



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*“ Έλεγχος συστήματος ενεργητικής ανάρτησης σε περιβάλλον veDYNA
και Simulink ”*

Χατζητζάνος Ευάγγελος
Χανιά, Ιούνιος 2014

Εξεταστική Επιτροπή:
Σταυρακάκης Γεώργιος (επιβλέπων)
Πουλιέζος Αναστάσιος
Ζερβάκης Μιχαήλ

Περίληψη

Μια από τις εφαρμογές της τεχνολογίας του αυτομάτου ελέγχου είναι ο έλεγχος των σύγχρονων αυτοκινήτων. Είναι γεγονός ότι το σύγχρονο αυτοκίνητο δεν μπορεί πλέον να ταξινομηθεί στην κατηγορία των αμιγώς μηχανολογικών τεχνουργημάτων. Από τη συνεργασία της κλασικής και της σύγχρονης θεωρίας ελέγχου με την τεχνολογία των Η/Υ αναδύθηκαν πολλά νέα και βελτιωμένα συστήματα στο χώρο της τεχνολογίας των αυτοκινήτων. Η εργασία αυτή εφαρμόζει έναν εικονικό έλεγχο μέσα από την προσομοίωση του περιβάλλοντος veDYNA (vehicle dynamics analysis), και αφορά το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση ενός συστήματος ελέγχου το οποίο ρυθμίζει τη λειτουργία της ανάρτησης του μοντέλου οχήματος του περιβάλλοντος αυτού. Το περιβάλλον veDYNA είναι ιδανικό για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των τροχοφόρων οχημάτων και ενδείκνυται για την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου οχημάτων σύμφωνα με τη μεθοδολογία Model-Based Design. Χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο ελέγχου του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή (LQR) τον οποίο μοντελοποιούμε στο Simulink. Ο αλγόριθμος αυτός βασίστηκε σε ένα μαθηματικό υπόδειγμα πλήρους μοντέλου αυτοκινήτου (full car model) επτά βαθμών ελευθερίας (7-DOF). Τα κριτήρια βελτιστοποίησης του αλγορίθμου αυτού προσαρμόζονται στα βασικά κριτήρια απόδοσης της ανάρτησης του αυτοκινήτου: το κριτήριο ευστάθειας του οχήματος, το κριτήριο άνεσης των επιβατών, και το κριτήριο ελαχιστοποίησης του κόστους ελέγχου. Προτείνεται λοιπόν ένας ελεγκτής LQR ο οποίος, μέσω της προσομοίωσης του veDYNA, αποδεικνύεται ότι βελτιώνει αισθητά την ευστάθεια του οχήματος και την άνεση των επιβατών μέσα από ένα συγκεκριμένο κόστος ελέγχου. Η εγκατάσταση αυτού του ελεγκτή μετατρέπει το σύστημα συμβατικής/παθητικής ανάρτησης ενός οχήματος, το οποίο είναι ένα σύστημα περιορισμένων δυνατοτήτων, σε σύστημα ενεργητικής ανάρτησης.

Abstract

One of the applications of automatic control's technology is the control of modern cars. It is a fact that the modern car can no longer be classified in the category of purely mechanical artifacts. The collaboration of classical and modern control theory with computers' technology emerged many new and improved systems in the field of car technology. This thesis implements a virtual control through the simulation of veDYNA (vehicle dynamics analysis) environment, and deals with the design and modelling of a control system which regulates suspension's behavior of the vehicle model of veDYNA. veDYNA environment is ideal for simulating the dynamic behavior of wheeled vehicles and is appropriate to develop vehicle control systems via Model-Based Design methodology. We use the control algorithm of linear quadratic regulator (LQR) which is modelled in Simulink. This algorithm is based on the mathematical model of a full car model with seven degrees of freedom (7-DOF). The optimization criteria of our algorithm are adapted to the basic performance criteria of a car suspension: the vehicle's stability criterion, the passenger's comfort criterion, and the criterion of minimizing the cost control. We propose an LQR controller that proves the noticeable improvement of vehicle stability and passenger comfort while having a particular cost control, through veDYNA simulation. The installation of LQR controller converts the conventional/passive suspension system of a vehicle, which is a system of limited capacity, to an active suspension system.

Ευχαριστίες

Με αφορμή την εκπόνηση του έργου αυτού, θεωρώ χρέος μου να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. *Αναστάσιο Πουλιέζο* για την πολύτιμη βοήθειά του, η οποία περιλάμβανε αρκετές ώρες ενασχόλησής του με οποιοδήποτε πρόβλημα συναντούσα. Η βοήθειά του εκτός από πολύτιμη ήταν και διαρκής.

Αξίζει να αναφερθεί επίσης η βοήθεια του κ. *Νεκτάριου Αρναουτάκη*, ο οποίος φρόντιζε για την έγκαιρη διόρθωση προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στους υπολογιστές του εργαστηρίου στους οποίους υλοποιήθηκε η εργασία αυτή. Μέσω της βοήθειας αυτής αναπτύχθηκε ταχύτερα και ευκολότερα το έργο μου σε περίπτωση απομακρυσμένης πρόσβασης στους υπολογιστές αυτούς.

Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω την ομάδα υποστήριξης της εταιρίας *TESIS DYNAware* για την επίσης ανεκτίμητη βοήθεια που μου προσέφερε, και την ταχύτατη ανταπόκριση σε όλες τις απορίες και τα προβλήματα που συναντήσαμε στο περιβάλλον στο οποίο υλοποιήθηκε η εργασία. Ειδικότερα, οφείλω να ευχαριστήσω την κα. *Marita Irmscher* για την πλήρη καθοδήγησή της και τις διευκρινήσεις της σχετικά με τη χρήση του προγράμματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. *Karin Benthake* για τη δωρεάν παροχή μιας επιπλέον λειτουργίας του προγράμματος, αυτή του *DYNAanimation Editor*, την οποία δε θα μπορούσαμε να έχουμε με το δικό μας license, χωρίς τη βοήθειά της.

Πρόλογος

Ο γενικότερος επιστημονικός χώρος στον οποίο εντάσσεται η υλοποίηση της εργασίας αυτής είναι η *Θεωρία Ελέγχου* (*Control Theory*). Η Θεωρία Ελέγχου είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος της Μηχανικής και των Μαθηματικών, ο οποίος ασχολείται με τη συμπεριφορά των δυναμικών συστημάτων. Ο *Αυτόματος Έλεγχος* (*Automatic Control*) είναι η εφαρμογή της Θεωρίας Ελέγχου για τη ρύθμιση κάποιων διαδικασιών χωρίς την άμεση παρέμβαση του ανθρώπου.

Τα συστήματα που σχετίζονται με τον αυτόματο έλεγχο, τα λεγόμενα *Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*, είναι σήμερα μια από τις σημαντικότερες περιοχές της επιστήμης και της τεχνολογίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αυτόματος έλεγχος είναι συνυφασμένος με την ανάπτυξη σχεδόν κάθε μορφής τεχνολογίας. Τις περασμένες δεκαετίες οι τεχνικές ελέγχου συστημάτων απέκτησαν βαθμιαία σημαίνοντα ρόλο, λόγω της διαρκώς αυξανόμενης πολυπλοκότητας των ελεγχόμενων συστημάτων, αλλά και λόγω της επιθυμίας μας για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης μιας διάταξης ή ενός συστήματος. Εάν εξετάσουμε προσεκτικά τα διάφορα μηχανήματα που κατασκευάζει σήμερα ο άνθρωπος, θα διαπιστώσουμε ότι υπερτερούν των παλαιότερων διότι περιέχουν περισσότερους, βελτιωμένους και ακριβέστερους αυτοματισμούς. Τέτοια μηχανήματα είναι για παράδειγμα το αυτοκίνητο, το αεροπλάνο, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, το ρομπότ, οι βιομηχανικές μονάδες, κ.ά.. Ο αυτόματος έλεγχος αναπτύχθηκε ραγδαία κατά τα τελευταία εξήντα χρόνια, ιδιαίτερα δε από τη δεκαετία του '60 μέχρι και σήμερα. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μέχρι σήμερα είναι αρκετά εντυπωσιακά τόσο από θεωρητικής πλευράς, όσο και από πλευράς εφαρμογών.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η μοντελοποίηση και ο έλεγχος σύγχρονων, πολύπλοκων, και αμοιβαία συσχετιζόμενων συστημάτων, αποτελεί στη σημερινή εποχή πρόκληση για τους μηχανικούς σχεδίασης συστημάτων ελέγχου. Ο πιο χαρακτηριστικός ίσως ποιοτικός προσδιορισμός της σχεδίασης συστημάτων ελέγχου είναι η δυνατότητα του ελέγχου μηχανών και διαδικασιών προς όφελος του κοινωνικού συνόλου.

Σύμφωνα με τους σύγχρονους τρόπους χρήσης τους, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου συσχετίζονται με το είδος της τεχνολογίας στο οποίο χρησιμοποιούνται προ-

γραμματισμένες εντολές για τη διενέργεια μιας συγκεκριμένης διαδικασίας, και επιβεβαιώνει την ορθή εκτέλεση αυτών των εντολών, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία ανατροφοδότησης (ανάδρασης) πληροφοριών που σχετίζονται με το παραγόμενο αποτέλεσμα.

Μια αρκετά σπουδαία εφαρμογή της τεχνολογίας του αυτομάτου ελέγχου αφορά τον έλεγχο των σύγχρονων αυτοκινήτων, κάτι με το οποίο ασχολείται αυτή η διπλωματική εργασία. Από το 1994 έχει ξεκινήσει η ευρεία χρήση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στη βιομηχανία αυτοκινήτων. Η διαδικασία παραγωγής ενός αυτοκινήτου, απαιτεί από τότε αξιόπιστα και εύρωστα συστήματα. Στον τομέα αυτό έχουν παρουσιαστεί διάφορα συστήματα ελέγχου των αναρτήσεων, συστήματα ελέγχου και αποτροπής ολίσθησης του οχήματος, ελεγκτές που αφορούν την ρύθμιση της λειτουργίας του συστήματος διεύθυνσης του αυτοκινήτου, του συστήματος πέδησης, τη ρύθμιση της λειτουργίας της μηχανής, κ.ά..

Η εξέλιξη στην κατασκευή και τον προγραμματισμό των ηλεκτρονικών υπολογιστών μαζί με την επιθυμία μείωσης του λόγου κόστους/απόδοσης, έφερε στην επιφάνεια επαναστατικές μεθόδους σχεδίασης συστημάτων για διάφορες εφαρμογές, και στην περίπτωση μας, μεθόδους σχεδίασης συστημάτων αυτοκινήτων.

Από τη συνεργασία της (κλασικής και της σύγχρονης) θεωρίας ελέγχου με την τεχνολογία των Η/Υ και τη Φυσική επιστήμη, αναδύθηκαν πολλά νέα και βελτιωμένα προϊόντα και συστήματα στο χώρο της τεχνολογίας, και κατ' επέκταση στο χώρο των αυτοκινήτων. Από τότε που τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά συστήματα εισήλθαν στο χώρο του αυτοκινήτου, είναι αναμενόμενο ότι θα παράγονται πλέον ολοένα ισχυρότεροι (και σε κάποιες περιπτώσεις φθηνότεροι) επεξεργαστές, μικροελεγκτές, πρωτοποριακοί αισθητήρες και ενεργοποιητές. Αυτό οφείλεται στην πρόοδο των τεχνολογιών των μικρο-ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων (*MEMS*), στις προηγμένες μεθοδολογίες ελέγχου και προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο, στις τεχνολογίες ασύρματης και ενσύρματης δικτύωσης, *στη χρήση της ώριμης, πλέον, τεχνολογίας σχεδίασης συστημάτων μέσω Η/Υ για την εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων μοντελοποίησης συστημάτων, και στην εικονική, μέσω προσομοίωσης, εφαρμογή ελέγχου.* Τα προαναφερθέντα μπορεί να τα αντιληφθεί κανείς αν σκεφτεί απλά ότι πριν από το 1960, η μόνη αξία λόγου ηλεκτρονική συσκευή των αυτοκινήτων ήταν το ραδιόφωνο. Στις μέρες μας πολλά μοντέλα αυτοκινήτων συμπεριλαμβάνουν 30 έως 60 μικροελεγκτές, πάνω από 100 ηλεκτρικούς κινητήρες, αρκετά κιλά καλωδίων, μια ποικιλία

αισθητήρων και χιλιάδες γραμμές κώδικα. Κάτι τέτοιο κάνει σαφές ότι το αυτοκίνητο δεν μπορεί να ταξινομηθεί πλέον στην κατηγορία των αμιγώς μηχανολογικών τεχνουργημάτων.

Η εργασία αυτή στηρίζεται πάνω στην τεχνολογία σχεδίασης συστημάτων (που αναφέρθηκε προηγουμένως με *πλάγια* γράμματα), για να καταλήξει στην εικονική εφαρμογή ελέγχου (που επίσης αναφέρθηκε), μέσω προσομοίωσης, ενός συστήματος ανάρτησης αυτοκινήτου. Αυτή η διπλωματική εργασία αφορά το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση ενός συστήματος ελέγχου το οποίο ρυθμίζει τη λειτουργία της ανάρτησης του μοντέλου οχήματος του περιβάλλοντος *veDYNA*.

Το *veDYNA* είναι ένα επαγγελματικό περιβάλλον το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιείται όχι μόνο από αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες ανά τον κόσμο, αλλά και από τμήματα ανάπτυξης των κατασκευαστών πρωτότυπου εξοπλισμού (*Original Equipment Manufacturers – OEM*) αυτοκινήτων. Το περιβάλλον αυτό ειδικεύεται στην προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των τροχοφόρων οχημάτων, βασίζοντας την υλοποίησή του στο *MATLAB* και τη μοντελοποίησή του στο *Simulink*.

Αυτό το οποίο κάνουμε εμείς είναι να τροποποιήσουμε το αρχικό μοντέλο οχήματος του *veDYNA*, μέσω της προσθήκης του ελέγχου της ανάρτησης στο μοντέλο αυτό. Το μοντέλο οχήματος του *veDYNA* (στο οποίο κατασκευάζεται η στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής) αντιπροσωπεύει κυρίως το σύστημα αυτοκινήτου-οδηγού, ένα κλασικό παράδειγμα συστήματος κλειστού βρόχου (*closed loop system*). Στο παράδειγμα αυτό ο εικονικός οδηγός (*controller*) προσδιορίζοντας οπτικά τη θέση του αυτοκινήτου (*plant*) στο δρόμο, προβαίνει στις απαραίτητες ρυθμίσεις χρησιμοποιώντας το τιμόνι και τα πεντάλ επιτάχυνσης και πέδησης προκειμένου να ελέγξει την πορεία του αυτοκινήτου.

Ο ειδικότερος επιστημονικός χώρος στον οποίο εντάσσεται η υλοποίηση της εργασίας αυτής είναι ο *Βέλτιστος Έλεγχος* (*Optimal Control*), μία σύγχρονη (και όχι κλασσική) μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων ελέγχου. Ο στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής είναι η στρατηγική *LQR* (*Linear Quadratic Regulator - Γραμμικός Τετραγωνικός Ρυθμιστής*) του βέλτιστου ελέγχου. Αυτή η στρατηγική διαμορφώνει έναν αλγόριθμο ελέγχου ο οποίος κατασκευάζεται με βάση ένα μαθηματικό υπόδειγμα πλήρους μοντέλου αυτοκινήτου (*full car model*) επτά βαθμών ελευθερίας (*7-DOF*). Εφ' όσον αυτό το οποίο ελέγχουμε είναι ένα σύστημα ανάρτησης, προσαρμό-

ζουμε τα κριτήρια βελτιστοποίησης αυτής της στρατηγικής ελέγχου με τρία κύρια κριτήρια απόδοσης των αναρτήσεων: το κριτήριο ευστάθειας του οχήματος, το κριτήριο άνεσης των επιβατών, και το κριτήριο εξοικονόμησης ενέργειας.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας λοιπόν ήταν να καταλήξουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του οχήματος *veDYNA* με τον *LQR* ελεγκτή (ενεργητικό σύστημα ανάρτησης) και χωρίς τον *LQR* ελεγκτή (παθητικό σύστημα ανάρτησης). Το όχημα αυτό εκτελεί μια ευθεία πορεία σε δρόμο στον οποίο εμφανίζεται ένα σαμαράκι κάποια χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Καταλήγουμε στο ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας είναι επιθυμητά, μέσω της σύγκρισης των γραφικών αποτελεσμάτων των μεγεθών των τριών κριτηρίων που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, και των γραφικών αποτελεσμάτων των αντίστοιχων μεγεθών της παθητικής ανάρτησης του *veDYNA*.

Αυτή η διπλωματική εργασία προτείνει, σε ένα περιβάλλον το οποίο είναι ιδανικό και ενδείκνυται για το σκοπό αυτό, έναν *LQR* ελεγκτή με συγκεκριμένες προδιαγραφές ο οποίος μπορεί να βελτιώσει αισθητά την απόδοση ενός συστήματος ανάρτησης, που όπως θα δούμε ωφελείται σε ικανοποιητικό βαθμό ο οδηγός και οι επιβάτες.

