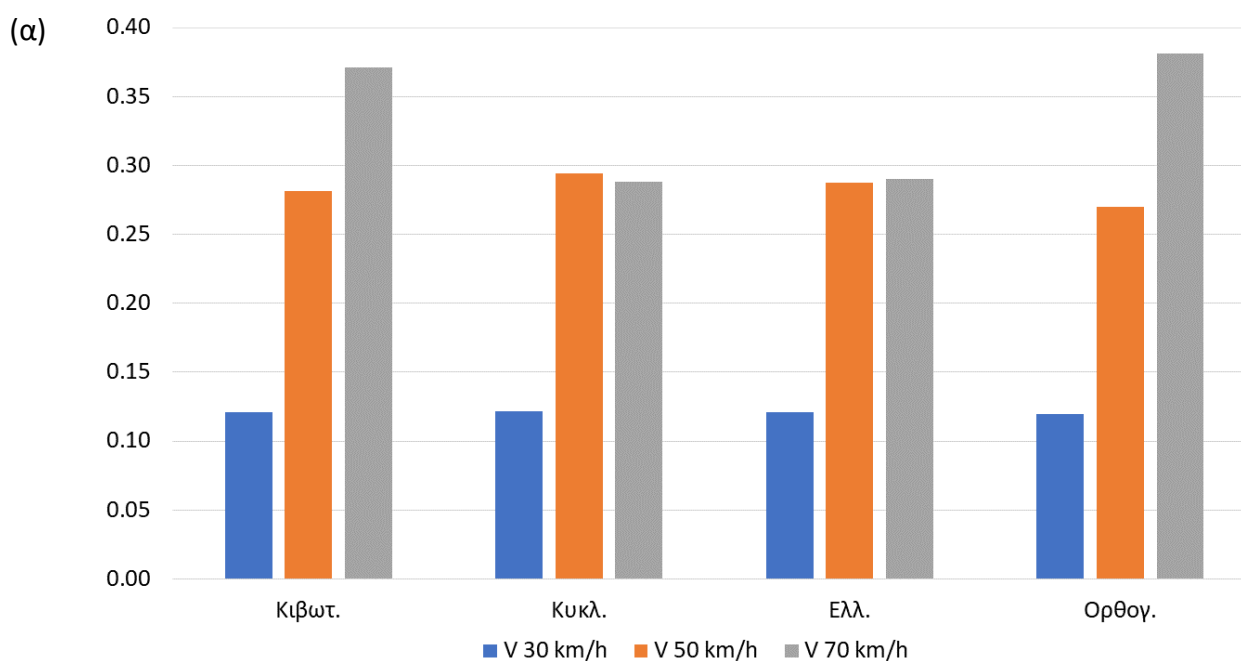


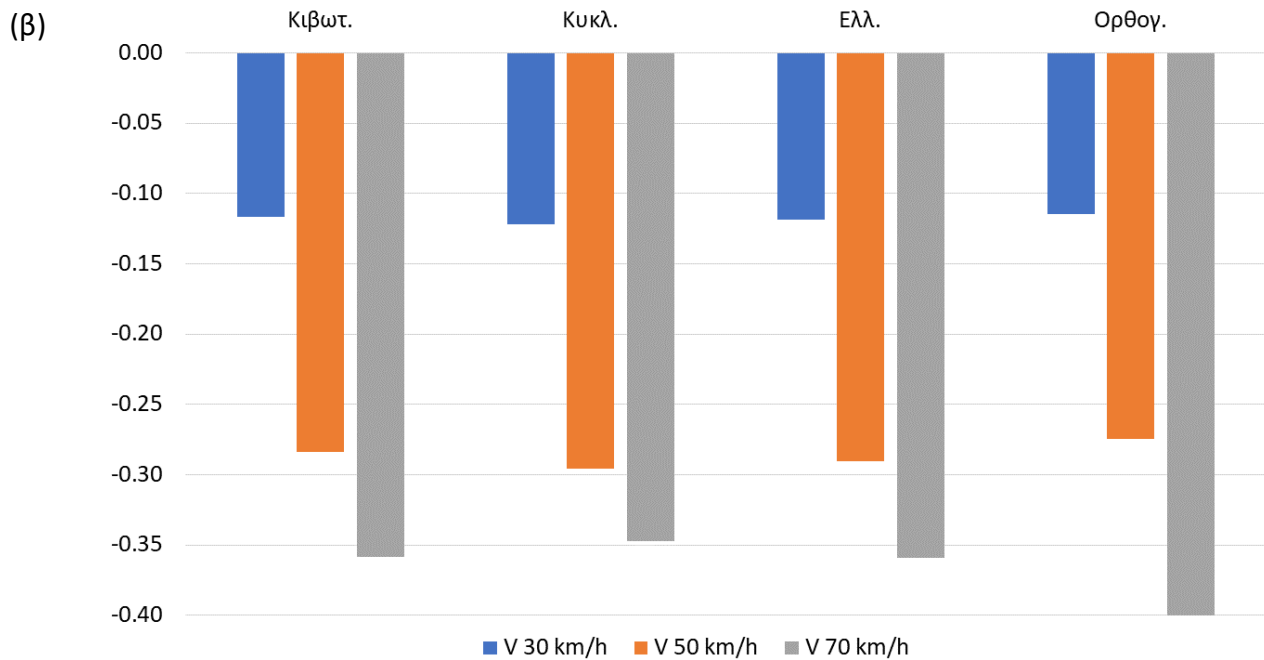


Σχήμα 5.14: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Γωνία περιστροφής και (γ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 70 km/h

Η αύξηση της ταχύτητας από σταθερή ταχύτητα 30 σε 50 km/h στην διπλή αλλαγή λωρίδας δεν δημιουργεί προβλήματα ευστάθειας στο όχημα για κάθε διατομή δεξαμενής. Ουσιαστικά, αυξάνονται τα ακρότατα (μέγιστο και ελάχιστο) των διαγραμμάτων των μεταβλητών ενδιαφέροντος και η διαφοροποίηση μεταξύ των 4 διατομών γίνεται πιο ξεκάθαρη (Σχήμα 5.13). Αντίθετα, με ταχύτητα 70 km/h το όχημα με κάθε διατομή δεξαμενής παρουσιάζει απώλεια ευστάθειας, η οποία μπορεί να οδηγήσει και στην ανατροπή (Σχήμα 5.14). Καταρχάς, η κυκλική και η ελλειπτική διατομή δεν καταφέρνουν να υλοποιήσουν όλη την προσομοίωση. Κιόλας από την πρώτη αλλαγή λωρίδας, το όχημα με κάποια από τις δύο δεξαμενές ανατρέπεται. Μεταξύ ορθογωνικής και κιβωτιοειδούς διατομής, η πρώτη έχει καλύτερη και πιο ομαλή συμπεριφορά από την δεύτερη, η οποία έχει αφενός μεγαλύτερες γωνίες περιστροφής αφετέρου μεγαλύτερο ρυθμό εκτροπής. Τέλος, η κιβωτιοειδής διατομή καθυστερεί να ολοκληρώσει την προσομοίωση κατά 1-2 s σε σχέση με την ορθογωνική, δηλαδή να φτάσει τα 300 m, γεγονός που οφείλεται σε πλαγιολισθήσεις του οχήματος κατά τις αλλαγές λωρίδας.

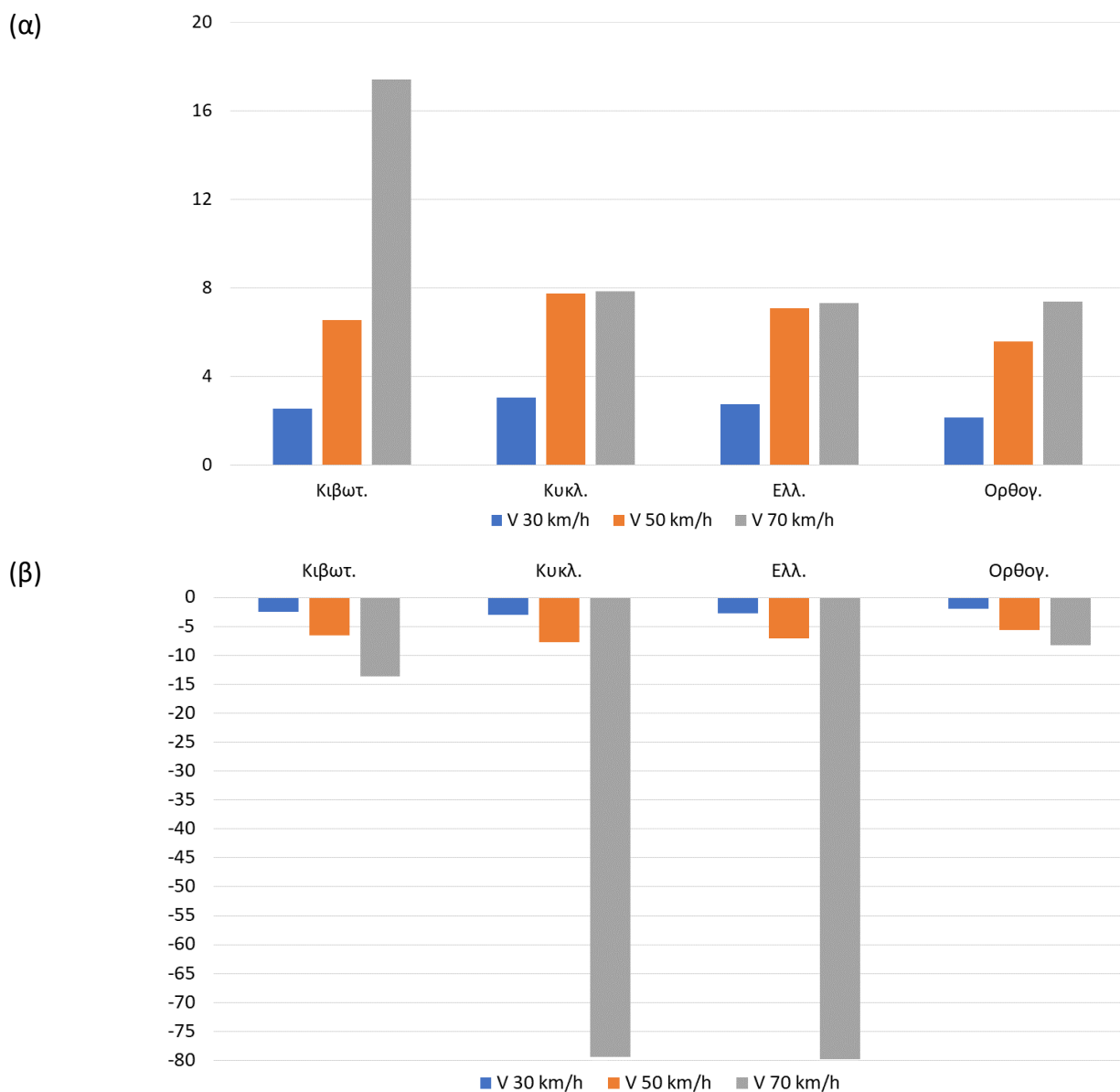
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα ομαδοποιημένων στηλών, που απεικονίζουν τα δύο ακρότατα (μέγιστο και ελάχιστο κατά αλγεβρική τιμή) κάθε μεταβλητής ενδιαφέροντος για κάθε διατομή δεξαμενής και κάθε ταχύτητα κίνησης.