Τη συμπεριφορά των αναρτήσεων με και χωρίς τον ελεγκτή έχουμε τη δυνατότητα να την εποπτεύουμε μέσω ενός εργαλείου εικονικής πραγματικότητας *DYNAanimation*, το οποίο λειτουργεί σαν εικονικό “*test drive*”. Με το εργαλείο αυτό συνδέεται το μοντέλο αυτοκινήτου το οποίο προσομοιώνεται.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η δομή της αναφοράς της εργασίας αυτής. Το *Κεφάλαιο 1* αφορά το χώρο στον οποίο βρίσκεται εφαρμογή η στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής, ο οποίος είναι η δυναμική οχημάτων. Το σύστημα ανάρτησης ενός οχήματος ανήκει στην κάθετη δυναμική του οχήματος (*vertical vehicle dynamics*) επηρεάζοντας και τις άλλες δυο δυναμικές του οχήματος: την πλευρική και τη διαμήκη δυναμική (*lateral* και *longitudinal vehicle dynamics* αντίστοιχα). Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται επίσης στη μεθοδολογία του *Model-Based Design*, μια σύγχρονη μεθοδολογία σχεδίασης, ανάπτυξης και ανάλυσης ενσωματωμένων συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, και ειδικότερα για την περίπτωση μας, και στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Η υλοποίηση της εργασίας αυτής ανήκει στα αρχικά στάδια της μεθοδολογίας αυτής.

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζεται το περιβάλλον *veDYNA*. Περιγράφεται η μορφή του, παρουσιάζεται γενικά και αναλυτικά το μοντέλο οχήματος του περιβάλλοντος αυτού, η Γραφική Διασύνδεση Χρήστη του περιβάλλοντος και οι απαραίτητες ρυθμίσεις που κάναμε στη διασύνδεση αυτή για να πετύχουμε το σκοπό μας.

Στο *Κεφάλαιο 3* ορίζονται γενικά οι αναρτήσεις των οχημάτων, μοντελοποιούνται τα συστήματα ανάρτησης σε μοντέλα ενός τετάρτου του αυτοκινήτου (*quarter car model*), καθώς και περιγράφονται, κατηγοριοποιούνται, και συγκρίνονται με βάση τη μοντελοποίηση αυτή. Ακόμη, εξετάζεται αναλυτικά η λειτουργία του κάθε είδους συστήματος ανάρτησης με βάση την κατηγοριοποίηση που κάνουμε και περιγράφονται τα στοιχεία στα οποία εφαρμόζεται ο έλεγχος της εργασίας αυτής.

Το *Κεφάλαιο 4* αφορά τη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή με σκοπό τη ρύθμιση της απόκρισης του συστήματος ενεργητικής ανάρτησης του οποίου η συμπεριφορά προσομοιώνεται στο *veDYNA*. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής.

Στο *Κεφάλαιο 5* συνοψίζεται το περιεχόμενο της γραπτής αναφοράς αυτής της εργασίας, παρουσιάζονται οι προοπτικές τροποποίησης και εξέλιξης αυτής της διπλωματικής εργασίας, και εξάγονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την υλοποίησή μας.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	3
Ευχαριστίες	5
Πρόλογος	6

Κεφάλαιο 1 – Δυναμική οχημάτων και Model-Based Design

1.1	Εισαγωγή	15
1.2	Δυναμική οχημάτων	16
1.3	Ανάλυση της δυναμικής οχημάτων	17
1.3.1	Προσομοίωση συστημάτων	19
1.3.2	Προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων	21
1.3.3	Model-Based Design	23
1.3.3.1	Ορισμός	24
1.3.3.2	Model-Based Design και Θεωρία Ελέγχου	25
1.3.3.3	Προσομοίωση Model in-the-Loop	27
1.3.3.4	Model-Based Design και βιομηχανίες αυτοκινήτων	28

Κεφάλαιο 2 – Το περιβάλλον veDYNA

2.1	Εισαγωγή	34
2.2	Το veDYNA γενικά	35
2.3	Γενική μορφή περιβάλλοντος	36
2.4	Μοντέλο προσομοίωσης	38
2.4.1	Γενική ιδέα του μοντέλου	39
2.4.2	Περιγραφή του μοντέλου	41
2.4.2.1	Οι οντότητες vdy_md1 και io_task	42
2.4.2.1.1	Το εσωτερικό της οντότητας vdy_md1	43

	2.4.2.1.2	Η οντότητα Maneuver Control	46
	2.4.2.1.3	Η οντότητα Vehicle System	48
	2.4.2.2	Οι οντότητες CPT_MDL και CPT_IO	48
	2.4.2.3	Οι οντότητες Triggered Vehicle Animation και Animation Data	49
2.5		Γραφική διασύνδεση χρήστη (GUI).....	50
	2.5.1	Παρουσίαση και περιγραφή.....	50
	2.5.1.1	Γραμμή μενού.....	51
	2.5.1.2	Γραμμή εργαλείων	52
	2.5.1.3	Πλαίσιο καθορισμού μοντέλου και πλατφόρμας	52
	2.5.1.4	Πλαίσιο καθορισμού οχήματος.....	53
	2.5.1.5	Πλαίσιο ελέγχου προσομοίωσης.....	55
	2.5.1.5.1	Ρύθμιση ελιγμού	56
	2.5.1.5.2	Ρύθμιση οδηγού	58
	2.5.1.5.3	Ρύθμιση δρόμου.....	59
	2.5.1.5.4	Ρύθμιση trace.....	60
	2.5.1.6	Πλαίσιο καθορισμού διαδικασίας χρήστη.....	60
	2.5.2	Σύνολα ρυθμίσεων	61
	2.5.2.1	Πρώτο σύνολο ρυθμίσεων.....	62
	2.5.2.2	Δεύτερο σύνολο ρυθμίσεων	69

Κεφάλαιο 3 – Συστήματα ανάρτησης οχημάτων

3.1	Εισαγωγή	75
3.2	Τα συστήματα ανάρτησης οχημάτων γενικά.....	77
3.3	Ορισμός και στόχοι.....	78
3.4	Η γενική διάταξη και η λειτουργία μιας συμβατικής ανάρτησης.....	80
3.4.1	Αναρτήσεις και μηχανική ενέργεια	83
3.4.2	Δυνάμεις ελατηρίου και αποσβεστήρα	85
3.5	Κατηγορίες συστημάτων ανάρτησης.....	91
3.5.1	Σύστημα Παθητικής Ανάρτησης	99
3.5.1.1	Η παθητική ανάρτηση του veDYNA	100
3.5.2	Σύστημα Ημιενεργητικής Ανάρτησης	107

3.5.3	Σύστημα Ενεργητικής Ανάρτησης.....	109
-------	------------------------------------	-----

Κεφάλαιο 4 – Στρατηγική ελέγχου

4.1	Εισαγωγή	115
4.2	Ο αυτόματος έλεγχος γενικά	116
4.3	Το γενικό πρόβλημα του ελέγχου	117
4.4	Το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου	119
4.4.1	Γραμμικός τετραγωνικός έλεγχος.....	120
4.4.2	Γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής.....	122
4.5	Αλγόριθμος ελέγχου.....	126
4.5.1	Η σχεδιαστική υλοποίηση στο Simulink	140
4.5.1.1	Οι οντότητες Suspension States και Suspension Control	144
4.5.1.2	Η οντότητα Suspension	147
4.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	152

Κεφάλαιο 5 – Σύνοψη, συμπεράσματα, προοπτικές τροποποίησης και εξέλιξης

5.1	Συμπεράσματα	163
5.2	Προοπτικές τροποποίησης και εξέλιξης	166
5.2.1	veDYNA_ext_aero	167
5.2.2	veDYNA_ext_brake	168
5.2.3	veDYNA_ext_cvt	170
5.2.4	veDYNA_ext_eng	170
5.3	Σύνοψη.....	171

Παράρτημα Α

A.1	Κώδικας διαδικασίας χρήστη (User Procedure)	177
A.2	Αλγόριθμος LQR	179
A.3	Plotting script	181

Βιβλιογραφία	186
---------------------------	-----

Ιστοσελίδες	188
--------------------------	-----

Κεφάλαιο 1 – Δυναμική οχημάτων και *Model-Based Design*

1.1 Εισαγωγή

Το περιεχόμενο του κεφαλαίου αυτού αφορά το επιστημονικό πεδίο στο οποίο εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής: το πεδίο της δυναμικής των οχημάτων (*vehicle dynamics*).

Στην ενότητα **1.2** περιγράφεται ο επιστημονικός τομέας στον οποίο βασίζεται ο τομέας της δυναμικής των οχημάτων, όπου μέσω της περιγραφής αυτής δίδεται και ένας γενικός ορισμός της δυναμικής των οχημάτων. Στην ενότητα αυτή αναφέρονται τα στοιχεία με τα οποία ασχολείται η δυναμική οχημάτων, οι παράμετροι του οχήματος που προσεγγίζει, αλλά δίδονται επίσης και παραδείγματα συστημάτων στα οποία εισχωρούν οι πτυχές του επιστημονικού αυτού τομέα. Ανάμεσα στην πληθώρα των συστημάτων αυτών βρίσκεται και το σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος στην εργασία αυτή: το σύστημα ανάρτησης του αυτοκινήτου.

Στην ενότητα **1.3** και συγκεκριμένα στις υποενότητες **1.3.1** και **1.3.2** περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης συστημάτων, μια τεχνική αναλυτικής προσέγγισης διάφορων συστημάτων, όπως είναι η διαδικασία της προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων, μια τεχνική αναλυτικής προσέγγισης των συστημάτων που υπακούουν στους νόμους της δυναμικής οχημάτων. Στην υποενότητα **1.3.3** περιγράφεται η σχετικά σύγχρονη μεθοδολογία *Model-Based Design*, μια μεθοδολογία σχεδίασης, ανάπτυξης και ανάλυσης ενσωματωμένων συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως και σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία, και ειδικότερα για την περίπτωση μας, και στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Είναι μια μεθοδολογία που εγγυάται την όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση των συστημάτων των οχημάτων,

εφαρμόζεται σε όλο το φάσμα της παραγωγής ενός συστήματος, από την αρχική του σχεδίαση μέχρι και τη διάθεσή του στην αγορά. Η σχέση της μεθοδολογίας αυτής με την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ότι η διαδικασία της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης της εργασίας αυτής αποτελούν τα αρχικά και βασικά στάδια του *Model-Based Design*.

1.2 Δυναμική οχημάτων

Αρχικά, θα ήταν χρήσιμο να προσδιοριστεί ο επιστημονικός χώρος απ' τον οποίο προέρχεται ο κλάδος της δυναμικής των οχημάτων. Η *δυναμική των οχημάτων* (*vehicle dynamics*) βασίζεται πρωτίστως στην *Κλασική Μηχανική*. Η Κλασική Μηχανική είναι κλάδος της Φυσικής ο οποίος ασχολείται με το σύνολο των φυσικών νόμων που περιγράφουν την κίνηση σωμάτων υπό την επήρεια ενός συστήματος δυνάμεων.

Η *Δυναμική* (*Dynamics*) λοιπόν είναι ένας κλάδος της Φυσικής, ο οποίος έχει ως αντικείμενο τη μελέτη των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται σε ένα σώμα και την επίδρασή τους πάνω στην κίνηση του σώματος αυτού. Είναι προφανές ότι η δυναμική οχημάτων ασχολείται με τη μελέτη των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται στο όχημα κατά τη διάρκεια της οδήγησής του, και την επίδρασή τους πάνω στην κίνηση και την οδική συμπεριφορά του οχήματος αυτού. Καθόσον η επίδοση του οχήματος, (δηλαδή οι κινήσεις που πραγματοποιούνται κατά την επιτάχυνση, την πέδηση, και την αλλαγή διεύθυνσης του αυτοκινήτου) είναι μια απόκριση στις δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα και στα μέρη του, ένα μεγάλο μέρος της μελέτης της δυναμικής του οχήματος πρέπει να περιλαμβάνει τη μελέτη του *πώς* και *γιατί* παράγονται οι δυνάμεις αυτές.

Η δυναμική προσέγγιση των οχημάτων προσδιορίζει κρίσιμες παραμέτρους του οχήματος, όπως γεωμετρικές παραμέτρους, παραμέτρους σχετικά με την ίδια την κίνηση του αυτοκινήτου, με τη μάζα του οχήματος και την κατανομή της, καθώς και

παραμέτρους σχετικά με την αεροδυναμική του οχήματος (η Αεροδυναμική είναι κλάδος της Δυναμικής), και τα ελαστικά.

Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι οι βασικές αρχές που διέπουν το φαινόμενο της κίνησης ενός οχήματος αγγίζουν σχεδόν όλους τους τομείς της Μηχανικής, ξεκινώντας από την στατική και δυναμική μηχανική και καταλήγοντας στην Ρευστοδυναμική και τη Μηχανική του παραμορφώσιμου ελαστικού σώματος.

Οι πτυχές της δυναμικής των οχημάτων, και συγκεκριμένα των τροχοφόρων οχημάτων (αυτός ο διαχωρισμός γίνεται επειδή η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με τον έλεγχο συστήματος ανάρτησης τροχοφόρου οχήματος) εισχωρούν σε πληθώρα συστημάτων. Κάποια απ' τα συστήματα αυτά είναι το ηλεκτρονικό σύστημα ευστάθειας (*ESC - Electronic Stability Control*), το σύστημα ελέγχου πρόσφυσης (*TCS - Traction Control System*), το *CBC – Cornering Brake Control*, το σύστημα ηλεκτρονικής κατανομής πέδησης (*EBD – Electronic Brake Distribution*), το σύστημα διεύθυνσης του οχήματος, και το σύστημα ανάρτησης του οχήματος.

1.3 Ανάλυση της δυναμικής οχημάτων

Η μελέτη της δυναμικής των οχημάτων μπορεί να γίνει σε δύο επίπεδα: το αναλυτικό, και το εμπειρικό.

Η εμπειρική μελέτη βασίζεται σε απλές μεθόδους, με βάση την μεθοδολογία δοκιμής-σφάλματος (*trial and error*), με την οποία προσεγγίζουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση του οχήματος και τις συνθήκες που οι παράγοντες αυτοί επενεργούν. Χαρακτηρίζεται από επαναλαμβανόμενες και ποικίλες προσπάθειες προσέγγισης, που συνεχίζονται μέχρι την σωστότερη και περισσότερο επιτυχή προσέγγιση. Πρόκειται για μια μη συστηματική μέθοδο που δεν την απασχολούν η διορατικότητα, η θεωρία ή η οργανωμένη μεθοδολογία. Επομένως, η εμπειρική μελέτη πολλές φορές αποτυγχάνει να δώσει αξιοποιήσιμα συμπεράσματα, αφού δεν υπάρχει μια μηχανιστική κατανόηση του πώς οι αλλαγές στο σχεδιασμό ή τις ιδιότητες του οχήματος μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή του,.

Μια αναλυτική λοιπόν προσέγγιση της δυναμικής των οχημάτων είναι απαραίτητη για τους Μηχανικούς, ώστε βασιζόμενοι σε κανόνες της Φυσικής, να είναι ικανοί να διατυπώσουν τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα και τους μηχανισμούς εκείνους που προσεγγίζουν το φυσικό πρόβλημα. Στις περισσότερες περιπτώσεις καταλήγουμε σε αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις που μπορούν να προβλέψουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός οχήματος και να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των κατασκευαστικών παραμέτρων του οχήματος.

Είναι αξιοσημείωτο όμως το γεγονός ότι χωρίς τη χρήση κάποιου υπολογιστικού συστήματος, τα μαθηματικά μοντέλα και οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούμε δεν είναι πάντα χωρίς σφάλματα, διότι μόνο προσεγγίζουν το φυσικό πρόβλημα. Οι παραδοχές που κάνουμε κατά την ανάλυση ενός προβλήματος, προκειμένου να καταλήξουμε σε μοντέλα που να επιλύονται τελικά, συχνά επιφέρουν σφάλματα χωρίς την εγκυρότητα, την ακρίβεια, και την αξιοπιστία των υπολογιστικών συστημάτων.

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να εξάγουμε εύκολα το συμπέρασμα πως στο παρελθόν, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετώπιζε ο μελετητής ενός αναλυτικού μοντέλου, ήταν ο περιορισμένος αριθμός υπολογιστικών εργαλείων που είχε στη διάθεση του για την επίλυση του μοντέλου. Τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα που έχει σήμερα στη διάθεση του ο μελετητής, αποτελούν μεγάλη πρόοδο στον τομέα αυτό.

Είναι πλέον δυνατή η *προσομοίωση* και ο *έλεγχος* αρκετά περίπλοκων μοντέλων, και η χρήση των υπολογιστών για την διερεύνηση και βελτιστοποίηση πολλών ταυτόχρονα παραμέτρων του σχεδιασμού ενός οχήματος. Η διαδικασία της μοντελοποίησης της δυναμικής του κινούμενου οχήματος έχει τους ακόλουθους στόχους:

- Τη διατύπωση των εξισώσεων της κίνησης του οχήματος και την διερεύνηση των κατάλληλων μεθόδων για την λύση τους.
- Τη χρήση ή την ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου υπό τη μορφή ενός πακέτου προγραμμάτων υπολογιστή, για τον αυτοματοποιημένο σχεδιασμό και βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων της μοντελοποίησης.

Έτσι, αφού πρώτα το πρόβλημα του σχεδιασμού διερευνηθεί θεωρητικά, ακολουθεί στη συνέχεια η συστηματοποίηση του σχεδιασμού με ένα πλήρες υπολογιστικό πακέτο, το οποίο προσφέρει στον μελετητή όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων προς την κατεύθυνση μιας συγκεκριμένης ζητούμενης λύσης.

1.3.1 Προσομοίωση συστημάτων

Προσομοίωση ονομάζεται η μέθοδος μελέτης ενός συστήματος και εξοικείωσης με τα χαρακτηριστικά του, με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής. Όταν λοιπόν η προσομοίωση εκτελείται σε υπολογιστή, αυτή η μέθοδος της προσομοίωσης χρησιμοποιεί μια τεχνική μίμησης της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των συστημάτων που μελετούνται, μέσω του ηλεκτρικού υπολογιστή.

Η προσομοίωση αποτελεί μία πειραματική μέθοδο που έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση συστημάτων, την ανάλυση της ευαισθησίας τους και τη μελέτη της λειτουργίας τους. Ως πειραματική μέθοδος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πιστότητα του μοντέλου του συστήματος που χρησιμοποιείται, καθώς και από την επιλογή εκείνων των παραμέτρων που απαιτούνται για την εξαγωγή αξιόπιστων και χρήσιμων συμπερασμάτων. Η προσομοίωση με υπολογιστές αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη σύνθετων συστημάτων. Οι βελτιώσεις στον τομέα της μικροηλεκτρονικής δίνουν τη δυνατότητα μοντελοποίησης και ανάλυσης πολύπλοκων συστημάτων, τα οποία εκτελούνται σε ελάχιστο χρόνο.

Όσον αφορά το χρόνο της προσομοίωσης, μπορεί να διαρκέσει για παράδειγμα 2 ώρες για να μιμηθεί 60 δευτερόλεπτα της συμπεριφοράς του συστήματος, ή το αντίστροφο. Δηλαδή, σ' αυτή την περίπτωση, ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης δε συμβαδίζει με τη διάρκεια της συμπεριφοράς που μιμείται η προσομοίωση. Στην περίπτωσή μας, θέτουμε σε ισχύ το αντίστροφο του παραδείγματος. Έχουμε δηλαδή το πλεονέκτημα ότι ο χρόνος προσομοίωσης είναι μικρότερος απ' τη διάρκεια της

συμπεριφοράς που μιμείται η προσομοίωση, υπό την προϋπόθεση ότι το μοντέλο δεν έχει αλλάξει σε σχέση με το μοντέλο που προσομοιώθηκε την τελευταία φορά (το οποίο πλεονέκτημα παρέχει το *Simulink* μέσω της προσομοίωσης με τη ρύθμιση “*Accelerator*” στο μοντέλο). Έτσι, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τον αλγόριθμο ελέγχου κάθε φορά που προσομοιώνει το μοντέλο μας στη δική μας περίπτωση, με το χρόνο μεταξύ της χρονικής στιγμής της έναρξης και της χρονικής στιγμής της λήξης της προσομοίωσης να είναι μικρότερος απ’ τον πραγματικό χρόνο διάρκειας της συμπεριφοράς που προσομοιώνεται.

Αξίζει όμως να εξεταστεί και η περίπτωση ενός είδους προσομοίωσης συστημάτων που εφαρμόζεται πέρα από το είδος της προσομοίωσης που εφαρμόζεται στην εργασία αυτή. Έτσι λοιπόν, σε περίπτωση προσομοίωσης πραγματικού χρόνου, ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης συμβαδίζει με τη διάρκεια της συμπεριφοράς που μιμείται η προσομοίωση (*real-time simulation*). Οι υπολογισμοί για κάθε βήμα της προσομοίωσης (*simulation time-step*) θα πρέπει να ολοκληρώνονται μέσα σε κάποιο δεδομένο χρονικό διάστημα.

Για το λόγο αυτό, σε περίπτωση διαφορετικής εφαρμογής από αυτήν της παρούσας εργασίας, η μελέτη της συμπεριφοράς δυναμικών συστημάτων όπως το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης της εργασίας αυτής αλλά σε πραγματικό χρόνο, και κατ’ επέκταση με την ανάλογη αξιοποίηση υλικού, θα μπορούσε να απαιτεί τη χρήση ισχυρών επεξεργαστών και ειδικών περιφερειακών συσκευών, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένο κόστος.

Βέβαια, υπάρχουν και οικονομικότερες λύσεις, όμως σε γενικές γραμμές η παραδοσιακή διαδικασία που ακολουθείται για τη σχεδίαση και υλοποίηση ολοκληρωμένων συστημάτων πραγματικού χρόνου (όπου αυτά τα συστήματα ξεφεύγουν απ’ το αντικείμενο ασχολίας της εργασίας αυτής) περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Ανάπτυξη αλγορίθμου
- Ανάπτυξη λογισμικού
- Κατασκευή/Συναρμολόγηση του υλικού
- Προσομοίωση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, με βάση τα παραπάνω

Τα στάδια αυτά επαναλαμβάνονται συνεχώς κατά την ανάπτυξη ενός συστήματος μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί πολύ χρόνο, επειδή η σχεδίαση του λογισμικού γίνεται ξεχωριστά από τη σχεδίαση των αλγορίθμων και τη δοκιμή στο τελικό υλικό (*hardware*). Επιπρόσθετα, τα παραπάνω στάδια απασχολούν ξεχωριστές ομάδες μηχανικών και επιστημόνων, γεγονός που απαιτεί τέλεια οργάνωση και αρκετό χρόνο για επικοινωνία. Η υλοποίηση δε σε επίπεδο συνολικό *hardware* γίνεται μόνο σε τελικό στάδιο, και το ίδιο επομένως ισχύει για τα πειράματα (δεδομένου ότι το σύστημα είναι συνήθως ογκώδες και πολύπλοκο). Τα λάθη που θα διαπιστωθούν στην πειραματική διαδικασία μπορεί να είναι θεμελιώδη και να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό το γενικό σχέδιο φέρνοντας μεγάλη οικονομική ζημία και χρονική σπατάλη.

Επομένως, γίνεται φανερό ότι ο συμβατικός τρόπος ανάπτυξης παρουσιάζει δυσκολίες. Απαιτεί ειδικές γνώσεις προγραμματισμού πραγματικού χρόνου και όχι μόνο, γεγονός που κάνει δύσκολη την ανάπτυξη συστημάτων από μικρό αριθμό μηχανικών και σε μικρό χρόνο.

Μια διαφορετική λύση σε αυτά τα προβλήματα έρχεται να δώσει ένας σχετικά νέος τρόπος ανάπτυξης συστημάτων, ο οποίος χρησιμοποιείται πλέον όλο και περισσότερο σε συστήματα βιομηχανιών, γνωστός ως “*Model-Based Design*” (σχεδιασμός βασισμένος στο μοντέλο).

1.3.2 Προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων

Η δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων μπορεί να αναλυθεί και να προσομοιωθεί με διάφορους τρόπους, από τον πιο απλό έως τον πιο σύνθετο.

Ένας αρκετά απλός τρόπος θα μπορούσε να είναι η προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος μάζας - ελατηρίου, μέσω ενός απλού αλλά και σχετικά προγενέστερου υπολογιστικού εργαλείου. Η συμπεριφορά αυτή θα μπορούσε να εξεταστεί μέσω ενός απλού μοντέλου τριών βαθμών ελευθερίας (3-DOF), συ-

ναρτήσει μιας διαταραχής η οποία ασκεί δύναμη στη μάζα αυτή, αντιπροσωπεύοντας έτσι το πραγματικό σύστημα τροχού (μάζας) - ανάρτησης (ελατηρίου), και η απλή δύναμη που ασκείται στη μάζα να αντιπροσωπεύει την διαταραχή του εδάφους.

Ένας άλλος σύνθετος τρόπος ανάλυσης και προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων, έχοντας μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας, εφαρμόζεται καθώς χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό πακέτο προσομοίωσης για ένα πολυμερές (*multibody*) σύστημα αυτοκινήτου, όπως το *veDYNA*.

Καθώς λοιπόν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν εξελιχθεί και έχουν γίνει σήμερα πιο γρήγοροι αλλά και οι διεπαφές χρήστη-λογισμικού έχουν βελτιωθεί, περιβάλλοντας προσομοίωσης όπως το *veDYNA* χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία για την ταχεία αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των εκατοντάδων συνθηκών τους, πολύ πιο γρήγορα απ' ότι σε πραγματικό χρόνο. Με την πάροδο του χρόνου κατέστη απαραίτητος ο σχεδιασμός προηγμένων ελεγκτών, έτσι ώστε πάνω στο σχεδιασμό αυτό να εκτελείται και η προσομοίωση του μοντέλου του οχήματος με τα βέλτιστα και επιθυμητά αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής. Λογισμικά ανάπτυξης σχεδιασμού ελεγκτών και γενικότερα μοντέλων που αντιπροσωπεύουν φυσικά συστήματα με τον καλύτερο τρόπο, είναι πλέον διαθέσιμα, όπως το *Simulink*, το οποίο χρησιμοποιείται και στην εργασία αυτή και συνδέεται άμεσα με το *veDYNA*, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.

Δυο χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετης μορφής προσομοίωσης της δυναμικής των οχημάτων, αποτελούν τα αγωνιστικά ηλεκτρονικά παιχνίδια και οι προσομοιωτές οδήγησης (*driving simulators*). Στο παρελθόν, ήταν απαραίτητες πολλές απλοποιήσεις προκειμένου να έχουμε απόδοση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο, συνδυασμένη με καλά γραφικά και με ρεαλιστική εφαρμογή των κανόνων της Φυσικής, τα οποία απαιτούν τόσο τα ηλεκτρονικά παιχνίδια όσο και οι προσομοιωτές οδήγησης.

Έτσι, οι βελτιώσεις στην ταχύτητα του υπολογιστή και η γενικότερη εξέλιξη και ανάπτυξή τους έχουν οδηγήσει στην ύπαρξη σύγχρονων ηλεκτρονικών πακέτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της δυναμικής των οχημάτων. Τα πακέτα αυτά χρησιμοποιούν κάποια λεπτομερή και πολυσύνθετα μοντέλα, όπου τέ-

τοια μοντέλα χρησιμοποιεί και το *veDYNA*, όπως θα δούμε παρακάτω, το περιβάλλον προσομοίωσης της εργασίας αυτής.

1.3.3 *Model-Based Design*

Διάφορα εργαλεία Μοντελοποίησης και Προσομοίωσης χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετό καιρό, όμως τα παραδοσιακά εργαλεία που βασίζονται σε κείμενο (*text-based*) είναι ανεπαρκή για την πολύπλοκη φύση των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου. Λόγω των περιορισμών των γραφικών εργαλείων στο παρελθόν, οι μηχανικοί σχεδιασμού βασίζονταν σε μεγάλο βαθμό στον προγραμματισμό που βασίζεται σε κείμενο (*text-based programming*), καθώς και σε μαθηματικά μοντέλα. Εντούτοις, η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων ήταν δύσκολη, χρονοβόρα, και ιδιαίτερα επιρρεπής σε σφάλματα. Επιπλέον, η εργασία των Μηχανικών με προγράμματα εντοπισμού σφαλμάτων (*debugging programs*) που βασίζονται σε κείμενο, αποτελούσε μια επίπονη διαδικασία, πριν να μπορούσε να δημιουργηθεί ένα τελικό μοντέλο χωρίς σφάλματα.

Οι προκλήσεις αυτές ξεπεράστηκαν με τη χρήση γραφικών εργαλείων μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται σήμερα σε όλες τις πτυχές του σχεδιασμού συστημάτων. Τα εργαλεία αυτά παρέχουν ένα πολύ γενικό και ενιαίο γραφικό περιβάλλον μοντελοποίησης, και μειώνουν την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού μοντέλων μέσω του χωρισμού τους σε ιεραρχίες των επιμέρους block σχεδιασμού. Οι σχεδιαστές μπορούν να επιτύχουν πολλαπλά επίπεδα πιστότητας του μοντέλου, αλλά αντικαθιστώντας για παράδειγμα ένα block στοιχείο με ένα άλλο. Τα γραφικά μοντέλα αποτελούν επίσης τον καλύτερο τρόπο για να τεκμηριωθούν οι ιδέες των μηχανικών. Αυτό βοηθά τους Μηχανικούς να αντιληφθούν ολόκληρο το σύστημα και απλοποιεί τη διαδικασία της μεταφοράς του μοντέλου από το ένα στάδιο στο άλλο, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού. Ο προσομοιωτής *Easy5* της *Boeing* ήταν από τα πρώτα εργαλεία μοντελοποίησης, το οποίο παρέχεται με μια γραφική διασύνδεση χρήστη. Αυτό ακολουθήθηκε σύντομα από εργαλεία όπως το *20 – sim*, το *Dymola*, και στην

περίπτωσή μας, το *veDYNA*, που επιτρέπουν να αποτελούνται τα μοντέλα από φυσικά συστατικά, όπως μάζες, ελατήρια, κλπ..

Κατά την ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων ελέγχου, οι σχεδιαστές δυσκολεύονται λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας του σχεδιασμού. Η στρατηγική του “*διαίρει και βασίλευε*” για την ανάπτυξη των πολύπλοκων συστημάτων σημαίνει το συντονισμό των πόρων των ανθρώπων με εμπειρία σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών κλάδων. Η παραδοσιακή προσέγγιση του σχεδιασμού ενσωματωμένου συστήματος που βασίζεται σε κείμενο, δεν είναι αρκετά αποτελεσματική για να χειριστεί τέτοια προηγμένα και πολύπλοκα συστήματα.

1.3.3.1 Ορισμός

Model-Based Design (σχεδιασμός βασισμένος στο μοντέλο) ονομάζεται ένας σύγχρονος τρόπος και μια σύγχρονη μεθοδολογία σχεδίασης, ανάπτυξης και ανάλυσης ενσωματωμένων συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, και ειδικότερα για την περίπτωση μας, και στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Χρησιμοποιείται κάποιο λογισμικό, έτσι ώστε να παρέχεται μια πλατφόρμα ανάπτυξης όπου οι αρχικές ιδέες υλοποιούνται, δοκιμάζονται και επαληθεύονται άμεσα χρησιμοποιώντας το πραγματικό υλικό (*hardware*). Η άμεση και εύκολη υλοποίηση μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών παραγωγής κώδικα, προσδίδει στη μέθοδο το χαρακτηριστικό της δοκιμής και αξιολόγησης σχεδιαστικών ιδεών καθ’ όλη τη διαδικασία της ανάπτυξης.

Αντί να χρησιμοποιηθούν πολύπλοκες δομές και εκτεταμένος κώδικας λογισμικού για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τον έλεγχο ενός συστήματος, οι σχεδιαστές συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη μεθοδολογία *Model-Based Design* για να καθορίσουν μοντέλα με προηγμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας εκτός των άλλων και μπλοκ διαγράμματα. Αυτά τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα εργαλεία προσομοίωσης μπορούν να οδηγήσουν στην τεχνική του *rapid prototyping*, τη δοκιμή του λογισμικού, και την επαλήθευση. Όχι μόνο η διαδικασία

ελέγχου και επαλήθευσης είναι ενισχυμένη, αλλά επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις, η *Hardware-in-the-Loop (HiL)* προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει τη δοκιμή των δυναμικών επιδράσεων στο σύστημα πιο γρήγορα και πολύ πιο αποτελεσματικά από ότι με παραδοσιακή μεθοδολογία σχεδιασμού. Έτσι λοιπόν:

- Ο σχεδιασμός *Model-Based* παρέχει ένα κοινό περιβάλλον σχεδίασης το οποίο διευκολύνει την γενική επικοινωνία, την ανάλυση των δεδομένων, και την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του συστήματος μεταξύ των ομάδων ανάπτυξης του συστήματος.
- Οι Μηχανικοί μπορούν να εντοπίσουν και να διορθώσουν νωρίς στο χρόνο της σχεδίασης του συστήματος οποιαδήποτε λάθη προκύψουν, καθώς ελαχιστοποιούνται οι χρονικές και οι οικονομικές επιπτώσεις της τροποποίησης του συστήματος.
- Διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση του σχεδιασμού για αναβαθμίσεις του συστήματος και για παράγωγα συστήματα με διευρυμένες δυνατότητες.