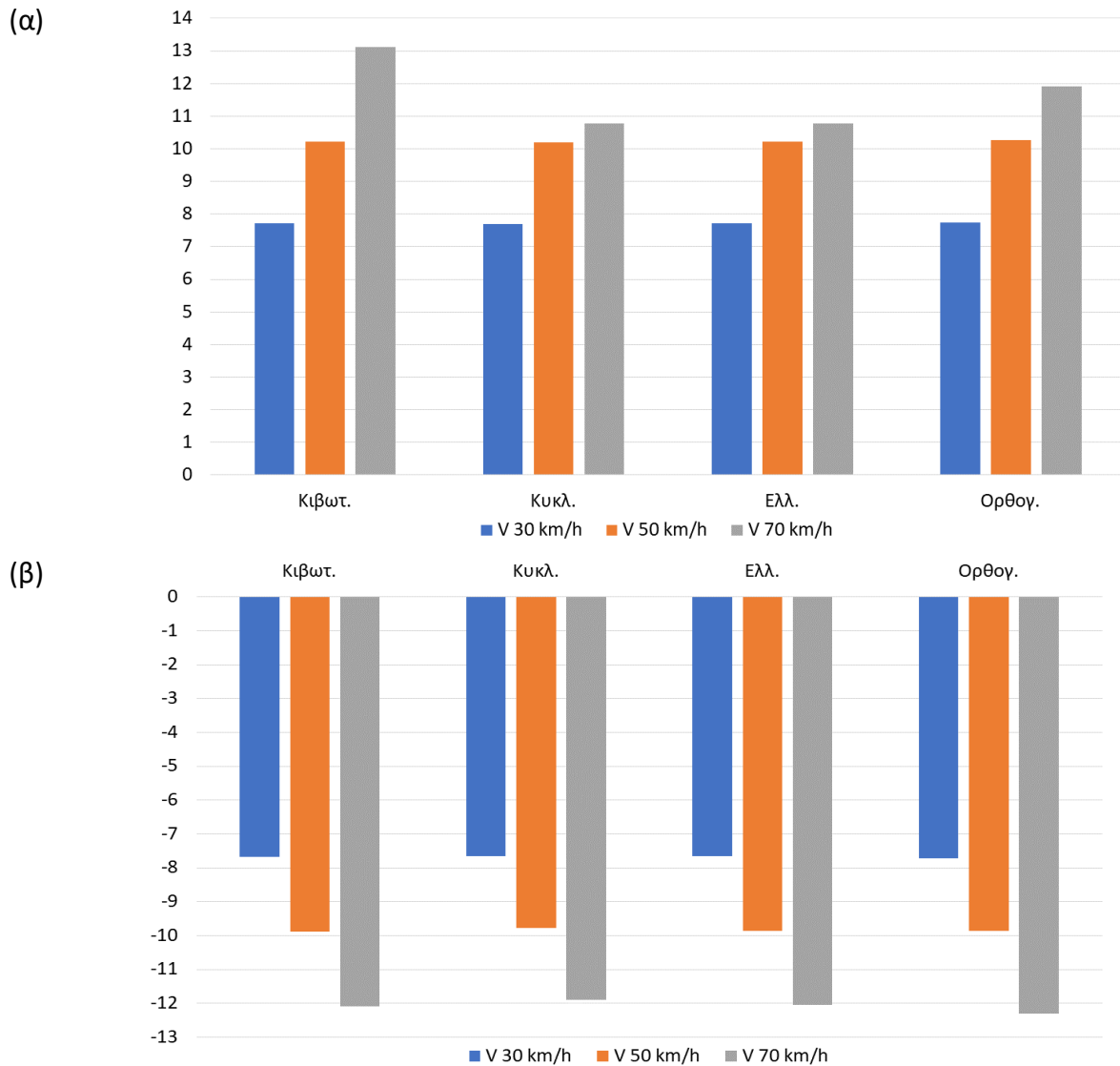
Σχήμα 5.15: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της εγκάρσιας επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30/50/70 km/h

Για την κιβωτιοειδή και την ορθογωνική διατομή, η αύξηση της ταχύτητας από 30 σε 50 και εν τέλει 70 km/h αυξάνει την μέγιστη και ελάχιστη εγκάρσια επιτάχυνση που υφίσταται το όχημα (Σχήμα 5.15). Για την κυκλική και την ελλειπτική διατομή, η μεταβολή της ταχύτητας από 50 σε 70 km/h αριθμητικά δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά, ωστόσο και οι δύο διατομές ανατρέπονται στο τέλος της πρώτης αλλαγής λωρίδας.



Σχήμα 5.16: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της γωνίας περιστροφής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30/50/70 km/h

Τα αποτελέσματα για τη γωνία περιστροφής, στο Σχήμα 5.16, είναι παρόμοια με εκείνα της εγκάρσιας επιτάχυνσης. Αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε αυξημένη γωνία περιστροφής. Η κιβωτιοειδής και η ορθογωνική δεξαμενή ολοκληρώνουν με επιτυχία την διπλή αλλαγή λωρίδας ενώ η κυκλική και η ελλειπτική ανατρέπονται με ταχύτητα 70 km/h.

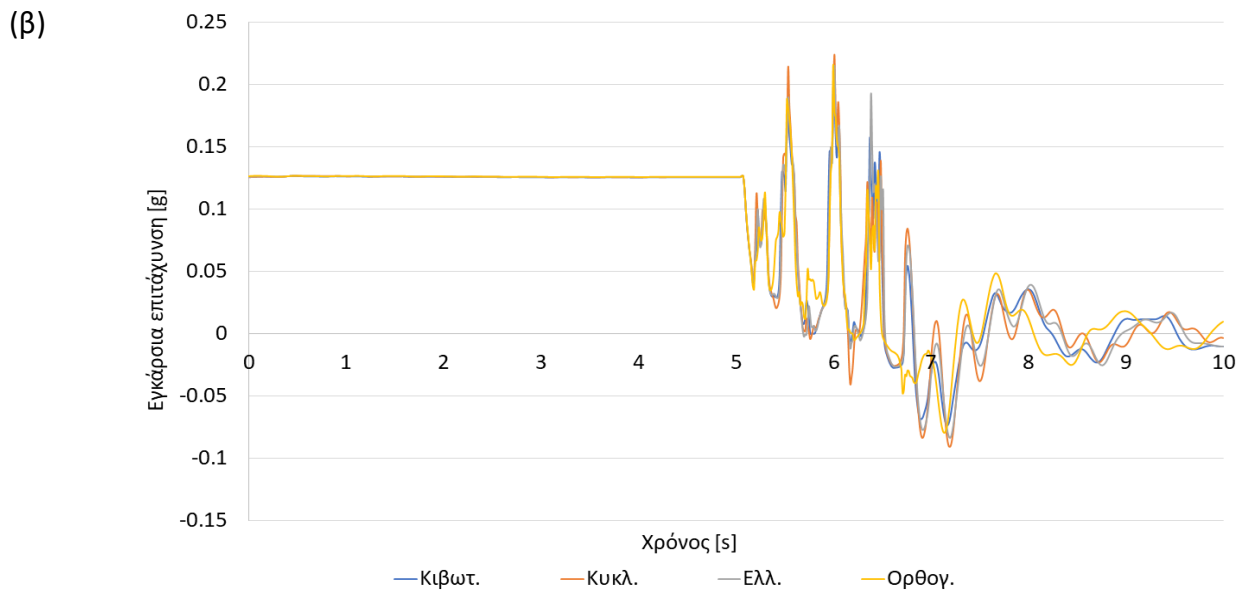
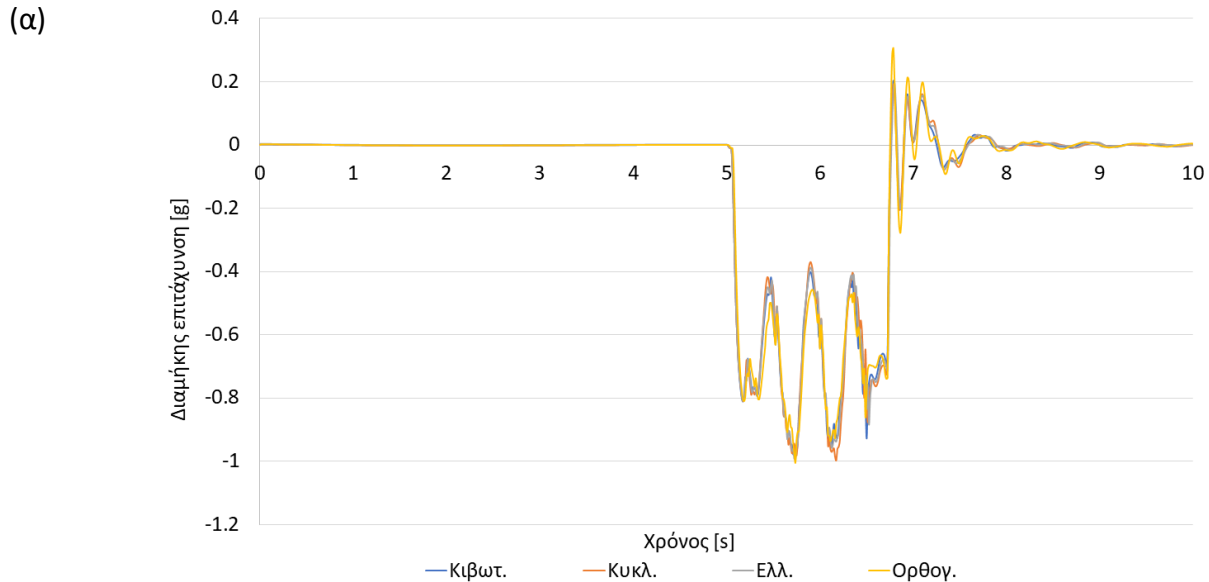