Επιπρόσθετα γενικά χαρακτηριστικά-πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η συνεχής υλοποίηση και αξιολόγηση ιδεών, η πειραματική αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης και όχι μόνο στο τέλος, η έγκαιρη διάγνωση λαθών, αλλά και ο μικρός χρόνος ανάπτυξης. Η βελτίωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος που μελετάται με τη μέθοδο αυτή θεωρείται δεδομένη.

1.3.3.2 *Model-Based Design* και Θεωρία Ελέγχου

Η μέθοδος *Model-Based Design* εφαρμόζεται ευρέως σε συστήματα τηλεπικοινωνιών, στην επεξεργασία σήματος, και διάφορων άλλων επιστημονικών κλάδων,

όπως βεβαίως και στην περίπτωση μας, στη Θεωρία Ελέγχου. Το περιβάλλον *Simulink* στο οποίο γίνεται η μοντελοποίηση της εργασίας αυτής, συνδέεται άμεσα με τον *Model-Based* σχεδιασμό.

Η μεθοδολογία *Model-Based Design* στη Θεωρία Ελέγχου αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Μοντελοποίηση του ελεγχόμενου συστήματος (*plant*). Διάφορα είδη αναλύσεων και προσομοιώσεων μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα υπολογιστικό σύστημα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο που θέλουμε πριν αυτό χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση ενός *Model-Based* ελεγκτή. Οι θεμελιώδεις αρχές μοντελοποίησης βασίζονται στη δημιουργία ενός μοντέλου που περιέχει “λειτουργικό διάγραμμα” (*block diagram*), το οποίο υλοποιεί διαφορικές-αλγεβρικές εξισώσεις, που διέπουν τη δυναμική των ελεγχόμενων συστημάτων. Ένα είδος θεμελιωδών αρχών μοντελοποίησης είναι η “φυσική μοντελοποίηση” (*physical modeling*), όπου ένα μοντέλο έχει δημιουργηθεί από τη σύνδεση μπλοκ που αντιπροσωπεύουν τα φυσικά στοιχεία απ' τα οποία αποτελείται η πραγματική εγκατάσταση.
- Σύνθεση και ανάλυση ενός ελεγκτή (*controller*) για το ελεγχόμενο σύστημα. Το μαθηματικό μοντέλο του αρχικού βήματος χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ελεγχόμενου μοντέλου. Ένας ελεγκτής μπορεί στη συνέχεια να συντεθεί με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά.
- Προσομοίωση του ελεγχόμενου συστήματος και του ελεγκτή. Η προσομοίωση σ' αυτό το βήμα μπορεί να είναι είτε “*Offline*” (δηλαδή σε μη πραγματικό χρόνο), είτε προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο. Η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο μπορεί να γίνει με την αυτόματη παραγωγή κώδικα μόνο για τον ελεγκτή (ο οποίος αναπτύχθηκε στο προηγούμενο στάδιο), με σκοπό να ελεγχθεί η λειτουργία του ελεγχόμενου συστήματος. Συνήθως ο κώδικας αυτός φορτώνεται σε έναν ειδικό και γρήγορο υπολογιστή και εκτελείται σε πραγματικό χρόνο. Κάτι τέτοιο όμως προϋποθέτει την ύπαρξη επιπλέον εργαλείων

που αλληλεπιδρούν με το MATLAB και το Simulink, εφ' όσον δουλεύουμε με αυτά, όπως το xPC Target και το Real-Time Workshop. Στην περίπτωση της εργασίας αυτής, χρησιμοποιείται το veDYNA για προσομοίωση σε μη-πραγματικό χρόνο, χωρίς τα εργαλεία αυτά. Συγκεκριμένα, γίνεται σε πολύ λιγότερο χρόνο απ' τη διάρκεια της συμπεριφοράς που μιμείται η προσομοίωση.

- Ανάπτυξη και εγκατάσταση ελεγκτή με βάση τα παραπάνω βήματα. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αυτό γίνεται, στην καλύτερη περίπτωση, μέσω της αυτόματης παραγωγής κώδικα από τον ελεγκτή που αναπτύχθηκε στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης. Όμως, είναι σχεδόν απίθανο ο ελεγκτής και τα χαρακτηριστικά του με τα οποία προσομοιώθηκε, να λειτουργήσει για το πραγματικό σύστημα ακριβώς όπως λειτούργησε και στην προσομοίωση. Έτσι, μια επαναληπτική διαδικασία εντοπισμού σφαλμάτων πραγματοποιείται με την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τη σχέση τους με τον πραγματικό στόχο, ενημερώνοντας το μοντέλο του ελεγκτή. Τα εργαλεία σχεδίασης με βάση το μοντέλο, όπως είναι το Simulink, επιτρέπουν όλα αυτά τα επαναλαμβανόμενα βήματα που πρέπει να εκτελεστούν σε ένα ενιαίο εικονικό περιβάλλον.

1.3.3.3 Προσομοίωση *Model in-the-Loop*

Model in-the-Loop (MiL) είναι το είδος προσομοίωσης που εφαρμόζεται στην εργασία αυτή. Η εφαρμογή της προσομοίωσης αυτής γίνεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης ενός συστήματος, και συγκεκριμένα ενός συστήματος κλειστού βρόγχου (*closed loop system*), όπως είναι και το δικό μας σύστημα.

Σ' αυτό το είδος προσομοίωσης χρησιμοποιείται ο ίδιος υπολογιστής και το ίδιο περιβάλλον προσομοίωσης για την προσομοίωση τόσο του συστήματος ελέγχου, όσο και του μαθηματικού μοντέλου (δηλαδή του ελεγχόμενου συστήματος). Αυτό σημαίνει ότι στο μοντέλο αυτό συνδέεται και αλληλεπιδρά άμεσα ο ελεγκτής με το ελεγχό-

μενο σύστημα, και το μοντέλο υπάρχει εξ' ολοκλήρου στο εργαλείο προσομοίωσης του υπολογιστή, δηλαδή στην περίπτωση μας, στο *Simulink*.

Αυτού του είδους η προσομοίωση είναι κατάλληλη να εφαρμόζεται κατά την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση ενός αλγορίθμου ελέγχου, και συγκεκριμένα στην περίπτωση της εργασίας αυτής, στην ανάπτυξη αλγορίθμου του *LQR* ελεγκτή. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτής, η διαδικασία που μόλις αναφέρθηκε είναι ταχύτατη. Επίσης, εξασφαλίζεται μια όσο το δυνατόν πιο γρήγορη εξέταση του μοντέλου του ελεγκτή, αφού με μικρές σχεδιαστικές αλλαγές του *controller* μπορούμε κατευθείαν να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος μέσω της *Model in the loop* προσομοίωσης, η οποία συμπεριφορά συνδυάζεται βεβαίως και με την ταχύτατη βελτιστοποίηση του αλγορίθμου του *controller*.

1.3.3.4 *Model-Based Design* και βιομηχανίες αυτοκινήτων

Τα θεωρητικά εργαλεία μοντελοποίησης θα πρέπει να προσφέρουν στο μηχανικό την ικανότητα να προβλέψει μια πιθανή συμπεριφορά του σχεδιασμού, αλλά θα πρέπει επίσης και να συμβάλλουν στην παροχή πληροφοριών για την καθοδήγηση στη διαλογή μεγάλων συνόλων από πιθανές τιμές παραμέτρων ενός συστήματος. Σε μια ιδανική μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη την έλευση των σύγχρονων ισχυρών εργαλείων πληροφορικής και προσομοίωσης, προηγείται η ανάπτυξη πρωτοτύπων και δοκιμών για να διασφαλιστούν όσες επαναλήψεις γίνεται, σε ένα εικονικό ή θεωρητικό περιβάλλον όπου η αναθεώρηση μεθόδων σχεδιασμού αλλά και η επανάληψη (*iteration*), αποτελούν σημαντικά φθηνότερες και ασφαλέστερες διαδικασίες. Το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι ο μειωμένος συνολικός χρόνος για την ανάπτυξη και βελτίωση του σχεδιασμού (δηλαδή μείωση του κόστους μιας βιομηχανίας) έχοντας παράλληλα και καλύτερη απόδοση (δηλαδή καλύτερο σχεδιασμό).

Σε πολύπλοκα συστήματα όπως αυτά των αυτοκινήτων, η έννοια της κατασκευής ολοκληρωμένων πρωτότυπων οχημάτων με βάση τις καλύτερες υποθέσεις

σχετικά με το σχεδιασμό υποσυστημάτων, δεν αποτελεί πλέον μια εφικτή ροή εργασίας, καθώς τα χρονοδιαγράμματα του σχεδιασμού των συστημάτων αυτών συρρικνώνονται, και οι πιέσεις του ανταγωνισμού αυξάνονται σε μεγάλα επίπεδα. Έτσι λοιπόν, οι εν λόγω βιομηχανίες εφαρμόζουν την τεχνική του *Model-Based Design*.

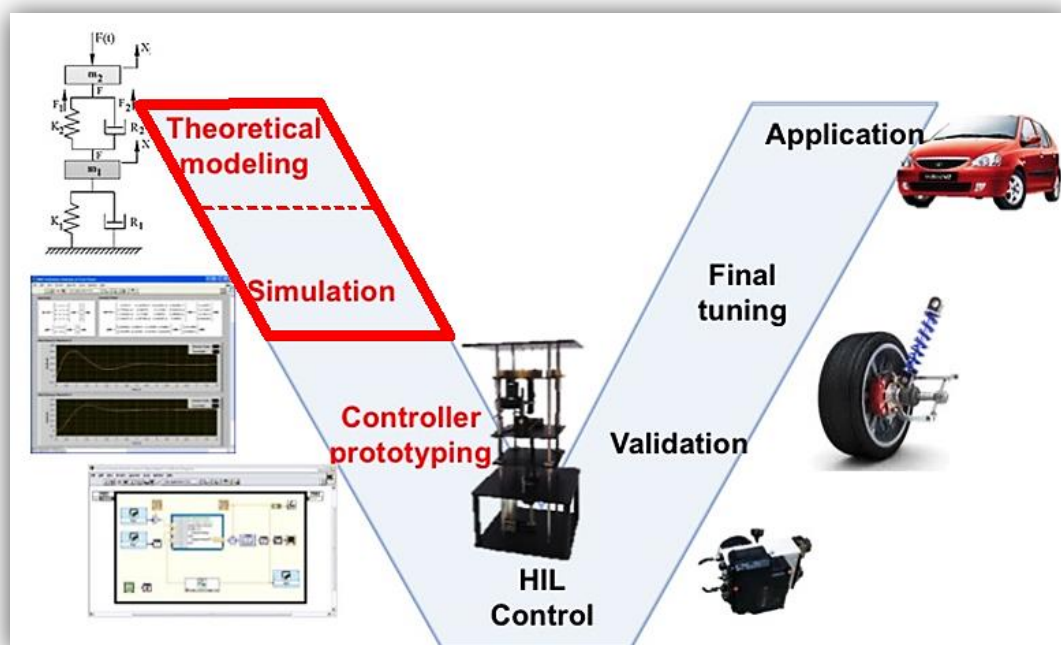
Όταν ο σχεδιασμός *Model-Based* τίθεται σε εφαρμογή, τα αρχικά του στάδια πλαισιώνονται κυρίως από την επιστήμη των Μαθηματικών, και μπορούν να προκαθορίσουν πιθανές τιμές παραμέτρων και πιθανούς κινδύνους, έτσι ώστε οι δοκιμές σε πραγματικό υλικό (*hardware*) να ενισχύονται με πολύ καλύτερες αρχικές εκτιμήσεις. Επίσης, οι θεωρητικές προβλέψεις μπορούν επίσης να κατευθύνουν το πώς μπορούν να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις και βελτιώσεις. Κατά συνέπεια, μπορούν να επιτευχθούν βέλτιστοι σχεδιασμοί γρηγορότερα.

Όλες οι μεγάλες εταιρείες αυτοκινήτων, καθώς και άλλοι τομείς που ασχολούνται με την προηγμένη τεχνολογία (π.χ. αεροδιαστημική, βιοιατρική, ρομποτική, κλπ.), εφαρμόζουν την τεχνική αυτή για τον απλό λόγο ότι το η ανοχή σε σφάλματα που μπορεί να υπάρχουν χωρίς τη μέθοδο αυτή, είναι πιθανή. Έτσι, οι μηχανικοί αναζητούν μεγαλύτερη αξιοπιστία στις μεθόδους τους, προκειμένου να διαχειριστούν την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των διάφορων συστημάτων που μελετούν.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί το παράδειγμα της αυτοκινητοβιομηχανίας *Toyota*. Το 2009 η *Toyota* προχώρησε στην ανάκληση 5,2 εκατομμυρίων οχημάτων, λόγω του γεγονότος ότι είχε αναφερθεί πως τα οχήματα αυτά είχαν απρόσμενη επιτάχυνση. Αρχικά, η αιτία θεωρήθηκε ότι είναι ένα καθαρά μηχανικό ή κατασκευαστικό πρόβλημα των πεντάλ. Το χειρότερο σενάριο για την *Toyota* ήταν, ωστόσο, το ενδεχόμενο να υπήρχε πρόβλημα με το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του συστήματος μετάδοσης κίνησης, για παράδειγμα η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (*Engine Control Unit – ECU*) να εγχέει εσφαλμένα περισσότερα καύσιμα και σε λάθος χρόνο, κάτι το οποίο οφείλεται σε κάποιο σφάλμα λογισμικού. Τη στιγμή της ανάκλησης, η εταιρεία ανέπτυξε σημαντικά τους πόρους που ήταν απαραίτητοι προκειμένου να καθορίσει γρήγορα την πηγή του προβλήματος. Όμως, το ενδεχόμενο σφάλμα ενός ελεγκτή οδήγησε σε μια γρήγορη απάντηση από την *Toyota*, και τελικά δόθηκε το έναυσμα για μια ανάκληση, η οποία όμως της κόστισε ακριβά.

Η διόρθωση ενός σφάλματος σε ένα πρόγραμμα ελεγκτή μπορεί να φαίνεται απλή, δηλαδή η διόρθωση να επέλθει με το να καθοριστεί απλά το σφάλμα και να επαναπρογραμματιστεί ο ελεγκτής. Όμως, το πραγματικό πρόβλημα στην περίπτωση της *Toyota* θα μπορούσε να είναι πρόβλημα ενός υποσυστήματος, το οποίο αντιπροσωπεύεται από ένα ηλεκτρονικό μοντέλο σε κάποιο λογισμικό, αντανakλώντας με αυτό τον τρόπο μια ανεπάρκεια στη μοντελοποίηση τους, ή στο σχεδιασμό του ελεγκτή.

Η **Εικόνα 1.1** δείχνει μια διαγραμματική αναπαράσταση της μορφής “V”, της τεχνικής του *Model-Based Design*. Στην περίπτωση των τροχοφόρων οχημάτων, η συνολική διαδικασία αφορά την ανάπτυξη ενός πολύπλοκου συστήματος ελέγχου αυτοκινήτων (π.χ. ενεργητική ανάρτηση, *ABS*, κ.λπ.). Η διαγραμματική απεικόνιση της τεχνικής αυτής σε σχήμα “V” περιγράφει τις δύο ευρείες ομάδες στις οποίες χωρίζεται το *Model-Based Design*, οι οποίες συνδέονται με ένα βήμα που ονομάζεται *Hardware-in-the-Loop (HiL)*.



Εικόνα 1.1 – Η διαγραμματική απεικόνιση “V” του *Model-Based Design* στα συστήματα ελέγχου αυτοκινήτων

Το *αριστερό κομμάτι* του “V” είναι η υπο-διαδικασία στην οποία, εκτός των άλλων, υπάρχουν και τα αρχικά και θεμελιώδη βήματα του *Model-Based Design* : ο αρχικός θεωρητικός σχεδιασμός του συστήματος του αυτοκινήτου, η μοντελοποίηση και η προσομοίωσή του. Παρακάτω, παρόλο που περιγράφονται οι υπόλοιπες διαδικασίες του αριστερού μέρους του “V”, δεν εφαρμόζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το *Rapid Controller Prototyping* ή απλά *Controller Prototyping*, είναι μια διαδικασία η οποία γίνεται προκειμένου η προσομοίωση του συστήματος να γίνει περισσότερο ρεαλιστική, και που επιτρέπει στο Μηχανικό να δοκιμάσει και να επαναλάβει γρήγορα τις στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζει. Στη διαδικασία αυτή παράγεται αυτόματα κώδικας μόνο για το μοντέλο του ελεγκτή, ο οποίος φορτώνεται σε ειδικό υπολογιστή πραγματικού χρόνου, με πραγματικές συσκευές εισόδου / εξόδου. Στη συνέχεια, ακολουθεί η *Hardware in-the-Loop (HiL)* προσομοίωση, μια τεχνική που εφαρμόζεται για το συνδυασμό του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος με πραγματικό φυσικό υλικό (*hardware*), έτσι ώστε το υλικό να λειτουργεί σαν να είχε ενσωματωθεί στο πραγματικό σύστημα. Για τη δοκιμή και ανάπτυξη των ενσωματωμένων ηλεκτρονικών ελεγκτών, ο ελεγκτής αντιπροσωπεύεται πλέον από πραγματικό υλικό, το οποίο το υλικό του ελεγκτή (*hardware controller*) συνδέεται σε μία προσομοίωση του ελεγχόμενου συστήματος, το οποίο εκτελείται στον εξωτερικό υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο.