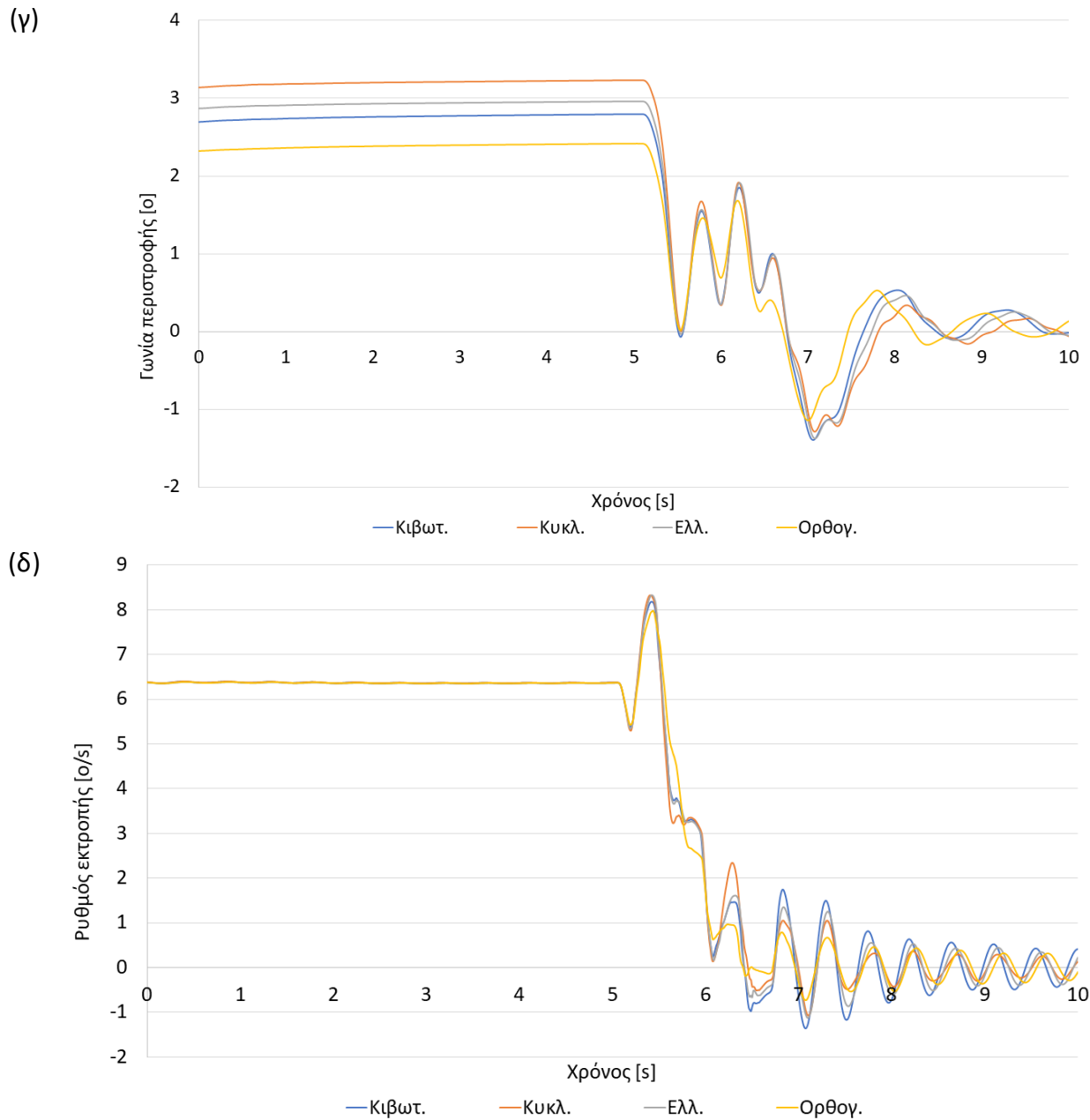
Σχήμα 5.17: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο του ρυθμού εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30/50/70 km/h

Ο ρυθμός εκτροπής (Σχήμα 5.17) αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας για κάθε διατομή δεξαμενής, χωρίς, ωστόσο, να δημιουργούνται φαινόμενα αστάθειας, παρά μόνο μικρές πλαγιολισθήσεις.

5.3.2 Πέδηση σε στροφή

Στο φρενάρισμα σε στροφή εξετάζεται η διαμήκης επιτάχυνση, η εγκάρσια επιτάχυνση, η γωνία περιστροφής και ο ρυθμός εκτροπής. Τα παρακάτω διαγράμματα είναι για ταχύτητα 40 km/h.

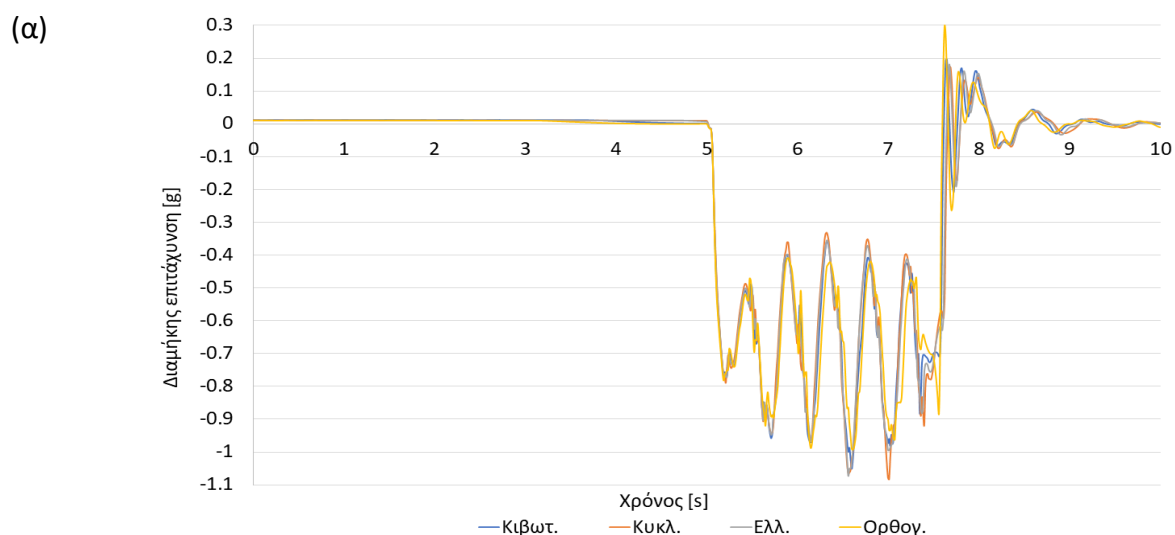




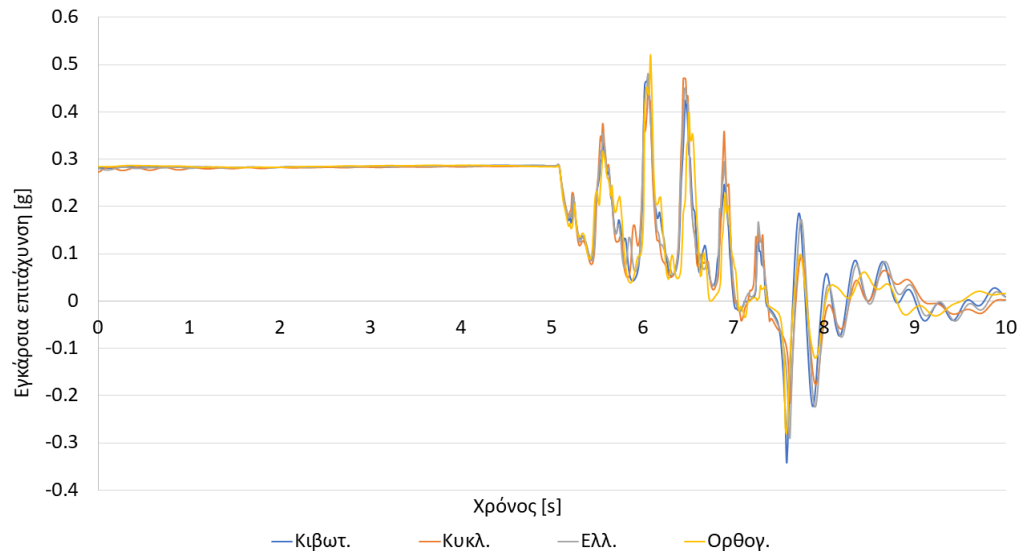
Σχήμα 5.18: (α) Διαμήκης επιτάχυνση (β) Εγκάρσια επιτάχυνση (γ) Γωνία περιστροφής και (δ) Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 40 km/h

Καταρχάς, η αύξηση της ταχύτητας από 30 σε 40 km/h αυξάνει τη ζητούμενη διαμήκη επιβράδυνση, δηλαδή την αρνητική επιτάχυνση (Σχήμα 5.18(α)), αλλά και την εγκάρσια επιτάχυνση (Σχήμα 5.18(β)), ανεξάρτητα από τη διατομή της δεξαμενής. Ουσιαστικά, αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται το όχημα ώστε να ακινητοποιηθεί πλήρως και όχι τόσο η τιμή της επιβράδυνσης. Η διαφορά μεταξύ των διατομών είναι της τάξης του 0.1 g, άρα όχι τόσο ευδιάκριτη στο Σχήμα 5.18. Παρατηρείται, επίσης, ότι λόγω μεγαλύτερης ταχύτητας το όχημα ταλαντώνεται πιο έντονα κατά τον άξονα της περιστροφής (Σχήμα 5.18(γ)). Η αύξηση του ρυθμού εκτροπής είναι μεγαλύτερη κατά τον ξεκίνημα του φρεναρίσματος (Σχήμα 5.18(δ)) και η διαφοροποίηση της διατομής επιδρά στην απόσβεση του ρυθμού εκτροπής λόγω ενεργοποίησης των ABS. Η ορθογωνική διατομή φαίνεται να συμπεριφέρεται καλύτερα καθ' όλη τη διάρκεια του φρεναρίσματος.

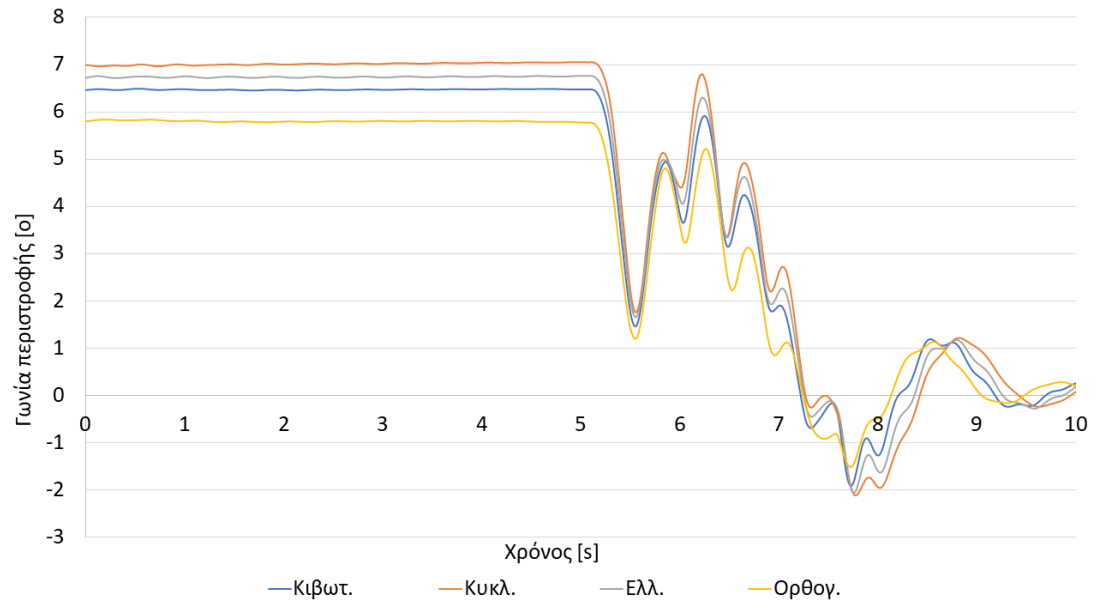
Τα παρακάτω διαγράμματα είναι για ταχύτητα 60 km/h.