Το *δεξί κομμάτι* του “V” είναι η υπο-διαδικασία η οποία ασχολείται με το κατά πόσο είναι έγκυρα και βελτιστοποιημένα τα θεωρητικά αποτελέσματα της αριστερής πλευράς, για την τελική εφαρμογή τους στον πραγματικό κόσμο. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τη διαδικασία της επικύρωσης των αποτελεσμάτων, και των τελικών ρυθμίσεων πριν βγει ένα σύστημα αυτοκινήτου στην αγορά.

Η εργασία αυτή ασχολείται με τα δυο αρχικά στάδια του που υπάρχουν στην **Εικόνα 1.1** (τονίζονται σε **κόκκινο** πλαίσιο), δηλαδή με τα θεμελιώδη και βασικά βήματα του *Model-Based Design* :

- Θεωρητική μοντελοποίηση (*theoretical modelling*)
- Προσομοίωση (*simulation*) του μοντέλου που αναπτύχθηκε σε κάποιο υπολογιστικό εργαλείο με βάση την παραπάνω θεωρητική μοντελοποίηση

Τα βήματα αυτά είναι πρωταρχικής σημασίας, και είναι καθοριστικά και απαραίτητα για να επόμενα βήματα όχι μόνο του *Model-Based Design*, αλλά και γενικότερα του ηλεκτρονικού ελέγχου που αναπτύσσεται μέσα στη διαδικασία παραγωγής συστημάτων αυτοκινήτου. Καθορίζουν την εγκυρότητα και το βαθμό βελτιστοποίησης των τελικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του συστήματος, και κατ' επέκταση το βαθμό βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων του συστήματος αυτού στον πραγματικό κόσμο.

Συγκεκριμένα, στο τροποποιημένο από εμάς μοντέλο του *veDYNA* που χρησιμοποιείται στη διατριβή αυτή, βασίζεται, από θεωρητική άποψη, σε κανόνες της Φυσικής, διατυπώνοντας μηχανισμούς που προσεγγίζουν το φυσικό πρόβλημα της εργασίας αυτής. Αυτοί οι κανόνες της Φυσικής διατυπώνονται σε αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις που υλοποιεί το μοντέλο, έτσι ώστε να προβλεφτεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά και ο έλεγχος της ενεργητικής ανάρτησης που αναπτύσσεται στο μοντέλο.

Όλα όσα περιγράφονται στην παραπάνω παράγραφο, μας παρέχονται έτοιμα από το *veDYNA* σε ένα πλήρες μοντέλο αυτοκινήτου, το οποίο εμείς τροποποιούμε για να εγκαταστήσουμε τον ελεγκτή που βελτιώνει την ανάρτηση. Αυτή η τροποποίηση επέρχεται μέσω της δική μας συμμετοχής στο κομμάτι του “*Theoretical Modeling*”. Από μέρους μας, χρειάστηκε η μοντελοποίηση του συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιείται, η οποία μοντελοποίηση διαμορφώνεται με βάση ένα θεωρητικό υπόβαθρο και έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο που αναπτύσσουμε, ο οποίος εφαρμόζει ένα συγκεκριμένο κομμάτι της Θεωρίας Ελέγχου, κάτι το οποίο θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια.

Στη συνέχεια, έπειτα από αρκετές διορθώσεις και βελτιώσεις του μοντέλου που αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο, προχωράμε στη *Model in-the-Loop* προσομοίωση, απαραίτητη για τα περαιτέρω βήματα του *Model-Based Design*, και κατ' επέκταση για τη διάθεση ενός συστήματος κάποιας αυτοκινητοβιομηχανίας στην αγορά.

Κεφάλαιο 2 – Το περιβάλλον *veDYNA*

2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό εισχωρεί στο περιβάλλον *veDYNA*, ένα περιβάλλον το οποίο αποτελεί εργαλείο προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων. Στο περιβάλλον αυτό διαμορφώθηκε και εκτελέστηκε η προσομοίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Προσομοιώνεται το μοντέλο οχήματος του *veDYNA*, το οποίο μοντέλο τροποποιούμε αλλάζοντας το σύστημα της ανάρτησης στο μοντέλο αυτό. Αυτή η τροποποίηση επέρχεται έπειτα από τη σχεδιαστική και προγραμματιστική υλοποίηση συγκεκριμένης στρατηγικής ελέγχου, η οποία στρατηγική παρουσιάζεται στο 4^ο κεφάλαιο.

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί έναν βασικό οδηγό για τον αναγνώστη που έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με το περιβάλλον του *veDYNA*, καθώς περιέχει όλες τις βασικές πληροφορίες που είναι συγκεντρωμένες από μέρος του συνόλου των εγχειριδίων χρήσης του *veDYNA*.

Το κεφάλαιο αυτό λοιπόν αρχίζει παρέχοντας κάποιες γενικές πληροφορίες για το *veDYNA* στην ενότητα **2.2**, στην οποία γίνεται επίσης και μια γενική παρουσίαση των εφαρμογών του περιβάλλοντος αυτού στον πραγματικό κόσμο των αυτοκινήτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια γενική μορφή του περιβάλλοντος αυτού στην ενότητα **2.3**, στην οποία γίνεται η περιγραφή της βασικής δομής του περιβάλλοντος αυτού και προβάλλονται τα κύρια στοιχεία απ' τα οποία αποτελείται .

Τα κυρίαρχα στοιχεία του *veDYNA* είναι δυο: το μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο παρουσιάζεται και περιγράφεται στην ενότητα **2.4**, και η *Γραφική Διασύνδεση Χρήστη*, η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα **2.5**. Στην ενότητα 2.4 παρουσιάζεται η γενική ιδέα του μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά. Στην υποενότητα **2.5.1** παρουσιάζεται και περιγράφεται στον αναγνώ-

στη το κάθε τμήμα της *Γραφικής Διασύνδεσης Χρήστη* του *veDYNA*, και στη συνέχεια, στην υποενότητα **2.5.2**, προβάλλονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις που έγιναν για τις ανάγκες της εργασίας, οι οποίες ρυθμίσεις χωρίζονται σε δυο ξεχωριστά σύνολα ρυθμίσεων για δυο ξεχωριστές εφαρμογές, στις υποενότητες **2.5.2.1** και **2.5.2.2**.

2.2 Το *veDYNA* γενικά

Το *veDYNA* είναι ένα προϊόν της γερμανικής εταιρίας *TESIS DYNAware GmbH*, η οποία είναι μέλος του ομίλου εταιρειών *TESIS* που εδρεύει στο Μόναχο. Η τεχνογνωσία της *TESIS DYNAware* έχει εισχωρήσει από το 1992 στον τομέα της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Την τεχνογνωσία αυτή την έχουν χρησιμοποιήσει σε εφαρμογές τους αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες ανά τον κόσμο, και τμήματα ανάπτυξης των κατασκευαστών πρωτότυπου εξοπλισμού (*Original Equipment Manufacturers – OEM*) αυτοκινήτων.

Η ονομασία του *veDYNA* προέρχεται από τις λέξεις *vehicle dynamics analysis* (ανάλυση της δυναμικής του οχήματος), και έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες της οδήγησης ενός οχήματος. Πρόκειται για ένα περιβάλλον το οποίο είναι ιδανικό για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς και των δυναμικών συστημάτων όλων των ειδών των τροχοφόρων οχημάτων σε πραγματικό ή μη-πραγματικό χρόνο. Υποστηρίζει την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου οχημάτων από την τεχνική του *Model-Based Design* στον υπολογιστή, μέχρι και δοκιμές σε *Software-in-the-Loop (SiL)* και *Hardware-in-the-Loop* εφαρμογές. Το *veDYNA* βασίζει την υλοποίησή του στο *MATLAB*, μέσω του οποίου γίνεται η προσομοίωσή του, και στην περίπτωση μας, βασίζει την υλοποίησή του και στο *Simulink*, εργαλείο μέσω του οποίου γίνεται η μοντελοποίηση του οχήματος *veDYNA*.

Κάποιες από τις εφαρμογές του *veDYNA* στον κόσμο των αυτοκινήτων είναι οι εξής:

- Το περιβάλλον αυτό είχε ενσωματωθεί στους προσομοιωτές οδήγησης της *Audi* για να επιτρέψει στους οδηγούς να εξετάσουν τις συμπεριφορές οδήγησης διαφορετικών τύπων οχημάτων σε διάφορες διαδρομές
- Η *Ford* έχει χρησιμοποιήσει το περιβάλλον αυτό κατά τη διάρκεια της προεργασίας που απαιτείται για την ρύθμιση του *ESC (Electronic Stability Control – Ηλεκτρονικός Έλεγχος Ευστάθειας)*
- Η εταιρία κατασκευής συστημάτων πέδησης *Knott* έχει χρησιμοποιήσει το *veDYNA* για μελέτες σχεδιασμού, ανάπτυξης και λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρονικής σταθεροποίησης ρυμουλκούμενων οχημάτων (*trailer*).
- Η εταιρία *Magna Steyr* μέσω του περιβάλλοντος αυτού έχει ολοκληρώσει διαδικασίες παραμετροποίησης ελεγκτών της.
- Η *Bentley* έχει στηριχθεί στο *veDYNA* για τη διαδικασία της δοκιμής των δικτυωμένων συσκευών ελέγχου της.

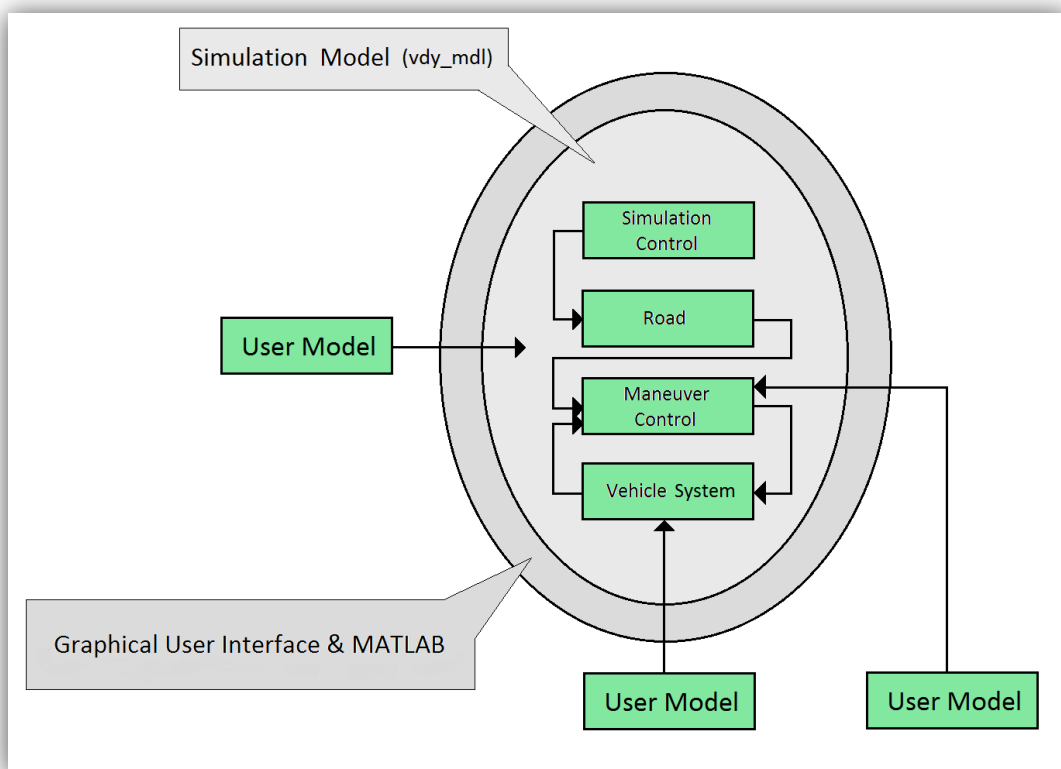
2.3 Γενική μορφή περιβάλλοντος

Στην **Εικόνα 2.1** παρουσιάζεται η γενική μορφή του περιβάλλοντος λογισμικού *veDYNA*, η οποία συντίθεται από:

- τη γενική μορφή του μοντέλου προσομοίωσής του, η οποία απεικονίζεται στο (ανοικτό γκρι) κομμάτι του σχήματος στο οποίο δίνεται το όνομα “*Simulation Model (vdy_mdl)*”. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα **2.4.2**.
- τα στοιχεία που πλαισιώνουν το μοντέλο αυτό στο σκούρο γκρι χώρο του σχήματος, και είναι τα “*Graphical User Interface & MATLAB*”, όπου το *Graphical User Interface* του *veDYNA* παρουσιάζεται στην ενότητα **2.5**. Το *MATLAB* εκτελεί τις ρυθμίσεις που καθορίζει ο χρήστης μέσω του *Graphical User Interface* με την εκτέλεση (από μεριάς *MATLAB*) των ανάλογων

συναρτήσεων του *veDYNA*, τα αρχεία στα οποία το *veDYNA* στηρίζει λειτουργίες του αλλά και την ίδια του την έναρξη είναι αρχεία MATLAB, και γενικότερα το *veDYNA* συνδέεται άμεσα και συνυπάρχει με το MATLAB, καθώς βασίζεται σε αυτό τη λειτουργία του.

Είναι λοιπόν φυσικό η γενική μορφή του μοντέλου, και κατ' επέκταση η γενική μορφή του περιβάλλοντος λογισμικού του *veDYNA*, να πλαισιώνεται γύρω από το MATLAB. Οι λόγοι για τους οποίους και το *Graphical User Interface* πλαισιώνει τα εσωτερικά στοιχεία που απεικονίζονται στην **Εικόνα 2.1** θα διευκρινιστούν μέσω της παρουσίασης του εργαλείου αυτού στην ενότητα 2.5.



Εικόνα 2.1 – Γενική μορφή περιβάλλοντος λογισμικού *veDYNA*

2.4 Μοντέλο προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης του *veDYNA* είναι ένα μοντέλο του *Simulink*. Το *Simulink*, που αναπτύχθηκε από την *MathWorks*, την εταιρία ανάπτυξης του *MATLAB*, είναι ένα εργαλείο καθορισμού της ροής δεδομένων σε απλά και πολυσύνθετα *δυναμικά συστήματα*, μέσω μιας γραφικής γλώσσας προγραμματισμού για τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση και την ανάλυση των συστημάτων αυτών. Με τον όρο *γραφική γλώσσα προγραμματισμού* εννοούμε τη γλώσσα προγραμματισμού κατά την οποία ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα πρόγραμμα καθορίζοντας τα στοιχεία του προγράμματος αυτού γραφικά, και όχι απαραίτητα μέσω κειμένου ενός πηγαίου κώδικα. Αυτά τα γραφικά στοιχεία συνθέτουν το *υπολογιστικό μοντέλο* το οποίο θα ορίσουμε παρακάτω. Κύριο σημείο διεπαφής του *Simulink* είναι ένα γραφικό εργαλείο δημιουργίας *λειτουργικών διαγραμμάτων* (*block diagrams*) και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες μπλοκ (*block libraries*). Το *Simulink* χρησιμοποιείται ευρέως στη *θεωρία ελέγχου* και την *ψηφιακή επεξεργασία σήματος* για τη διαδικασία της προσομοίωσης και τη μεθοδολογία *Model-Based Design*.

Πριν την παρουσίαση και την ανάλυση του μοντέλου *Simulink* του *veDYNA*, είναι χρήσιμο να δοθεί ένας γενικός ορισμός των μοντέλων που χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές για τη μετέπειτα προσομοίωσή τους, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο λόγος για τον οποίο εφαρμόζεται αυτή η μοντελοποίηση ενός φυσικού συστήματος σε κάποιο περιβάλλον λογισμικού.

Υπολογιστικό Μοντέλο, στη γλώσσα των υπολογιστών (*computer model* ή *computational model*), είναι μία αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος, ενός φυσικού φαινομένου, ή και γενικότερα, μίας ιδέας. Ένας εναλλακτικός ορισμός μπορεί να καταστήσει το μοντέλο ως ένα σύνολο πληροφοριών ενός συστήματος που έχει συγκεντρωθεί με σκοπό τη μελέτη του συστήματος. Το μοντέλο ενός συστήματος θα πρέπει να αντιπροσωπεύει το σύστημα όσο πιο πιστά γίνεται, έτσι ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από τη μελέτη του μοντέλου να αντιστοιχούν σε συμπεράσματα για το σύστημα.