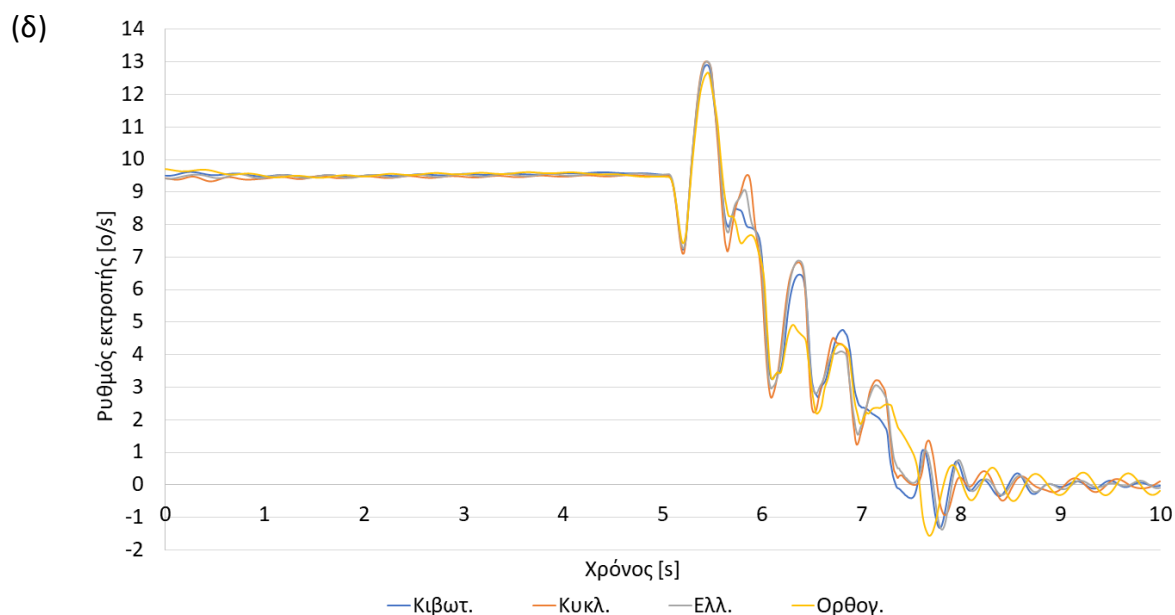


(β)



(γ)

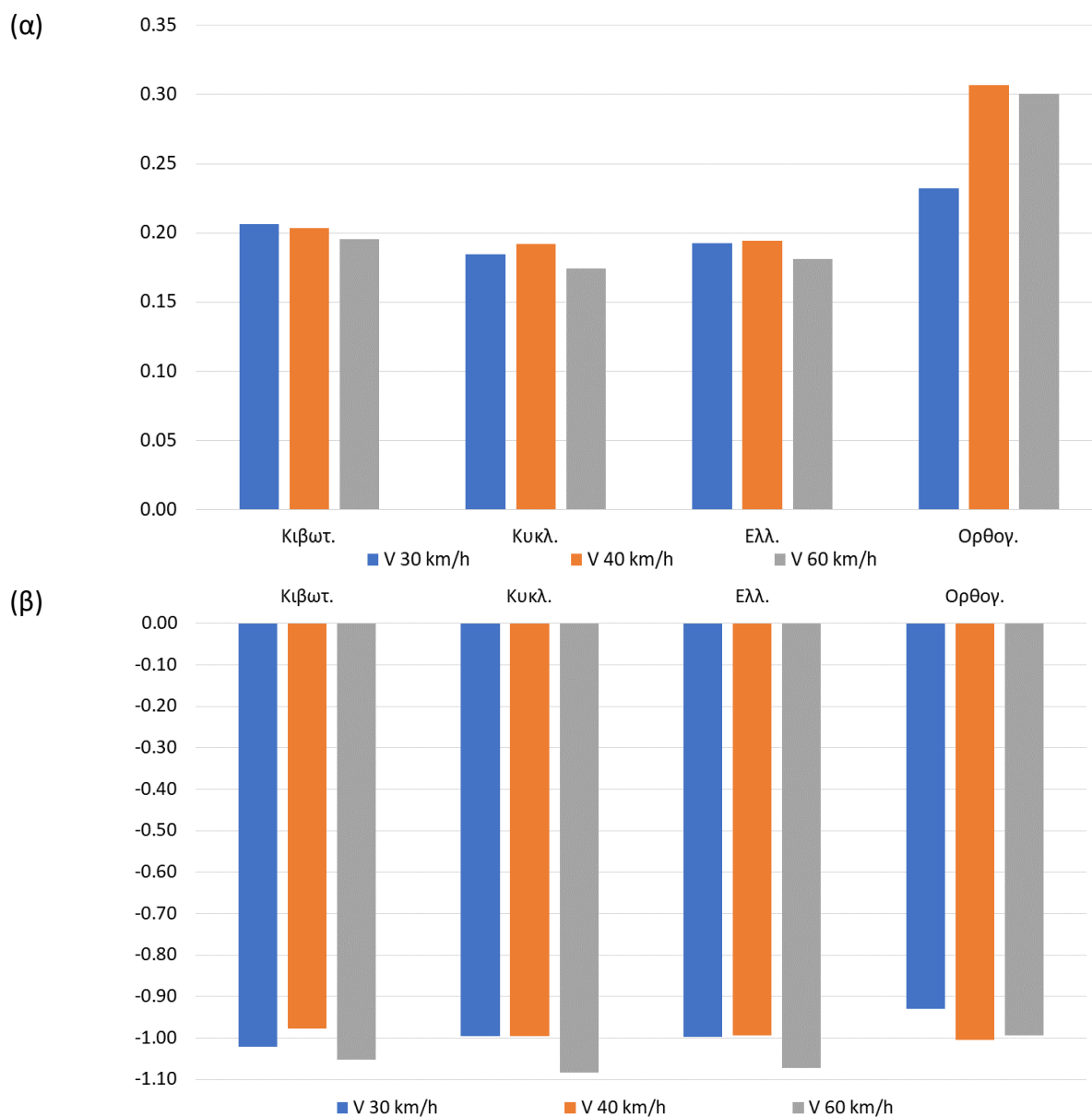




Σχήμα 5.19: (α) Διαμήκης επιτάχυνση (β) Εγκάρσια επιτάχυνση (γ) Γωνία περιστροφής και (δ) Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 60 km/h

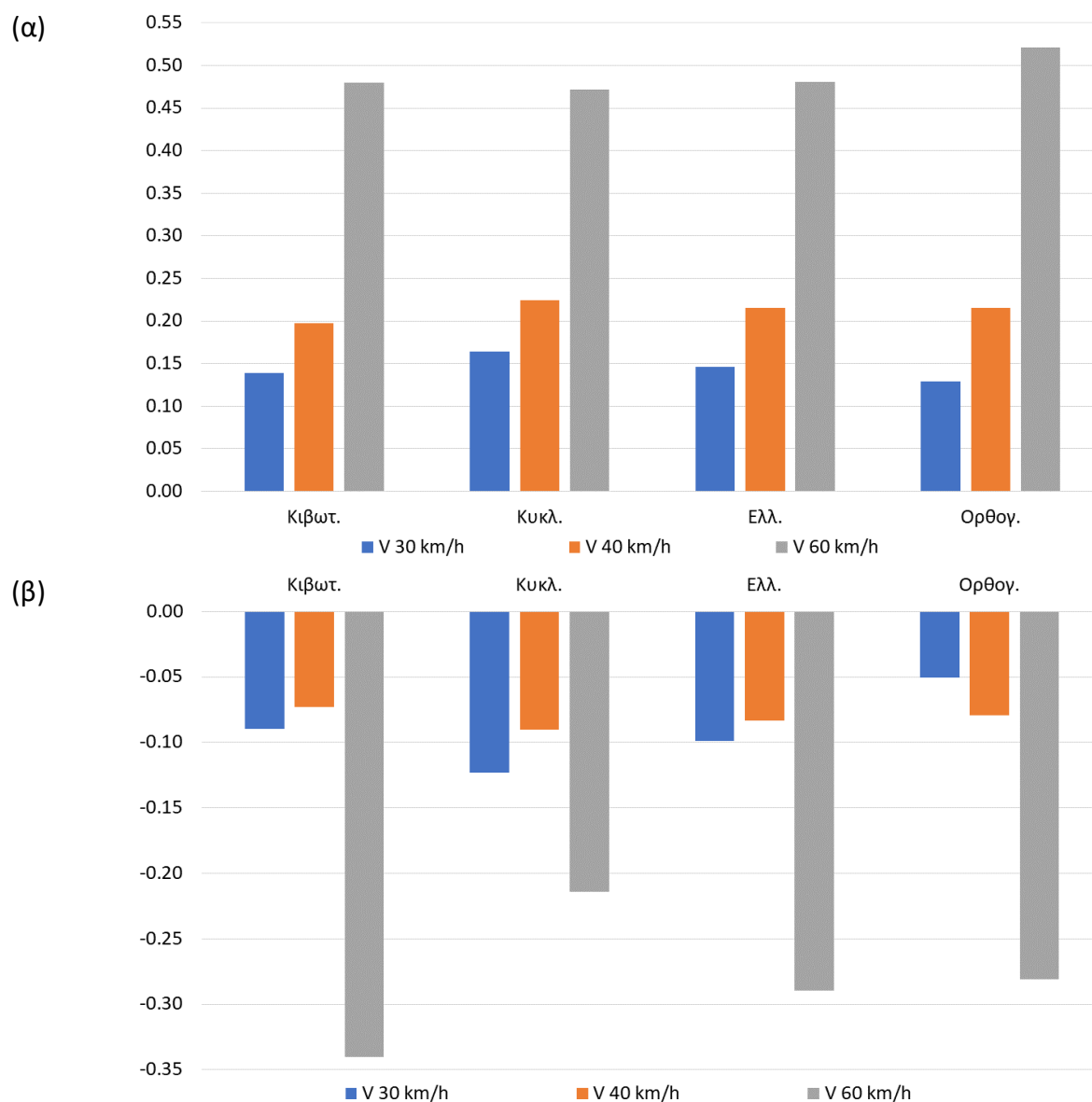
Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και στο φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 60 km/h. Η διαμήκης επιτάχυνση γίνεται ακόμη μεγαλύτερη, όχι μόνο κατά απόλυτη τιμή αλλά και σε χρονική διάρκεια, για κάθε διατομή δεξαμενής (Σχήμα 5.19(α)). Στο Σχήμα 5.19(β) βλέπει κανείς ότι η εγκάρσια επιτάχυνση για κάθε διατομή ξεπερνάει τα 0.4 g, που είναι πρακτικά το επιτρεπόμενο όριο για να μην υπάρξει ανατροπή του οχήματος. Ωστόσο, τόσο η εγκάρσια επιτάχυνση όσο και η γωνία περιστροφής (Σχήμα 5.19(γ)), αρχικά αυξάνονται, όμως μετέπειτα φθίνουν, γρηγορότερα στην ορθογωνική και την κιβωτιοειδή, πιο αργά στην ελλειπτική και την κυκλική. Κατά συνέπεια, το όχημα με κάθε διατομή δεξαμενής δεν ανατρέπεται, παρόλο που η εγκάρσια επιτάχυνση ξεπερνάει το επιτρεπόμενο όριο (rollover threshold). Αυτό συνέβη διότι το όριο αναφέρεται σε στροφή μόνιμης κατάστασης ενώ τώρα πρόκειται για φρενάρισμα σε στροφή, δηλαδή μια απόλυτα μεταβατική κατάσταση. Επομένως, η μέγιστη εγκάρσια επιτάχυνση που μπορεί να δεχθεί το όχημα σε μια μεταβατική κατάσταση είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη στη μόνιμη. Προφανώς, τα 60 km/h δημιουργούν στην αρχή του φρεναρίσματος μια ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του ρυθμού εκτροπής αλλά και μια πιο αργή εξάλειψη αυτού (Σχήμα 5.19(δ)).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα ομαδοποιημένων στηλών, που απεικονίζουν τα δύο ακρότατα (μέγιστο και ελάχιστο κατά αλγεβρική τιμή) κάθε μεταβλητής ενδιαφέροντος για κάθε διατομή δεξαμενής και κάθε ταχύτητα κίνησης.



Σχήμα 5.20: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της διαμήκουσ επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h

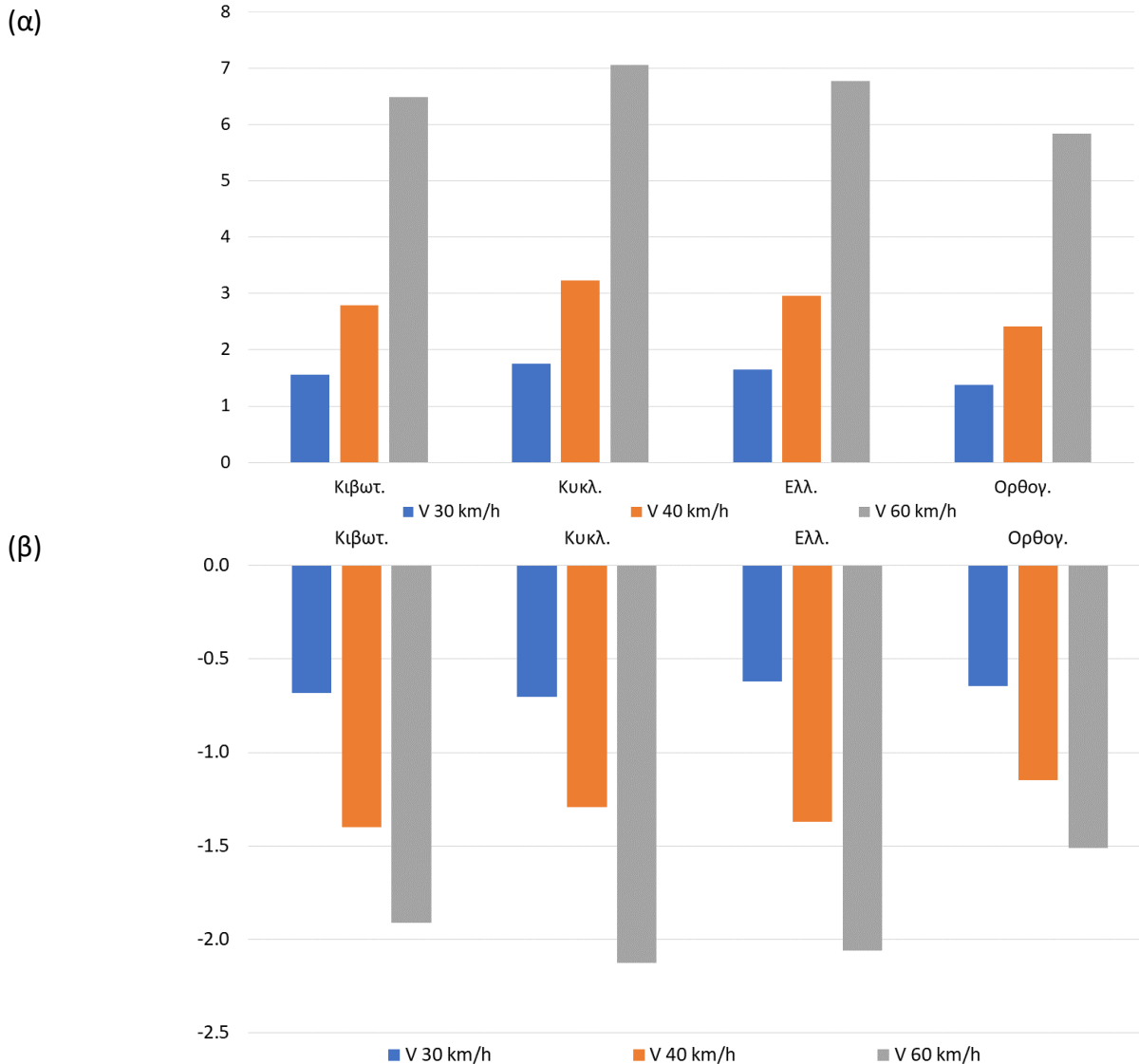
Η αύξηση της ταχύτητας για κάθε διατομή δεξαμενής δεν αλλάζει σημαντικά τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της εγκάρσιας επιτάχυνσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20. Αυτό που μεταβάλλεται, δηλαδή, είναι το χρονικό διάστημα που το όχημα φρενάρει και όχι η ένταση του φρεναρίσματος.



Σχήμα 5.21: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της εγκάρσιας επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h

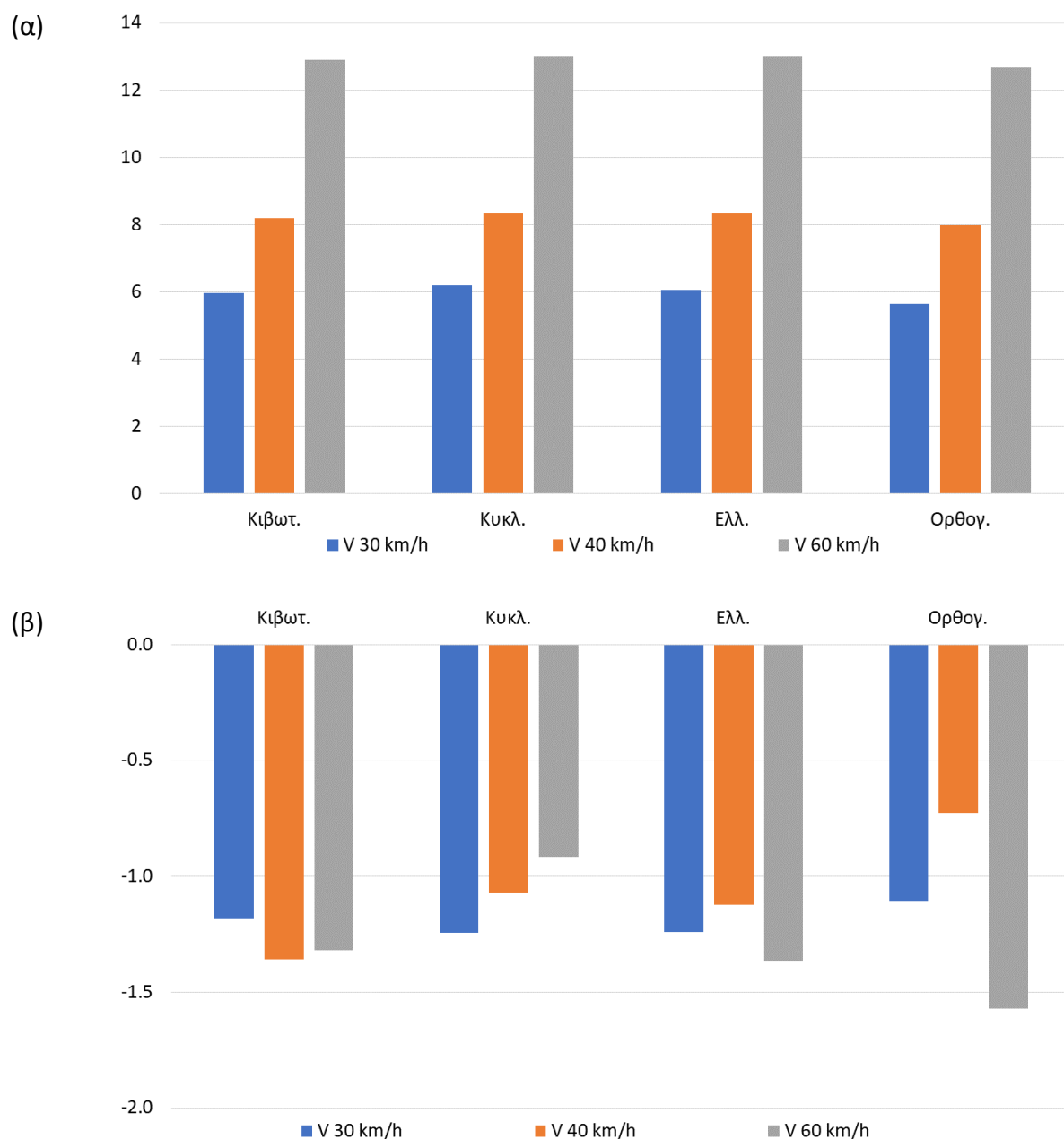
Η αύξηση της ταχύτητας από 30 σε 40 km/h δεν επηρεάζει την απόκριση της εγκάρσιας επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή. Αντίθετα, η μετάβαση από 40 σε 60 km/h δημιουργεί ένα μεγάλο άλμα τόσο στα θετικά όσο και στα αρνητικά της εγκάρσιας επιτάχυνσης (Σχήμα 5.21). Όσο το όχημα κινείται με ταχύτητα 60 km/h, η εγκάρσια επιτάχυνση ανέρχεται περίπου στα 0.3 g. Μετά το φρενάρισμα, αποκτά μέγιστη τιμή περί τα 0.5 g για κάθε διατομή, με την ορθογωνική, μάλιστα, να τα ξεπερνά. Αυτό οφείλεται σε πλαγιολίσθηση του οχήματος στην αρχή του φρεναρίσματος. Οι μεγάλες αρνητικές τιμές

είναι απόρροια υπολογιστικού σφάλματος καθώς τη χρονική στιγμή που εμφανίζονται το όχημα έχει σχεδόν ακινητοποιηθεί.