Η μελέτη των συστημάτων αρκετές φορές δε γίνεται με αυτό καθεαυτό το σύστημα, αλλά με ένα μοντέλο του συστήματος. Κάποιοι από τους λόγους για την κα-

τασκευή ενός μοντέλου είναι η διευκόλυνση στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, είναι το γεγονός ότι αποτελεί ένα εργαλείο πρόβλεψης της λειτουργίας του συστήματος (αν λάβουμε υπόψη ότι ορισμένα συστήματα παρουσιάζουν πολύ αργές μεταβολές της κατάστασής τους, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για ένα μακρύ χρονικό διάστημα. Επομένως, με ένα μοντέλο του συστήματος πετυχαίνουμε επιτάχυνση των χρονικών μεταβολών για την επερχόμενη πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του πραγματικού συστήματος), είναι η αδυναμία πρόσβασης στο σύστημα (αφού κάποιες φορές η πρόσβαση στο πραγματικό σύστημα είναι αδύνατη ή επικίνδυνη), και ένας ακόμη λόγος για την κατασκευή ενός μοντέλου είναι ο αποτελεσματικός σχεδιασμός του μοντέλου (διότι η μοντελοποίηση του συστήματος επιτρέπει τον εντοπισμό σχεδιαστικών σφαλμάτων και τη διόρθωσή τους πριν το σύστημα κατασκευασθεί, αλλά και ανεύρεση εναλλακτικών λύσεων και βελτιστοποίηση αφού κατασκευαστεί).

Ακόμα, η βελτίωση της απόδοσης υπάρχοντος συστήματος θα πρέπει να θεωρείται δεδομένη, αφού με την κατασκευή ενός μοντέλου είναι δυνατό να ελεγχθεί η συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες τιμές των παραμέτρων του. Από τη μελέτη του μοντέλου που έχει κατασκευασθεί διαπιστώνεται ο αποδοτικότερος συνδυασμός παραμέτρων, και στη συνέχεια, αυτές οι παράμετροι εφαρμόζονται στο πραγματικό σύστημα, όπως είδαμε και στην περίπτωση του *Model-Based Design*, στην τεχνική που υιοθετούν πλέον πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες για την παραγωγή ενός συστήματος αυτοκινήτου.

2.4.1 Γενική ιδέα του μοντέλου

Στην περίπτωσή μας, το μοντέλο του *veDYNA* το οποίο υλοποιείται στο *Simulink*, χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση και τη μετέπειτα προσομοίωση του φυσικού συστήματος του αυτοκινήτου (ελεγχόμενο σύστημα), το οποίο αλληλεπιδρά άμεσα με τον ελεγκτή της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκινήτου. Οι επόμενες

παράγραφοι της ενότητας αυτής αναλύουν τα στοιχεία της γενικής ιδέας και απεικόνισης του μοντέλου προσομοίωσης του *veDYNA* που προβάλλεται στην **Εικόνα 2.1**.

Το *Simulation Model* αρχικά σημαίνει ότι το κομμάτι αυτό του σχήματος αποτελεί το μοντέλο προσομοίωσης του *veDYNA*, το οποίο υπάρχει μέσα στο μπλοκ “*vdy_md1*”, και περιλαμβάνει τα κύρια και βασικά μέρη του συνόλου των στοιχείων απ’ τα οποία αποτελείται το ολοκληρωμένο μοντέλο του *veDYNA*. Τα μέρη αυτά είναι τα μπλοκ “*Simulation Control*” μέσω του οποίου γίνεται η αρχικοποίηση του μοντέλου, το μπλοκ “*Road*” μέσω του οποίου γίνεται η αρχικοποίηση του δρόμου πάνω στον οποίο βρίσκεται το όχημα, και το μπλοκ “*Maneuver Control*” που περιέχει τα στοιχεία που χρειάζονται για την εκτέλεση των ελιγμών του οχήματος. Τα παραπάνω θα αναλυθούν στην παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης του *veDYNA* στην ενότητα 2.4.2 και θα επεκταθούν πέρα απ’ την παρουσίαση της γενικής ιδέας της υποενότητας αυτής.

Τα *User Model* του σχήματος είναι μοντέλα του χρήστη μέσω των οποίων μπορεί να παρέμβει στο έτοιμο μοντέλο του *veDYNA* προκειμένου να επεκτείνει τις δυνατότητές του μοντέλου αυτού, ή προκειμένου να αλλάξει το μοντέλο σύμφωνα με την εφαρμογή που θέλει να υλοποιήσει ο χρήστης. Ο χρήστης μπορεί να παρέμβει στο μοντέλο μέσω του εσωτερικού περιεχομένου του μπλοκ “*vdy_md1*” (που απεικονίζεται με τον χώρο του σχήματος στον οποίο δίνεται το όνομα *Simulation Model* (*vdy_md1*)), δηλαδή μέσω του *User Model* που βρίσκεται αριστερά του σχήματος (όπως για παράδειγμα το μοντέλο-παράδειγμα του *veDYNA* *veDYNA_extern_flat_tyre*), μπορεί να παρέμβει στο εσωτερικό του *Maneuver Control* μέσω του *User Model* που απεικονίζεται χαμηλά και δεξιά στο σχήμα, και τέλος, μέσω του εσωτερικού περιεχομένου του *Vehicle System*, δηλαδή μέσω του *User Model* που βρίσκεται χαμηλά και αριστερά στο σχήμα.

Στην περίπτωση μας, όπως και σε όλα τα μοντέλα-παραδείγματα που παρέχει το *veDYNA* με την εγκατάστασή του, εκτός του “*veDYNA_extern_flat_tyre*”, η τροποποίηση του μοντέλου του οχήματος που πραγματοποιείται βάσει της ενεργητικής ανάρτησης που εξετάζεται σ’ αυτή την εργασία, γίνεται βάσει του *User Model* που βρίσκεται χαμηλά και αριστερά στο σχήμα, δηλαδή στο εσωτερικό του “*Vehicle System*”. Αυτό γίνεται για τον απλό λόγο ότι η ανάρτηση είναι μέρος του συστήματος

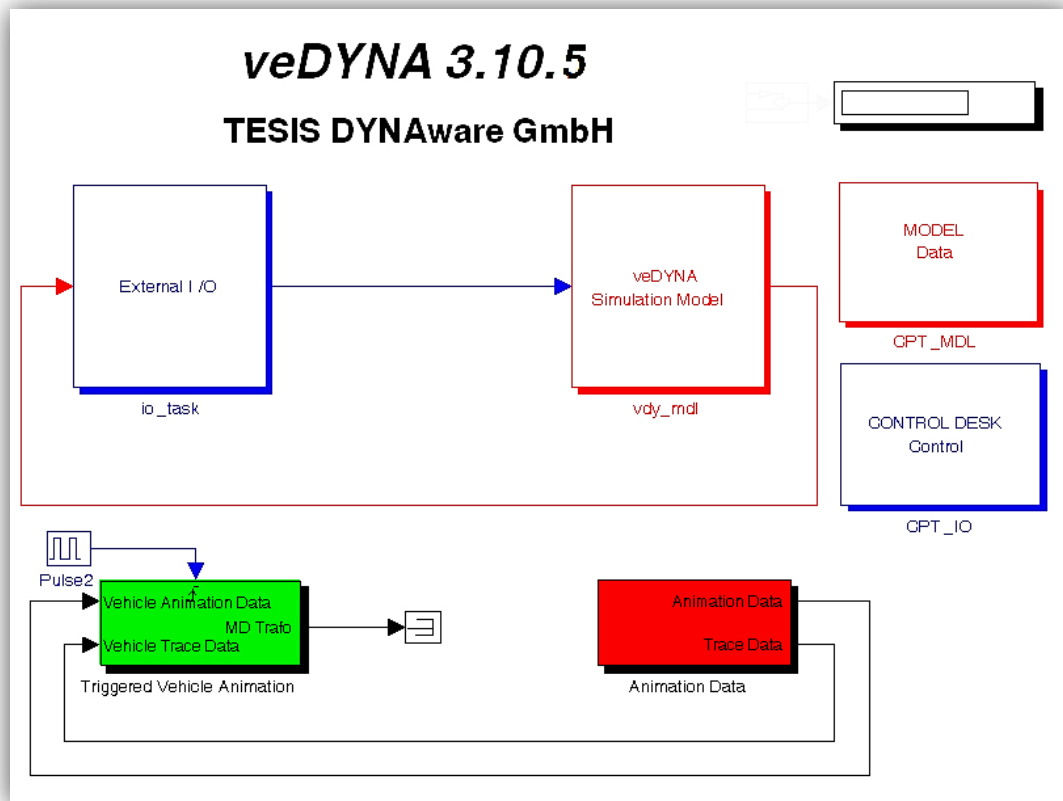
του αυτοκινήτου, και συγκεκριμένα του πλαισίου (*Chassis*). Ειδικότερα, γίνεται τροποποίηση του μοντέλου “*veDYNA_extern_susp*”, όπου το τροποποιημένο πλέον μοντέλο περιλαμβάνει ένα ξεχωριστό μπλοκ στο εσωτερικό του “*Vehicle System*”, το οποίο μπλοκ περιέχει τα στοιχεία της ενεργητικής (εξωτερικής-*extern*) ανάρτησης που μελετάμε, και τις συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων αυτών.

2.4.2 Περιγραφή του μοντέλου

Στην **Εικόνα 2.2** παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του *veDYNA*. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται ένας “*high-level*” σχεδιασμός (*high-level design*) ο οποίος παρέχει μια επισκόπηση ολόκληρου του μοντέλου του *veDYNA*, προσδιορίζοντας αυτός ο σχεδιασμός τα κύρια και τα δευτερεύοντα στοιχεία του μοντέλου αυτού, καθώς υπάρχει στο σχεδιασμό αυτό ένα επίπεδο αφαίρεσης (*abstraction*). Είναι η αρχική βαθμίδα του μοντέλου στην ιεραρχία των στοιχείων του.

Για διευκόλυνση, χωρίζουμε αυτό το σχεδιασμό σε τρεις κατηγορίες: την κατηγορία με τα κύρια στοιχεία του μοντέλου, την κατηγορία με τα δευτερεύοντα στοιχεία του μοντέλου, και το κομμάτι με τα μπλοκ για το μέρος του *Animation*. Το μοντέλο αυτό λοιπόν αποτελείται από:

- Οι οντότητες *veDYNA Simulation Model* (*vdy_md1*) και *External I/O* (*io_task*) τα οποία αποτελούν τα κύρια στοιχεία του μοντέλου. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στην υποενότητα **2.4.2.1**, με την οντότητα *veDYNA Simulation Model* να παρουσιάζεται αναλυτικά στην υποενότητα **2.4.2.1.1**.
- Οι οντότητες *Model Data* (*CPT_MDL*), *CONTROL DESK Control* (*CPT_IO*), με τα blocks αυτά να είναι δευτερεύοντα στοιχεία του μοντέλου, οι οποίες περιγράφονται στην υποενότητα **2.4.2.2**.
- Οι οντότητες *Triggered Vehicle Animation* και *Animation Data*, τα οποία αφορούν το κομμάτι του *Animation*, οι οποίες περιγράφονται στην υποενότητα **2.4.2.3**.



Εικόνα 2.2 – Μοντέλο προσομοίωσης *veDYNA* (high-level design)

2.4.2.1 Οι οντότητες *vdy_mdl* και *io_task*

Η οντότητα *veDYNA Simulation Model* (*vdy_mdl*) είναι η βάση του περιβάλλοντος του *veDYNA*, καθώς ολόκληρος ο σχεδιασμός του μοντέλου προσομοίωσης του *veDYNA* υπάρχει στο εσωτερικό του μπλοκ αυτού. Το μπλοκ *External I/O* (*io_task*) (*External Input/Output*) περιέχει προκαθορισμένες *I/O* διεπαφές και διασυνδεδεμένα στοιχεία για υδραυλικά συστήματα πέδησης του αυτοκινήτου ή και του φορτηγού, όπως επίσης και για εισόδους από τον κινητήρα. Τα *vdy_mdl* και *io_task* συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο κατά τον οποίο η είσοδος του ενός μπλοκ είναι η έξοδος του άλλου, αντιπροσωπεύοντας ένα σύστημα με βρόχο θετικής ανάδρασης.

Συγκεκριμένα, έχουμε ροή δεδομένων μεταξύ τους μέσω των ports *Output to I/O* και *Input from I/O* που υπάρχουν σε υποσύστημα του μπλοκ *veDYNA Simulation Model*.

2.4.2.1.1 Το εσωτερικό της οντότητας *vdyn_md*

Μετά την παρουσίαση της αρχικής βαθμίδας του μοντέλου στην ιεραρχία των στοιχείων του, σειρά έχει η παρουσίαση του μπλοκ *veDYNA Simulation Model* (*vdyn_md*), το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του περιβάλλοντος του *veDYNA*, καθώς στο εσωτερικό του μπλοκ αυτού υπάρχουν τα θεμελιώδη συστατικά του μοντέλου προσομοίωσης. Το εσωτερικό αυτό προβάλλεται στην **Εικόνα 2.3**.

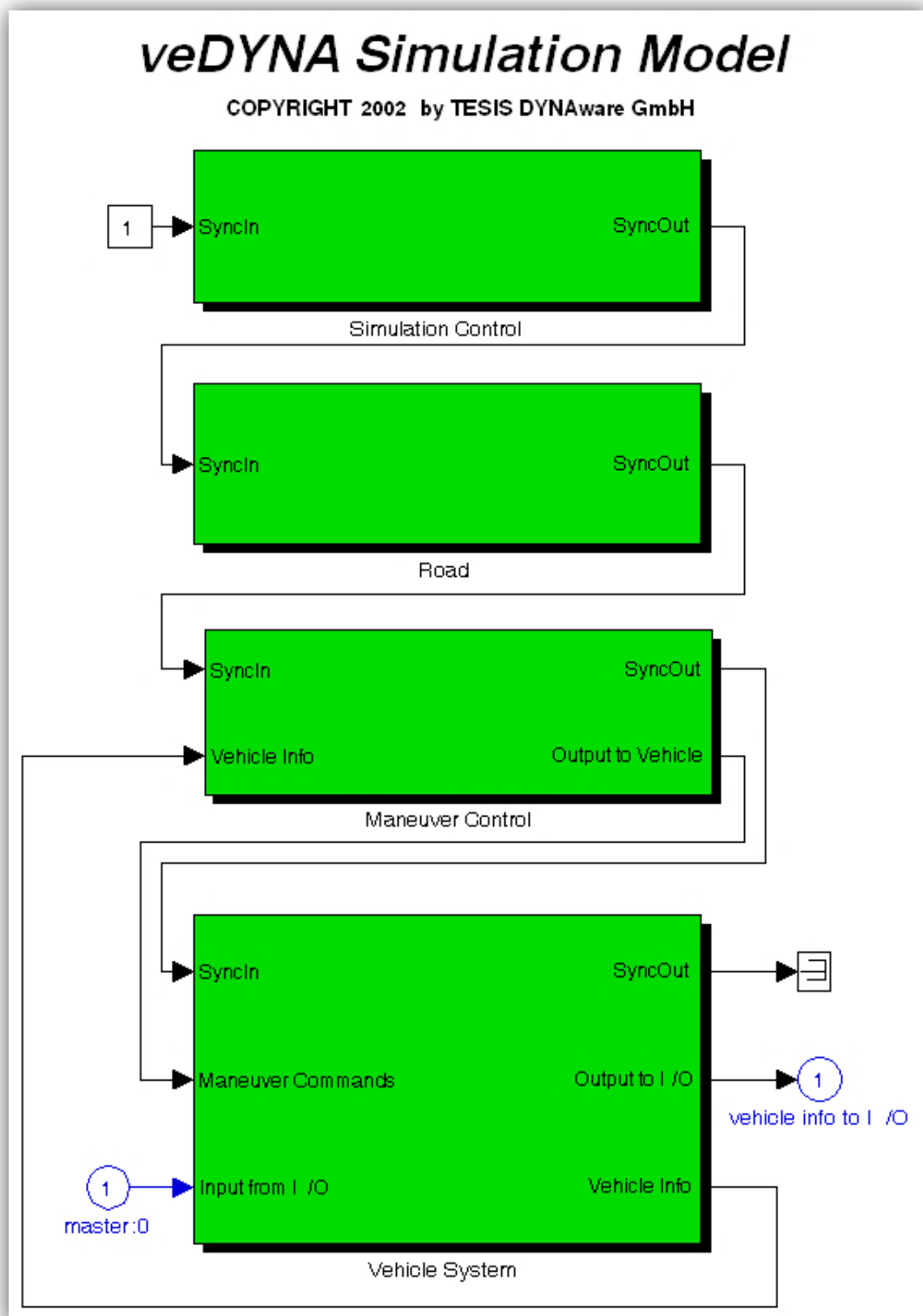
Πριν την περιγραφή των στοιχείων του *veDYNA Simulation Model*, αναφέρονται κάποια κύρια χαρακτηριστικά του μπλοκ αυτού.

Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί ότι τα μπλοκ *Maneuver Control* και *Vehicle System* είναι αυτά που έχουν δομή πολλών επιπέδων λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων αυτών, ενώ τα υπόλοιπα έχουν αρκετά πιο απλή δομή. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει αυτά τα συστήματα, ή να συμπεριλάβει τμήματα του μοντέλου ορισμένα από αυτόν (*user-defined*). Αυτή η τροποποίηση του χρήστη περιγράφεται αναλυτικότερα και στην ενότητα **2.4.1** στο κομμάτι του *User Model*.

Επίσης, κάθε μπλοκ και υποσύστημα του *veDYNA Simulation Model* έχει εισόδους και εξόδους τα σήματα *SyncIn* και *SyncOut*. Τα σήματα αυτά δεν έχουν κάποια ιδιαίτερη λειτουργικότητα, αφού το ένα σήμα συνδέει απλά το άλλο, και μέσω της σύνδεσης αυτής διαδίδεται η σταθερή τιμή “1” του *SyncIn* από το *Simulation Control* στα *SyncIn* και *SyncOut* όλων των υποσυστημάτων του *Vehicle System*. Αυτό γίνεται για την σύνδεση των αντίστοιχων μπλοκ στα οποία υπάρχει αυτή η σύνδεση, και κατ’ επέκταση για την επικοινωνία και το συγχρονισμό λειτουργίας (κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης) των μπλοκ και των υποσυστημάτων τους που πρέπει συνδέονται για το σκοπό αυτό.

Επιπροσθέτως, τα κύρια συστατικά του μοντέλου (*Simulation Control*, *Road*, *Maneuver Control*, *Vehicle*) υπάρχουν στο μοντέλο *Simulink* ως *S-functions*. Οι *S-*

functions αποτελούν έναν μηχανισμό για την επέκταση των δυνατοτήτων του περιβάλλοντος *Simulink*, και *S-function* είναι μια γλώσσα περιγραφής ενός block του *Simulink*, γραμμένη στη γλώσσα προγραμματισμού του MATLAB, αλλά και στη C/C++. Εισχωρούν στο *Simulink* μέσω των αντίστοιχων *S-function* μπλοκ της βιβλιοθήκης *User-Defined Functions*.



Εικόνα 2.3 – Η δομή του μπλοκ vdy_mdl

Στην **Εικόνα 2.3** λοιπόν, παρατηρείται ότι το μοντέλο προσομοίωσης χωρίζεται σε υποσυστήματα για:

- Τον έλεγχο της προσομοίωσης (*Simulation Control*). Αυτό το μπλοκ βασίζει τη λειτουργία του σε μια *S-function* (*vdy_simctrl*) η οποία αρχικοποιεί το μοντέλο και τα υποσυστήματά του, όπως και τον μηχανισμό των *trace*. Το μπλοκ αυτό δε πρέπει να τροποποιηθεί από το χρήστη (εκτός της περίπτωσης ανάγκης ύπαρξης ενός *online reset* του μοντέλου σε περίπτωση *onboard* εφαρμογής).
- Το δρόμο (*Road*). Αυτό το μπλοκ εμπεριέχει μια *S-function* (*vdy_road*) για την αρχικοποίηση του δρόμου και την παροχή δεδομένων του δρόμου, (η οποία γίνεται με βάση τον ορισμό του δρόμου από το χρήστη στο πεδίο *Road* του κεντρικού GUI) τόσο στο ίδιο το μπλοκ του δρόμου όσο και στο μπλοκ του ελέγχου των ελιγμών. Το μπλοκ αυτό δε πρέπει να τροποποιηθεί από το χρήστη.
- Τον έλεγχο των ελιγμών (*Maneuver Control*) και το όχημα (*Vehicle*). Αυτά τα δυο συστήματα συμπεριλήφθηκαν στην ίδια κατηγορία λόγω του ότι αλληλοσυνδέονται και αλληλοεπηρεάζονται. Στις ακόλουθες υποενότητες **2.4.2.1.2** και **2.4.2.1.3** περιγράφονται οι οντότητες των συστημάτων αυτών αλλά και η σύνδεσή τους.

2.4.2.1.2 Η οντότητα *Maneuver Control*

Η είσοδος *Vehicle Info* του *Maneuver Control* λαμβάνει δεδομένα σε μορφή διανύσματος, με το διάνυσμα αυτό να έχει χωρητικότητα 66 θέσεων, όπου στις θέσεις αυτές υπάρχει πληροφορία από όλα τα μέρη του συστήματος του οχήματος. Τα δε-

δομένα αυτά αποτελούν την έξοδο του συστήματος του οχήματος, και το σήμα με τα δεδομένα αυτά συνδέεται με την είσοδο του *Maneuver Control*.

Το *Maneuver Control* περιέχει όλες τις απαραίτητες *S-functions* για την πραγματοποίηση ενός ελιγμού, επομένως είναι προφανές ότι το μπλοκ αυτό χρειάζεται την πληροφορία για την κατάσταση του οχήματος, προκειμένου το *Maneuver Control* να πραγματοποιήσει τον ελιγμό από την κατάσταση αυτή, έναν ελιγμό που έχει καθορίσει ο χρήστης στα αντίστοιχα πεδία του κεντρικού GUI. Σημειώνεται επίσης ότι η *S-function* του δρόμου παρέχει και την πληροφορία του δρόμου στο *Maneuver Control*, απαραίτητη πληροφορία μαζί με την κατάσταση του οχήματος προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο ελιγμός.

Η έξοδος *Output to Vehicle* του *Maneuver Control* περιέχει την πληροφορία που θα πρέπει να εισέρχεται στο σύστημα του οχήματος μετά τον εκάστοτε ελιγμό, και είναι πληροφορία που περιέχει, εκτός των άλλων, και την πληροφορία της κατάστασης των βασικών οργάνων οδήγησης, έπειτα από τον ελιγμό και τον έλεγχό τους από τον οδηγό. Είναι ένα σήμα το οποίο συνδέεται στην είσοδο του *Vehicle System*, όπου αυτό το σήμα ονομάζεται *Maneuver Commands* (εντολές του ελιγμού), και του οποίου τα δεδομένα είναι σε μορφή διάνυσματος, με το διάνυσμα αυτό να έχει χωρητικότητα 18 θέσεων, και περιέχει πληροφορία για τη θέση του πεντάλ του φρένου, τη θέση του πεντάλ επιτάχυνσης, τη θέση του πεντάλ του συμπλέκτη, τη γωνία στρέψης του τιμονιού, κ.ά..

Έτσι, μετά τον ελιγμό και τις εντολές που δίνει στο σύστημα του οχήματος μέσω των πεντάλ και του τιμονιού, το όχημα βρίσκεται σε νέα κατάσταση και θέση, η οποία εξαρτάται κυρίως από τον ελιγμό, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του οχήματος και του οδοστρώματος. Με βάση τη νέα αυτή θέση, πραγματοποιείται εκ νέου ο ελιγμός που έχει καθορίσει ο χρήστης, και ούτω καθεξής. Τα παραπάνω βήματα εκτελούνται σε επανάληψη έως ότου τελειώσει η προσομοίωση του χρήστη.

2.4.2.1.3 Η οντότητα *Vehicle System*

Το μπλοκ *Vehicle System* αντιπροσωπεύει το πολυσύνθετο σύστημα οχήματος. Διαιρείται στα μέρη απ' τα οποία αποτελείται στον πραγματικό κόσμο, με τα βασικά αυτά μέρη να είναι: το πλαίσιο (ή αλλιώς “σασί”), ο κινητήρας, οι τροχοί, τα φρένα, και το *driveline* (σύστημα μετάδοσης κίνησης στους τροχούς του οχήματος το οποίο συνδέει τον κινητήρα και το κιβώτιο ταχυτήτων με τους άξονες των τροχών).

Το κάθε μέρος από αυτά υπάρχει στο μοντέλο έχοντας δομή πολλών επιπέδων, σύμφωνα με τη φυσική και την τεχνική τους σύνθεση. Ξεχωριστές *S-functions* για το κάθε μέρος, με ειδικές παραμέτρους εισόδου και εξόδου περιγράφουν τα μέρη αυτά. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις παραμέτρους του μοντέλου του οχήματος στο αντίστοιχο πλαίσιο του οχήματος του κεντρικού GUI, όπως επίσης και το είδος του οχήματος ανάμεσα στα *limousine*, *truck*, *van*, των οποίων τη συμπεριφορά μπορεί να προσομοιώσει αυτό το μοντέλο του οχήματος. Το ίδιο λοιπόν μοντέλο του *Vehicle System* είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να εφαρμόζεται και για τις τρεις αυτές κατηγορίες οχημάτων.

Η μοντελοποίηση η οποία εφαρμόστηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εφαρμόστηκε στο εσωτερικό του συστήματος *Vehicle System*. Η τροποποίηση αυτού του συστήματος, η οποία έγινε μέσω του σχεδιασμού της στρατηγικής ελέγχου υπό την οποία λειτουργεί η τροποποιημένη ανάρτησή μας, θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί στο 4^ο κεφάλαιο, και συγκεκριμένα στην υποενότητα **4.5.1**. Στην **Εικόνα 4.4** απεικονίζεται το εσωτερικό της οντότητας *Vehicle System*, στο οποίο υπάρχει το σύστημα *veDYNA Vehicle Subsystem*, και το εξωτερικό μοντέλο της ανάρτησης, στο οποίο μοντέλο εφαρμόζεται σχεδιαστικά ο αλγόριθμος ελέγχου μας.

2.4.2.2 Οι οντότητες *CPT_MDL* και *CPT_IO*

Τα μπλοκ αυτά περιέχουν εξωτερικές παραμέτρους του μοντέλου, με το μπλοκ *Model Data (CPT_MDL)*, να είναι μια διεπαφή η οποία επιτρέπει τον καθορισμό εξω-

τερικών παραμέτρων, και τον καθορισμό των αντίστοιχων προελεύσεων των δεδομένων. Τυπικές εφαρμογές για τη χρήση των εξωτερικών παραμέτρων του μοντέλου είναι η είσοδος στοιχείων που μπορεί να καθορίσει ο οδηγός (είσοδος καθορισμένων γωνιών τιμονιού και/ή θέσεων πεντάλ γκαζιού κατά τη διάρκεια της οδήγησης) μέσω διαδραστικών εργαλείων προσομοίωσης ή από ένα εξωτερικό προσομοιωτή οδήγησης, ο ορισμός ενός προφίλ ταχύτητας, κ.ά.. Ακόμα, το *CONTROL DESK Control (CPT_IO)*, περιέχει τις *I/O* μεταβλητές που μπορεί να ορίσει ο χρήστης.

2.4.2.3 Οι οντότητες *Triggered Vehicle Animation* και *Animation Data*


“*Animation*” είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται από το *veDYNA* για την τρισδιάστατη απεικόνιση της προσομοίωσης, η οποία απεικόνιση γίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτής. Στην απεικόνιση αυτή το όχημα υπάρχει ως ένα κινούμενο τρισδιάστατο αντικείμενο, το οποίο περιβάλλουν στατικά αντικείμενα τα οποία συνθέτουν τον τρισδιάστατο κόσμο στον οποίο οδηγείται το όχημα. Το μπλοκ *Animation Data* περιέχει τα δεδομένα του *animation (Animation Data)*, τα οποία στέλνονται στο *Triggered Vehicle Animation* και συγκεκριμένα στο *Vehicle Animation Data* για να υπολογιστούν οι πραγματικές εισοδοί του *animation* για το *DYNAanimation* προκειμένου να χρησιμοποιηθούν απ’ το εργαλείο αυτό. Επίσης, το μπλοκ *Animation Data* περιέχει και τα δεδομένα *trace (Trace Data)*, τα οποία στέλνονται και αυτά στο *Triggered Vehicle Animation* και συγκεκριμένα στο *Vehicle Trace Data*. Τα *trace* δεδομένα είναι τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των καταστάσεων του οχήματος, και στέλνονται στο *Triggered Vehicle Animation* προκειμένου να απεικονιστούν στο *DYNAanimation* με τη μορφή ταχύμετρων, στροφόμετρων, διαγραμμάτων, και λοιπών γραφικών απεικονίσεων στο παράθυρο του εργαλείου αυτού.

2.5 Γραφική διασύνδεση χρήστη (GUI)

Η *Γραφική Διασύνδεση Χρήστη* (*Graphical User Interface - GUI*) του *veDYNA* είναι ένα εργαλείο όπου συντίθεται από ένα σύνολο γραφικών στοιχείων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση του χρήστη με ολόκληρη τη διαδικασία προσομοίωσης που λαμβάνει χώρα στο περιβάλλον του *veDYNA*. Το GUI του *veDYNA* παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει δεδομένα, να ρυθμίσει και να καθορίσει ότι χρειάζεται για τη διαδικασία της προσομοίωσής του, να προκαθορίσει διάφορες παραμέτρους της προσομοίωσης πριν αυτή ξεκινήσει, αλλά και να καθορίσει τις τιμές των δεδομένων που εισέρχονται στο μοντέλο, και που χρησιμοποιεί το μοντέλο το οποίο προσομοιώνει. Όλα αυτά γίνονται μέσω ειδικών γραφικών απεικονίσεων, ενδείξεων και εργαλείων.

2.5.1 Παρουσίαση και περιγραφή

Το κύριο παράθυρο του GUI μέσω του οποίου εκτελείται η προσομοίωση του *veDYNA* με βάση τις κύριες ρυθμίσεις του χρήστη που αφορούν την προσομοίωση αυτή και που λαμβάνουν χώρα στο παράθυρο αυτό, και μέσω του οποίου προβάλλονται τα επιπρόσθετα γραφικά στοιχεία του συνόλου του GUI, απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.9**, με τις αρχικές και προεπιλεγμένες του ρυθμίσεις.

Στα εικονίδια  που βλέπουμε σε αυτό το GUI, τα δυο πρώτα (απ' τα αριστερά) έχουν την ίδια χρήση, η οποία γίνεται με διαφορετικό τρόπο. Το πρώτο εικονίδιο ανοίγει τον κώδικα του .m αρχείου που ορίζει τα δεδομένα που δίδονται στο εκάστοτε πεδίο του GUI το οποίο ανοίγει το δεύτερο εικονίδιο που βρίσκεται στα δεξιά του, σε κάθε μέρος του κεντρικού GUI όπου εμφανίζονται τα δυο αυτά εικονίδια. Έτσι, μέσω αριθμητικών τιμών που δίδονται σε μεταβλητές του *veDYNA* στον κώδικα των .m αρχείων, το δεύτερο εικονίδιο ανοίγει το GUI με τις τιμές των δεδομένων που υπάρχουν σε αυτά τα .m αρχεία, τις οποίες τιμές μπορεί φυσικά να αλλάξει ο χρήστης στο εκάστοτε πεδίο τιμών δεδομένων του GUI που ανοίγεται με το

εικονίδιο αυτό. Για τον καθορισμό των δεδομένων αυτών είναι ευκολότερο ο χρήστης να χρησιμοποιεί το δεύτερο εικονίδιο, αφού δίδεται κάποιο χαρακτηριστικό όνομα το οποίο περιγράφει την κάθε μεταβλητή τις οποίας την τιμή επιθυμεί να αλλάξει ο χρήστης, αντί για το πρώτο εικονίδιο που οδηγεί σε κώδικα στον οποίο οι μεταβλητές του *veDYNA* δε φέρουν κάποιο χαρακτηριστικό όνομα για τη μεταβλητή αυτή. Έτσι, μέσω του GUI που ανοίγει το δεύτερο εικονίδιο, αποθηκεύονται και ενημερώνονται οι τιμές των μεταβλητών που υπάρχουν σε αυτά τα .m αρχεία.

Σημειώνεται επίσης ότι το πρώτο εικονίδιο της παραπάνω τετράδας εικονιδίων, βρίσκεται και στο πλαίσιο *User Procedure*. Στο πλαίσιο αυτό ανοίγει το αρχείο της διαδικασίας χρήστη που έχει επιλεγθεί στο διπλανό πεδίο, για περαιτέρω επεξεργασία. Τα υπόλοιπα δυο εικονίδια χρησιμοποιούνται για το άνοιγμα του ανάλογου *pdf / manual* που υπάρχει στο ανάλογο *directory* των αρχείων του *veDYNA*, και το τελευταίο χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των δεδομένων που αναφέρθηκαν πριν, προτού προχωρήσει ο χρήστης στην προσομοίωση.

Τα βασικά στοιχεία του κεντρικού GUI χωρίζονται και παρουσιάζονται στις ακόλουθες υποενότητες (με σειρά εμφάνισης από την κορυφή του παραθύρου μέχρι χαμηλά στο τέλος του παραθύρου).

2.5.1.1 Γραμμή μενού

Η *Γραμμή Μενού (Menu Bar)* περιλαμβάνει τη δυνατότητα διάφορων ρυθμίσεων, τη δυνατότητα εισαγωγής διάφορων δεδομένων και μετατροπής τους σε συμβατή με το *veDYNA* μορφή, καθώς και εκτελέσεις πρόσθετων εργαλείων.