Σχήμα 5.22: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της γωνίας περιστροφής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h

Ομοίως όπως και στην εγκάρσια επιτάχυνση, σημαντική αλλαγή της γωνίας περιστροφής παρατηρείται σε κάθε διατομή δεξαμενής κατά την αλλαγή της ταχύτητας στα 60 km/h (Σχήμα 5.22). Σε καμία περίπτωση, όμως, η γωνία δεν αποκτά πολύ μεγάλες τιμές. Συνεπώς, το όχημα με κάθε διατομή δεξαμενής σε κάθε ταχύτητα υλοποιεί το φρενάρισμα σε στροφή δίχως προβλήματα αστάθειας ως προς την ανατροπή.



Σχήμα 5.23: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο του ρυθμού εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h

Ομοίως όπως και στη γωνία περιστροφής, σημαντική αλλαγή του ρυθμού εκτροπής παρατηρείται σε κάθε διατομή δεξαμενής κατά την αλλαγή της ταχύτητας από τα 40 στα 60 km/h (Σχήμα 5.23) και μόνο στις θετικές τιμές. Καταρχάς, μεγαλύτερη ταχύτητα μόνιμης κατάστασης κατά την κίνηση σε στροφή σημαίνει και μεγαλύτερος ρυθμός εκτροπής

μόνιμης κατάστασης. Στην αρχή του απότομου φρεναρίσματος, το όχημα ξεκινά να πλαγιολισθαίνει λόγω μπλοκαρίσματος των τροχών. Έτσι, αύξηση της ταχύτητας κίνησης οδηγεί σε πιο έντονη πλαγιολίσθηση για κάθε διατομή. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των ABS στο όχημα αποτρέπει την απώλεια ευστάθειας. Οι αρνητικές τιμές του ρυθμού εκτροπής αναφέρονται σε χρονικές στιγμές που το όχημα έχει σχεδόν ακινητοποιηθεί, οπότε δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον προς μελέτη.

6. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς βυτιοφόρων οχημάτων και η διερεύνηση της επίδρασης του σχήματος της διατομής της δεξαμενής τους σε αυτήν. Σε πρώτη φάση, διερευνήθηκε η συμπεριφορά του οχήματος, το μοντέλο του οποίου λαμβάνεται έτοιμο από το λογισμικό, με το εκ των προτέρων ορισμένο φορτίο ορθογωνικής διατομής. Κατόπιν, για κάθε διατομή δεξαμενής αναλύθηκε η δυναμική απόκριση του οχήματος. Με άλλα λόγια, εξετάστηκε ποια διατομή παρουσιάζει καλύτερα περιθώρια ασφαλείας κυρίως ως προς την ανατροπή του οχήματος σε διαφορετικά σενάρια οδήγησης. Το φαινόμενο της μεταφοράς υγρού (sloshing) εντός των διαμερισμάτων της δεξαμενής σε μεταβολές της ταχύτητας, δηλαδή σε επιτάχυνση, επιβράδυνση ή στροφή, δεν λήφθηκε υπόψη κατά την διερεύνηση αυτή. Αναλυτικότερα, διερευνήθηκαν 4 δεξαμενές διαφορετικής διατομής, μία κιβωτιοειδής, μία κυκλική, μία ελλειπτική και μία ορθογωνική, αλλά ίδιου όγκου υγρού, ίδιου μήκους, ίδιου πάχους και κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό (φύλλα αλουμινίου). Προφανώς, θεωρείται ότι όλες οι δεξαμενές μεταφέρουν το ίδιο εύφλεκτο υγρό (UN1203). Τα σενάρια οδήγησης-προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν είναι η ανατρεπομένη τράπεζα, η αλλαγή λωρίδας, η διπλή αλλαγή λωρίδας, το φρενάρισμα σε στροφή και η στροφή μόνιμης κατάστασης. Ως επιπλέον στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας τέθηκε μια παραμετρική ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής ως προς 3 πιθανές ταχύτητες.

Αρχικά, κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τα εκ των προτέρων ορισμένα (default) στοιχεία που έχει το λογισμικό TruckSim για ένα τετραξονικό φορτηγό όχημα με φορτίο ορθογωνικής διατομής. Τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται, σχολιάζονται και συμβάλλουν αφενός στην επικύρωση της ορθής χρήσης του μοντέλου οχήματος και αφετέρου στη διεξοδική ανάλυση κάθε σεναρίου οδήγησης.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν οι 4 δεξαμενές στο 3DCAD Solidworks, έχοντας ως πρότυπο μια κιβωτιοειδή δεξαμενή (Παράρτημα Ι), εκτελούνται οι παραπάνω προσομοιώσεις για κάθε διατομή και στις ίδιες συνθήκες (φορτίο και ταχύτητα) ανά σενάριο οδήγησης. Τα αποτελέσματα της ανατρεπόμενης τράπεζας έδειξαν ότι η βέλτιστη επιλογή διατομής είναι η ορθογωνική. Αυτή, μεταξύ των τεσσάρων, έχει την υψηλότερη τιμή μέγιστης εγκάρσιας επιτάχυνσης που μπορεί να δεχθεί το όχημα σε στροφή μόνιμης κατάστασης χωρίς να ανατραπεί. Ωστόσο, η ύπαρξη του φαινομένου sloshing δημιουργεί προβλήματα παραμενουσών τάσεων σε μια ορθογωνικής διατομής δεξαμενή μεταφοράς υγρού. Έτσι, ως βέλτιστη επιλογή ανέρχεται η δεύτερη καλύτερη διατομή, δηλαδή η κιβωτιοειδής. Κατά την αλλαγή λωρίδας, τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι σε χαμηλή ταχύτητα, ακόμα και με μεγάλες εγκάρσιες επιταχύνσεις, η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αλλαγή της διατομής. Αντίθετα, στη διπλή αλλαγή λωρίδας, που ως σενάριο οδήγησης είναι πιο οξύ, τα αποτελέσματα διέφεραν αισθητά. Ομοίως, η ορθογωνική διατομή έχει πιο ομαλή και ασφαλή συμπεριφορά ενώ η «χειρότερη» ανήκει

στην κυκλική. Κατά το φρενάρισμα σε στροφή, λόγω του τρόπου φρεναρίσματος, όλες οι διατομές ξεκινούν να πλαγιολισθαίνουν, γεγονός που περιορίζεται δραστικά με τη χρήση των ABS που διαθέτει το όχημα. Όσον αφορά τη γωνία περιστροφής, οι τιμές για κάθε διατομή είναι πολύ μικρές. Τέλος, στη στροφή μόνιμης κατάστασης, στα πρώτα δευτερόλεπτα τα αποτελέσματα είναι τα ίδια για κάθε διατομή. Κατόπιν, εμφανίζεται μια διαφοροποίηση στην δυναμική συμπεριφορά καθώς στην κυκλική και στην ελλειπτική διατομή η γωνία περιστροφής αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό. Επίσης, στις δύο αυτές διατομές ο ρυθμός αύξησης της εγκάρσιας επιτάχυνσης είναι μικρότερος, οπότε η προσομοίωση τερματίζει γρηγορότερα.

Για την παραμετρική ανάλυση ως προς την ταχύτητα, επιλέχθηκαν μόνο δύο σενάρια οδήγησης, η διπλή αλλαγή λωρίδας και το φρενάρισμα σε στροφή, σε ταχύτητες 30/50/70 και 30/40/60 km/h αντίστοιχα. Και οι 4 διατομές υλοποιούν με επιτυχία την διπλή αλλαγή λωρίδας με τις δύο πρώτες ταχύτητες. Βέβαια, αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μεγαλύτερη διαφοροποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς και, γενικότερα, σε μεγαλύτερες γωνίες περιστροφής και ρυθμούς εκτροπής. Με άλλα λόγια, στη διπλή αλλαγή λωρίδας αύξηση ταχύτητας σημαίνει ώθηση του οχήματος προς τα όρια ασφαλείας. Με ταχύτητα 70 km/h, η κυκλική και η ελλειπτική ανατρέπονται. Κατά το φρενάρισμα σε στροφή, η αύξηση της ταχύτητας κατά 10 km/h καθυστερεί το χρόνο φρεναρίσματος και κάνει πιο έντονη την αρχική ολίσθηση. Με 60 km/h η αύξηση της εγκάρσιας της επιτάχυνσης τη στιγμή του φρεναρίσματος ξεπερνά μέχρι και τα όρια ως προς την ανατροπή για κάθε διατομή, βάσει των αποτελεσμάτων της ανατρεπόμενης τράπεζας. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό διαρκεί ελάχιστα και για αυτό δεν τίθεται θέμα ανατροπής του οχήματος. Αξιοσημείωτο είναι δε ότι και οι 4 διατομές ολοκληρώνουν το φρενάρισμα σε στροφή χωρίς να χαθεί η ευστάθεια του οχήματος.

Επομένως, εξάγεται άμεσα το συμπέρασμα ότι η καταλληλότερη διατομή δεξαμενής για ένα βυτιοφόρο όχημα μεταφοράς εύφλεκτου υγρού είναι η κιβωτιοειδής, μιας και στην ορθογωνική δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις στις γωνίες των διαμερισμάτων, άρα σε βάθος χρόνου διαρροές. Παρατηρείται ότι, όσο χαμηλότερα είναι το κέντρο βάρους του φορτίου, τόσο καλύτερη είναι η απόκριση ως προς την ανατροπή. Ο ρυθμός εκτροπής είναι, επίσης, μια μεταβλητή που πρέπει να κυμαίνεται εντός ορίων. Υπέρμετρα πλαγιολίσθηση του οχήματος μπορεί, επίσης, να επιφέρει ανατροπή και άλλα φαινόμενα αστάθειας, για παράδειγμα δίπλωμα, όχι, όμως, σε ένα ενιαίο τετραξονικό όχημα, δηλαδή χωρίς κάποιο (ημι)ρυμουλκούμενο.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εστιάζει κυρίως στην ανατροπή καθώς αυτό το φαινόμενο αστάθειας μπορεί να δημιουργήσει τεράστιες υλικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές ζημιές. Όλα τα παραπάνω βέβαια αποτελούν απόρροια μιας εκτεταμένης χρήσης του λογισμικού TruckSim®, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να πάρει τα αποτελέσματα σε μορφή υπολογιστικού φύλλου Excel.

Συνδυάζοντας τη θεωρία και τις γνώσεις περί σχεδιασμού και δυναμικής οχημάτων, αξιοποιώντας την ήδη διαμορφωμένη μοντελοποίηση από το λογισμικό προκύπτουν κάποια σημαντικά συμπεράσματα ως προς την αύξηση της ασφάλειας των βαρέων οχημάτων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα σύστημα ελέγχου της θέσης του κέντρου βάρους του οχήματος ανά πάσα στιγμή, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες φορτίου, ταχύτητας και οδοστρώματος, μπορεί να προβλέψει εκ των προτέρων την έλλειψη αστάθειας και μέσω οπτικοακουστικών συστημάτων να προειδοποιεί τον οδηγό.

Σαν συνέχεια αυτής της μελέτης, μπορεί κανείς να αναπτύξει έναν αλγόριθμο, κατά προτίμηση σε Matlab/Simulink® για να είναι συμβατό με το λογισμικό TruckSim®, που θα υπολογίζει την αλλαγή θέσης του κέντρου βάρους, κυρίως στον διαμήκη και κατακόρυφο άξονα, λόγω μεταφοράς υγρού (sloshing). Επιπλέον, μέσω ειδικών αισθητήρων (δυναμοκυψέλες) σε κάθε τροχό μπορεί κανείς να υπολογίζει την κάθετη δύναμη από το οδόστρωμα ή τη δύναμη λόγω αναρτημένης μάζας, προκειμένου να υπολογίζει, εν τέλει, την κατανομή φορτίου, τόσο στον διαμήκη όσο και στον εγκάρσιο άξονα. Όλα αυτά μπορούν κάλλιστα να συνεργαστούν με ενεργά συστήματα, για παράδειγμα ενεργές αεροαναρτήσεις ή κατάλληλη διαμόρφωση στη βάση της δεξαμενής που θα της δίνει την κατάλληλη κλίση προκειμένου το κέντρο βάρους να μετατοπίζεται στην επιθυμητή θέση.

7. Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1: Volvo FM 4x2 Τράκτορας [22]	12
Σχήμα 2.2: Πέμπτος τροχός [2]	13
Σχήμα 2.3: Πείρος σύνδεσης [2].....	13
Σχήμα 2.4: Κατηγοριοποίηση διαφραγμάτων [23].....	17
Σχήμα 3.1: Τρόπος λειτουργίας ενός VehicleSim λογισμικού	21
Σχήμα 3.2:Επιλογή μαθηματικού μοντέλου	22
Σχήμα 3.3: Πλεγματοποίηση χρονικού διαστήματος [14].....	23
Σχήμα 3.4: Πλήρης χαρακτηρισμός ενός dataset	25
Σχήμα 3.5: Επιλογή Dataset για το σενάριο οδήγησης	26
Σχήμα 3.6: Διαθέσιμες επιλογές στο Visualizer.....	27
Σχήμα 3.7: Στιγμιότυπο από ένα βίντεο προσομοίωσης.....	27
Σχήμα 3.8: Εγκάρσια μετατόπιση οχήματος - Με κόκκινο η πραγματική με μπλε η ζητούμενη.....	28
Σχήμα 3.9: Συνδυασμός βίντεο και διαγραμμάτων.....	29
Σχήμα 3.10: Ανάλυση μοντέλου TNO Delft-Tyre [15].....	29
Σχήμα 3.11: Εγκάρσια δύναμη ελαστικού σε μόνιμη κατάσταση ως συνάρτηση της διαμήκουσ και εγκάρσιας ολίσθησης [15].....	30
Σχήμα 3.12:Γραφική απεικόνιση του μοντέλου MF-Swift [15].....	31
Σχήμα 4.1: Τετραξονικό όχημα προσομοιώσεων	34
Σχήμα 4.2: Στοιχεία εκ των προτέρων ορισμένου φορτίου (default payload) οχήματος	36
Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της προσομοίωσης «Ανατρεπόμενη τράπεζα»	38
Σχήμα 4.4: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση και (β)Γωνία περιστροφής του οχήματος σε ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2°/s.....	40
Σχήμα 4.5: Κάθετες δυνάμεις στα ελαστικά της αριστερής πλευράς του οχήματος σε ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s.....	41
Σχήμα 4.6: Ορισμός «στόχου» για την εγκάρσια επιτάχυνση.....	43
Σχήμα 4.7: (α)Διαδρομή (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος σε αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 88 km/h	45
Σχήμα 4.8: (α)Διαδρομή (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 70 km/h.....	49
Σχήμα 4.9: Αλλαγή ταχύτητας τη στιγμή έναρξης του φρεναρίσματος σε «νεκρά».....	51
Σχήμα 4.10: Χαρακτηριστικά συστήματος φρένων οχήματος σε κάθε άξονα.....	52
Σχήμα 4.11: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Διαμήκης επιτάχυνση και (γ)Διαμήκης ταχύτητα του οχήματος κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h.....	53
Σχήμα 4.12: Πίεση στον κύριο κύλινδρο του οχήματος κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h	54
Σχήμα 4.13: (α)Γωνία στροφής τιμονιού (β)Γωνία περιστροφής (γ)Ρυθμός εκτροπής και (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης του οχήματος σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h	56

Σχήμα 4.14: (α)Ρυθμός εκτροπής (αναφοράς και μη) και (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (αναφοράς και μη) του οχήματος σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 70 km/h.....	58
Σχήμα 4.15: Αλγόριθμος σταδίων προσομοίωσης	60
Σχήμα 4.16: Στάδιο Α.....	61
Σχήμα 4.17: Στάδιο Β.....	62
Σχήμα 4.18: Στάδιο C.....	63
Σχήμα 4.19: Στάδιο D.....	64
Σχήμα 4.20: Στάδιο Ε.....	65
Σχήμα 4.21: Έλεγχος ταχύτητας σε κίνηση κυκλικής τροχιάς και σταθερής κατάστασης...	66
Σχήμα 4.22: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Γωνία στροφής τιμονιού (γ)Διαμήκης ταχύτητα (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης και (ε)Γωνία περιστροφής του οχήματος σε κυκλική πορεία σταθερής ακτίνας με αρχική ταχύτητα 30 km/h	69
Σχήμα 5.1: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη κιβωτιοειδούς διατομής.....	71
Σχήμα 5.2: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη κυκλικής διατομής.....	72
Σχήμα 5.3: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη ελλειπτικής διατομής	72
Σχήμα 5.4: (α)Διατομή και (β)Ισομετρική όψη ορθογωνικής διατομής.....	73
Σχήμα 5.5: Ορισμός τυχαίου φορτίου στο λογισμικό TruckSim®	74
Σχήμα 5.6: (α)Γωνία περιστροφής και (β)Εγκάρσια επιτάχυνση του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s.....	76
Σχήμα 5.7: (α)Διαδρομή (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30 km/h	79
Σχήμα 5.8: (α)Διαδρομή (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30 km/h	82
Σχήμα 5.9: Ποσοστιαία μεταφορά φορτίου προς τη δεξιά πλευρά του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής κατά την διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30 km/h.....	83
Σχήμα 5.10: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Διαμήκης επιτάχυνση (γ)Διαμήκης ταχύτητα και (δ)Πίεση στον κύριο κύλινδρο του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30 km/h.....	86
Σχήμα 5.11: (α)Γωνία στροφής τιμονιού (β)Ρυθμός εκτροπής (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής κατά το φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30 km/h.....	89
Σχήμα 5.12: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Διαμήκης ταχύτητα (γ)Γωνία περιστροφής (δ)Γωνία πλαγιολίσθησης συναρτήσει του χρόνου και (ε)Γωνία στροφής τιμονιού του οχήματος συναρτήσει της εγκάρσιας επιτάχυνσης για κάθε διατομή δεξαμενής σε κυκλική πορεία σταθερής κατάστασης με αρχική ταχύτητα 30 km/h	93
Σχήμα 5.13: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Γωνία περιστροφής και (γ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 50 km/h .	96
Σχήμα 5.14: (α)Εγκάρσια επιτάχυνση (β)Γωνία περιστροφής και (γ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 70 km/h .	97

Σχήμα 5.15: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της εγκάρσιας επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30/50/70 km/h.....	99
Σχήμα 5.16: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της γωνίας περιστροφής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30/50/70 km/h.....	100
Σχήμα 5.17: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο του ρυθμού εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε διπλή αλλαγή λωρίδας με ταχύτητα 30/50/70 km/h.....	101
Σχήμα 5.18: (α)Διαμήκης επιτάχυνση (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 40 km/h	103
Σχήμα 5.19: (α)Διαμήκης επιτάχυνση (β)Εγκάρσια επιτάχυνση (γ)Γωνία περιστροφής και (δ)Ρυθμός εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 60 km/h	106
Σχήμα 5.20: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της διαμήκου επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h	107
Σχήμα 5.21: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της εγκάρσιας επιτάχυνσης του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h	108
Σχήμα 5.22: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο της γωνίας περιστροφής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h	109
Σχήμα 5.23: (α)Μέγιστο και (β)Ελάχιστο του ρυθμού εκτροπής του οχήματος για κάθε διατομή δεξαμενής σε φρενάρισμα σε στροφή με ταχύτητα 30/40/60 km/h	110

8. Κατάλογος πινάκων

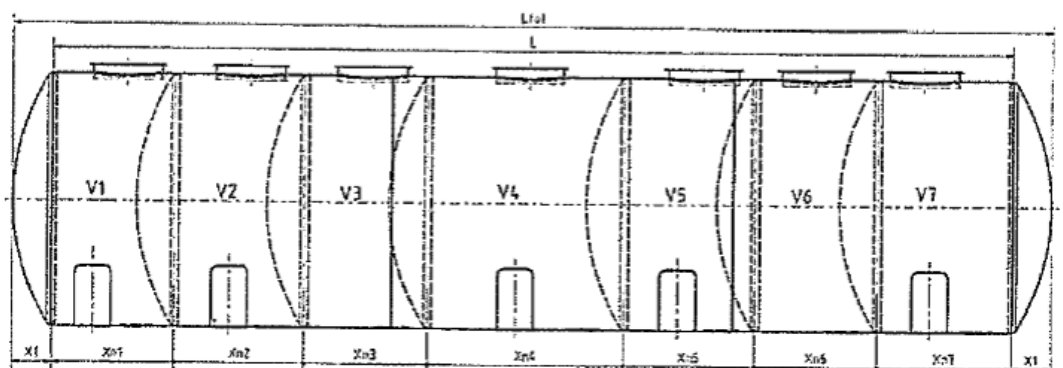
Πίνακας 1: Μέγιστες διαστάσεις οχήματος.....	14
Πίνακας 2: Μέγιστο βάρος οχήματος ή φορτίο άξονα.....	15
Πίνακας 3: Αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα οχήματος (χωρίς φορτίο).....	35
Πίνακας 4: Μηχανικές ιδιότητες αναρτήσεων.....	35
Πίνακας 5: Ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s	42
Πίνακας 6: Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	46
Πίνακας 7: Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	50
Πίνακας 8: Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	59
Πίνακας 9: Παράμετροι προσομοίωσης.....	65
Πίνακας 10: Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	70
Πίνακας 11: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε διατομής.....	73
Πίνακας 12: Θέση κέντρου μάζας για κάθε δεξαμενή υπό το πλήρες φορτίο.....	74
Πίνακας 13: Ροπή αδράνειας κάθε δεξαμενής υπό το πλήρες φορτίο.....	75
Πίνακας 14: Ανατρεπόμενη τράπεζα με ρυθμό 0.2 °/s	77
Πίνακας 15: Παράμετροι προσομοίωσης.....	80
Πίνακας 16: Φορτίο κάθε άξονα για κάθε διατομή δεξαμενής σε σταθερή κατάσταση.....	84
Πίνακας 17: Αποτελέσματα φρεναρίσματος σε στροφή για κάθε διατομή δεξαμενής	90
Πίνακας 18: Συνθήκες και παράμετροι προσομοίωσης	90

9. Αναφορές

- [1] E. C. f. E. I. T. Committee, «Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road,» 2021.
- [2] A. S. Trigell, «Advanced vehicle dynamics of heavy trucks with the perspective of road safety,» International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2017.
- [3] E. UNION, «DIRECTIVE 96/56/EC,» 1996.
- [4] C. Winkler, «The Dynamics of Tank-Vehicle Rollover and the Implications for Rollover-Protection Devices,» 1998.
- [5] N. Zhituo, «Design and Validation of High Speed Active Trailer Steering System for Articulated Heavy Vehicle,» Oshawa, Ontario, Canada, 2016.
- [6] Z. Bai, «Method of Improving Lateral Stability by Using Additional Yaw Moment of Semi Trailer,» MDPI, 2020.
- [7] M. Toumi, «Development of Analytical Model for Modular Tank Vehicle Carrying Liquid Cargo,» Scientific Research, 2013.
- [8] C. Cheng, «Improving roll stability of articulated heavy vehicles using active semi-trailer steering,» Taylor & Francis, 2008.
- [9] C. Cheng, «Parameter and state estimation for articulated heavy vehicles,» 2010.
- [10] T. Xin, «Research on the speed thresholds of trucks in a sharp turn based on dynamic rollover risk levels,» PLOS ONE, 2021.
- [11] Z. Ma, «Velocity and normal tyre force estimation for heavy trucks based on vehicle dynamic simulation considering the road slope angle,» Taylor & Francis, 2015.
- [12] J. Deng, «ADAPTATION OF A TRUCKSIM MODEL TO EXPERIMENTAL HEAVY TRUCK HARD BRAKING DATA,» 2009.
- [13] D. Oberoi, «ENHANCING ROLL STABILITY AND DIRECTIONAL PERFORMANCE OF ARTICULATED HEAVY VEHICLES BASED ON ANTI-ROLL CONTROL AND DESIGN OPTIMIZATION,» 2011.
- [14] Mechanical Simulation Corporation, «TruckSim (R) User Manual,» 2019.

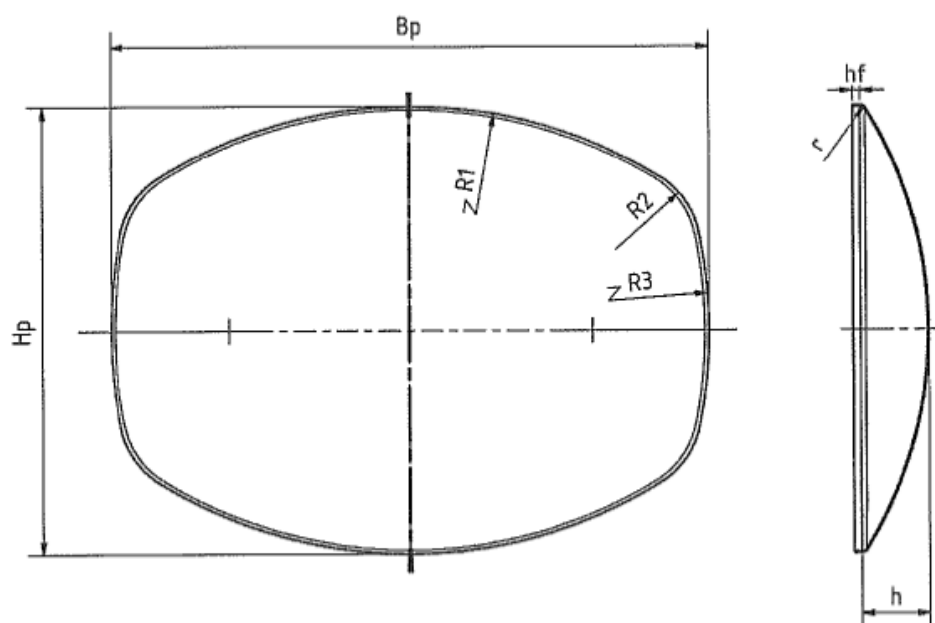
- [15] TNO, «MF-Tyre/MF-Swift 6.2 Help Manual,» TNO, Helmond, 2013.
- [16] ISO16333, «Heavy commercial vehicles and buses-Steady-state rollover threshold -Tilt-table test method,» 2004.
- [17] ISO4791, «Road vehicles-Heavy commercial vehicle combinations and articulated buses-Lateral stability test methods,» 2000.
- [18] ISO14794, «Heavy commercial vehicle and buses-Braking in a turn-Open loop test methods,» 2003.
- [19] ISO14792, «Road vehicles_Heavy commercial vehicles and buses_Steady state circular tests,» 2003.
- [20] B. S. I. (BSI), «Tanks for the Transport of DANGEROUS Goods-Metallic Tanks with a Working Pressure not Exceeding 0.5 Bar Design and Construction.,» London, UK, 2015.
- [21] E. -. U. Nations, «Uniform Provisions Concerning the Approval of: Tank Vehicles of Categories N and O with Regard to Rollover Stability.,» 2000.
- [22] L. specs, «Volvo Trucks FM.420 LNG 4x2 Tractor».
- [23] A. O. Shimanovsky, «Dynamics of Tank Trucks with Baffles for Transportation of Viscous Liquids,» 2018.

I. Πρότυπη κιβωτιοειδής δεξαμενή

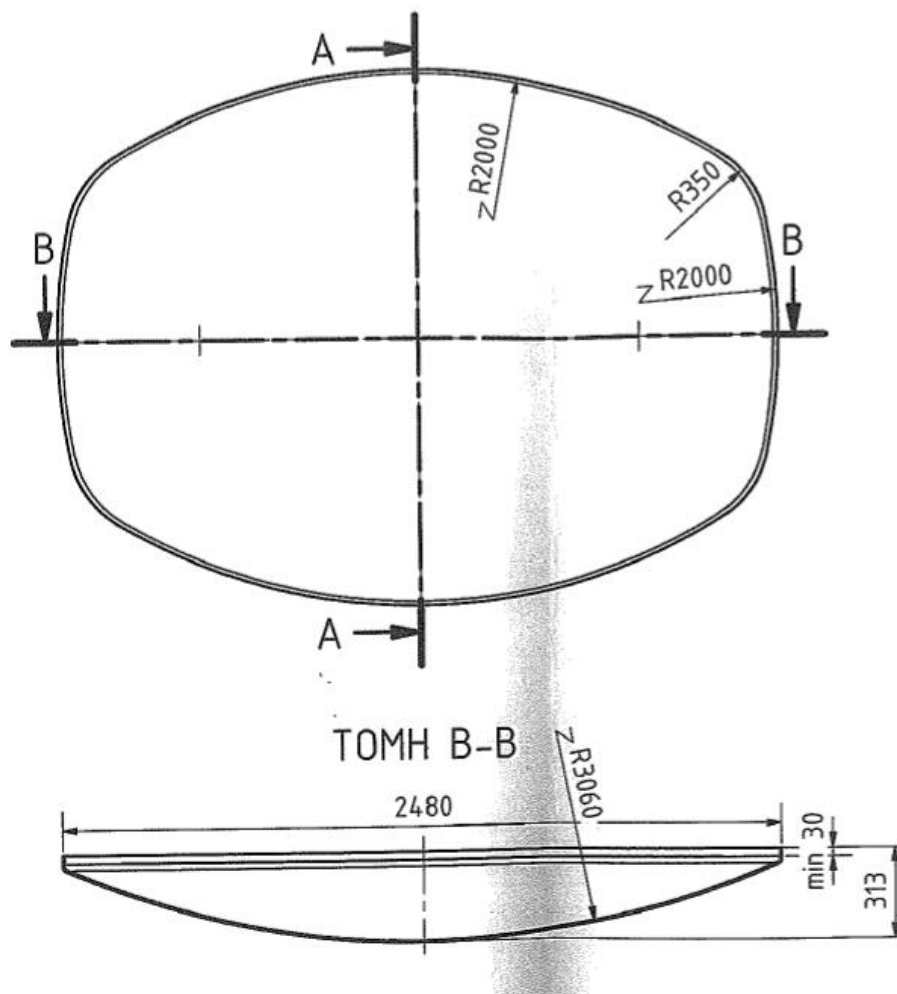


Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
L	7070	mm
X1	283	mm
Ltot	7636	mm
V _{πυθΕ}	561	lt
V _{πυθΘ}	561	lt
V _{tot}	28187	lt

Όγκοι διαμερισμάτων V _i	3484	3656	3445	5551	3656	3445	4950	lt



Μέγεθος	Συμβολισμός	Πυθμένες	Διαφράγματα	Μονάδες
Πλάτος	Bp	2480	2480	mm
Υψος	Hp	1840	1840	mm
Άνω και κάτω ράδιο	R1	2000	2000	mm
Γωνιακό ράδιο	R2	350	350	mm
Πλευρικό ράδιο	R3	2000	2000	mm
Εσωτερικό ράδιο	r	30	30	mm
Βάθος κοίλων	h	280	280	mm
Πλάτος φιλέτου	hf	30	30	mm
Χωρητικότητα	V _{πυθ}	561	561	lt



--- Τέλος εγγράφου ---