Στην περίπτωση μας, τη χρησιμοποιήσαμε για την εισαγωγή και τη μετατροπή των δεδομένων του δρόμου. Θα περιγραφεί το βήμα αυτό στις επόμενες σελίδες, στις σχετικές ρυθμίσεις του GUI για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του αυτοκινήτου το οποίο βρίσκεται πάνω σε δρόμο ο οποίος καθορίζεται από συγκεκριμένη και προκαθορισμένη πίστα.

2.5.1.2 Γραμμή εργαλείων

Η *Γραμμή Εργαλείων (Toolbar)* δεν προσδίδει επιπλέον δυνατότητες στη λίστα δυνατοτήτων του GUI, αποτελεί όμως διευκόλυνση για το χρήστη αφού περιέχει εικονίδια τα οποία είναι συντομεύσεις σε βασικές λειτουργίες στις οποίες μπορούμε να έχουμε πρόσβαση και μέσω της γραμμής μενού, όμως η πρόσβασή τους μέσω της γραμμής εργαλείων καθίσταται άμεση.

2.5.1.3 Πλαίσιο καθορισμού μοντέλου και πλατφόρμας

Στο πλαίσιο καθορισμού *Μοντέλου και Πλατφόρμας (Model and Platform)*, γίνεται η επιλογή του μοντέλου που επιθυμεί ο χρήστης να προσομοιώσει, όπως επίσης και ο καθορισμός των χρόνων προσομοίωσης, και της πλατφόρμας στην οποία γίνεται η προσομοίωση.

Στην περίπτωση μας, (και σαν προεπιλογή) ισχύει η πλατφόρμα “*Off-Board Simulink*”, κάτι το οποίο σημαίνει ότι το *veDYNA* εκτελείται αποκλειστικά στο περιβάλλον *Simulink* του MATLAB, επιτρέποντας τροποποιήσεις του μοντέλου που προσομοιώνεται, καθώς και εξωτερική παροχή δεδομένων.


Μία από τις άλλες δυο επιλογές που υπάρχουν με βάση το license που έχουμε, είναι η επιλογή “*Off-Board RTW Executable*”, όπου η προσομοίωση σ’ αυτή την περίπτωση γίνεται με σκοπό τη βελτίωση του υπολογιστικού χρόνου (*computational time*) της προηγούμενης περίπτωσης. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας ένα εκτελέσιμο αρχείο των Windows, το οποίο δημιουργείται με το “*Rapid Simulation Target*” (*RSIM*) του πρόσθετου εργαλείου “*Real-Time Workshop*” (*RTW*) του MATLAB. Με το δικό μας license *επιτρέπεται* η παραγωγή του εκτελέσιμου αρχείου από το μοντέλο *Simulink* του χρήστη, με την προϋπόθεση ότι το *Real-Time Workshop* έχει εγκατασταθεί. Η επιλογή “*Pass MATLAB Workspace to RTW Executable*” είναι διαθέσιμη μόνο σ’ αυτή την περίπτωση, και εάν είναι ενεργοποιημένη, τότε είναι ενεργοποιημένο το πέρασμα παραμέτρων του μοντέλου του *Simulink* στο off-board

εκτελέσιμο χωρίς το “*re-compilation*” του μοντέλου. Η λειτουργία αυτή είναι σχετικά χρονοβόρα, γι' αυτό είναι ανενεργή από προεπιλογή η επιλογή αυτή.

Η άλλη πλατφόρμα πάνω στην οποία μας δίνεται η δυνατότητα να προσομοιώσουμε το μοντέλο μας είναι η “*xPC On-Board*”. “On-Board” προσομοίωση είναι η προσομοίωση στην οποία χρησιμοποιείται υλικό πραγματικού χρόνου (*real-time hardware*), με σκοπό το 100% της *real-time* προσομοίωσης, την ενσωμάτωση υλικού σ' αυτήν (HiL), και την ευελιξία της, αφού επιτρέπει περισσότερες εξωτερικές εισόδους. Η υποστηριζόμενη *real-time* πλατφόρμα, με βάση το license που είναι στην κατοχή μας, είναι η “*xPC Target*” της *Mathworks*. Τέλος, η επιλογή “*Initial Conditions*” επιτρέπει στο χρήστη να διαλέξει ανάμεσα σε σύνολα καταστάσεων του οχήματος που μπορεί να ο ίδιος να παράγει, για πλήρως δυναμικές αρχικές καταστάσεις του οχήματος. Δεν εφαρμόζεται στην περίπτωσή μας.

2.5.1.4 Πλαίσιο καθορισμού οχήματος

Στο πλαίσιο καθορισμού *Οχήματος (Vehicle)* καθορίζονται τα δεδομένα του επιθυμεί ο χρήστης να εφαρμοστούν στο μοντέλο του οχήματος, όπως επίσης και ο τύπος του οχήματος. Τα δεδομένα αυτά υφίστανται ως *.mat* αρχεία δεδομένων του MATLAB, τα οποία υπάρχουν στον υποφάκελο *vehDatabase* του φακέλου αρχείων του *veDYNA*, και τα οποία αρχεία έχουν τη μορφή δομής (*struct*).

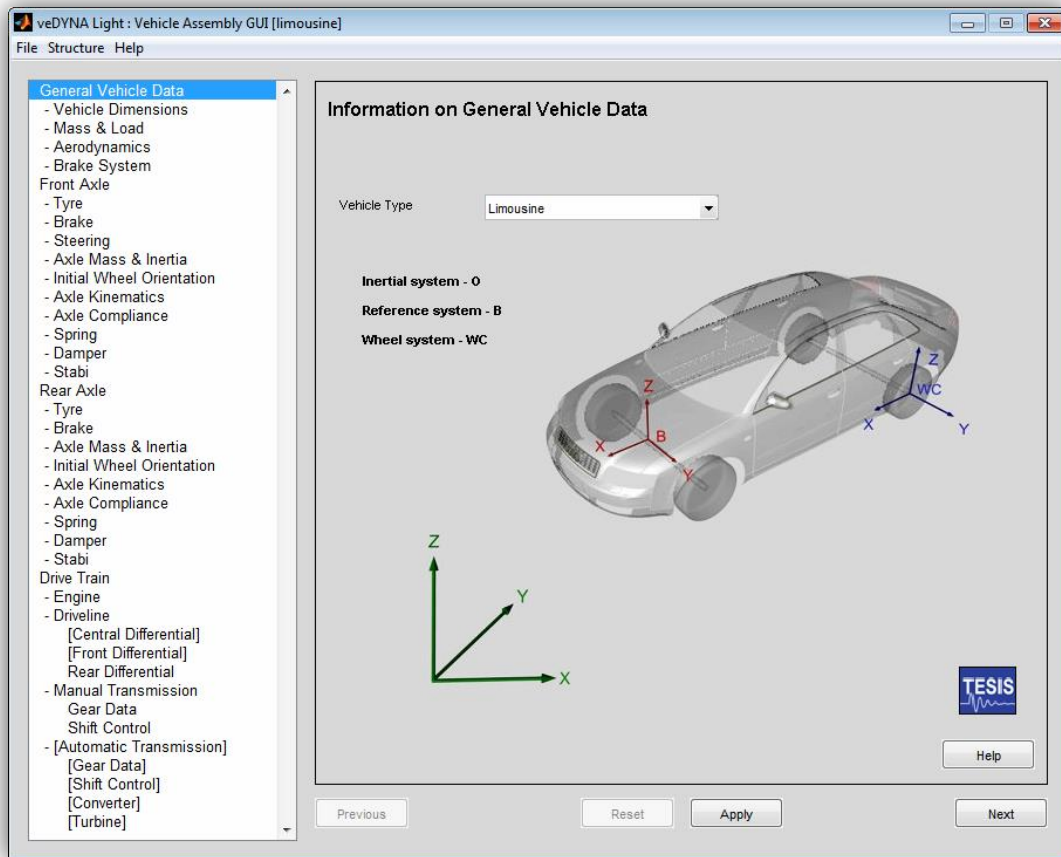
Η διάρθρωση της δομής των αρχείων αυτών είναι η ίδια με τη διάρθρωση των δεδομένων του οχήματος που απεικονίζεται στο *vehicle Assembly GUI* (το πρόσθετο GUI που εμφανίζεται εάν πατηθεί το εικονίδιο ). Το *vehicle Assembly GUI* απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.4**. Μέσω του GUI αυτού, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει το δικό του όχημα με τις δικές του τιμές στις παραμέτρους του *veDYNA* (αρκεί να γνωρίζει όλες αυτές τις τιμές), όπου στη συνέχεια αυτές οι τιμές αποθηκεύονται στη μορφή που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Έχουμε λοιπόν αρχικά, στα αρχεία αυτά, τέσσερις $\langle 1 \times 1 \text{ struct} \rangle$ με τίτλους “*general_vehicle_data*” (διαστάσεις και αρχεία γεωμετρίας οχήματος, μάζα, παράμε-

τροι αεροδυναμικής και συστήματος πέδησης), “*front_axle*” και “*rear_axle*” (παράμετροι τιμονιού, παράμετροι μπρος και πίσω τροχών, μπρος και πίσω φρένων, παράμετροι ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των δυο αξόνων που ενώνει τους μπροστινούς και τους πίσω τροχούς, και του συστήματος ανάρτησης μπρος και πίσω), και “*drive_train*” (παράμετροι κινητήρα, *driveline*, και κιβωτίου ταχυτήτων). Αυτές οι τέσσερις είναι οι κύριες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα δεδομένα του οχήματος του *veDYNA*, και οι οποίες χωρίζονται σε άλλες <1x1 struct> (με τα δεδομένα των συστημάτων και των εξαρτημάτων του οχήματος που γράφονται στις παρενθέσεις). Ακόμη, ο φάκελος *vehDatabase* που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, περιέχει τη βάση δεδομένων των οχημάτων του *veDYNA*, με τα οχήματα αυτά να χωρίζονται σε φακέλους-επιλογές που βλέπουμε να υπάρχουν στο πεδίο *Vehicle Database*.

Στην περίπτωση μας εφαρμόζεται το *demo_vehicle*. Στην κατηγορία αυτή ο χρήστης μπορεί να τρέχει την προσομοίωσή του σε τρία έτοιμα και διαφορετικά είδη οχημάτων, χωρίς να χρειάζεται κάποια αλλαγή στο μοντέλο του οχήματος. Τα τρία αυτά είδη είναι: φορτηγό (*Truck*), μικρό φορτηγό (*Van*), και το κλασικό όχημα του *veDYNA*, τύπου “*sedan*”, με ονομασία *limousine*, τα οποία υπάρχουν σαν επιλογές στο πεδίο *Vehicle Configuration*. Η υλοποίηση της εργασίας αυτής έγινε με το όχημα *limousine*.

Τέλος, όλα τα οχήματα της βάσης δεδομένων οχημάτων *vehDatabase*, χωρίζονται στους υποφακέλους *vehicle* και *geometry*, με τον *vehicle* να περιέχει τα *.mat* αρχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και με τον *geometry* να περιέχει τα αρχεία γεωμετρίας του οχήματος, τα οποία χρειάζονται για το κομμάτι του *animation*, και τα οποία μπορεί να καθορίσει ο χρήστης μέσω του *Vehicle Dimensions* του *General Vehicle Data* στο *vehicle Assembly GUI*.



Εικόνα 2.4 – Το vehicle Assembly GUI του veDYNA

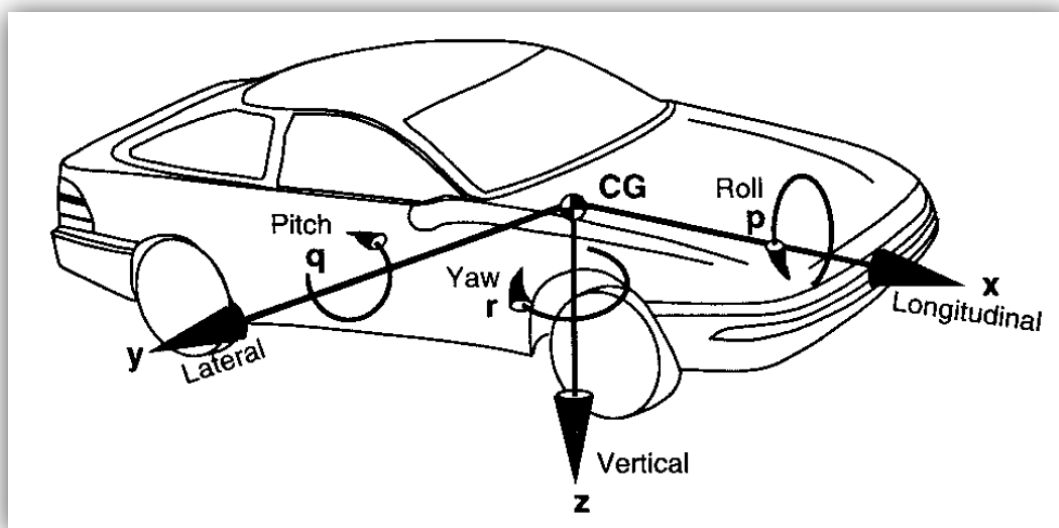
2.5.1.5 Πλαίσιο ελέγχου προσομοίωσης

Στο πλαίσιο *Ελέγχου Προσομοίωσης (Simulation Control)* αρχικά επιλέγεται το *Simulation Project*, όπου σ' αυτό το πεδίο διακρίνονται οι κατηγορίες-υποφάκελοι του φακέλου *simProjects* που υπάρχουν στο φάκελο αρχείων του *veDYNA*, μετά την εγκατάστασή του. Οι επιλογές των πεδίων *Maneuver*, *Road*, *Trace*, και *User Procedure*, που εμφανίζονται παρακάτω στο κεντρικό GUI, είναι τα *.m* αρχεία που βρίσκονται στον αντίστοιχο φάκελο που επέλεξε ο χρήστης στο πεδίο του *Simulation Project*. Το πλαίσιο αυτό διαιρείται σε κομμάτια στα οποία αναφέρονται οι ακόλουθες υποενότητες.

2.5.1.5.1 Ρύθμιση ελιγμού

Στο τμήμα της ρύθμισης *Ελιγμού (Maneuver)* του *Simulation Control*, γίνεται ο προσδιορισμός των ελιγμών του οχήματος μέσω τριών ανεξάρτητων συνόλων δεδομένων. Ο χρήστης καθορίζει τη διαμήκη δυναμική (*Longitudinal Dynamics*) του οχήματος, την πλευρική δυναμική (*Lateral Dynamics*) του οχήματος, και τους περιορισμούς (*Constraints*).

Η διαμήκης και η πλευρική δυναμική καθορίζουν την κίνηση κατά μήκος των αντίστοιχων αξόνων που απεικονίζονται στην **Εικόνα 2.5**. Στην εικόνα αυτή απεικονίζεται το σύστημα αξόνων ενός οχήματος, όπου στο σύστημα αυτό οι άξονες διέρχονται από το κέντρο μάζας του οχήματος (το σημείο *CG – Centre of Gravity* της εικόνας).



Εικόνα 2.5 – Σύστημα αξόνων οχήματος

Τα *Longitudinal* και *Lateral Maneuver GUI* αποτελούν επεξεργαστές δεδομένων των ελιγμών, οι οποίοι ελιγμοί χωρίζονται σε καταχωρήσεις για τις αντίστοιχες φάσεις (*phases*) των ελιγμών που οποίες επιθυμεί να έχει ο χρήστης. Στην **Εικόνα**

2.6 απεικονίζεται το *Longitudinal Maneuver GUI* , και στην **Εικόνα 2.7** το *Lateral Maneuver GUI*.

Η μορφή και τα στοιχεία δεδομένων της τρέχουσας φάσης εξαρτώνται από τον τύπο των ελιγμών (*maneuver type*) που καθορίζει ο χρήστης. Ο κάθε τύπος ελιγμού, τόσο για τα *longitudinal* όσο και για τα *lateral dynamics* , καθορίζει την κίνηση του οχήματος κατά μήκος των αντίστοιχων αξόνων που απεικονίζονται στο σχήμα. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε επτά τύπους ελιγμών στο πλαίσιο των *longitudinal dynamics*, και ανάμεσα σε εννέα είδη ελιγμών στο πλαίσιο των *lateral dynamics*, ανάλογα με την εφαρμογή και την τροχιά που θέλει να εκτελέσει στην εφαρμογή αυτή ο χρήστης.

Οι βασικές καταχωρήσεις δεδομένων στις οποίες χωρίζονται οι φάσεις αυτές, τόσο για τα *longitudinal* όσο και για τα *lateral dynamics* είναι οι: *Phase Name* και *Maneuver Type* , *Maneuver defined over... Time/Distance* (καθορισμός διάρκειας ελιγμού ανάλογα με την απόσταση ή το χρόνο) , *Source of Nominal Value* (καθορισμός προέλευσης της μεταβλητής ελέγχου της τρέχουσας φάσης) , *Nominal Value at the end, Observed state (x)* (καθορισμός κατάστασης οχήματος η οποία αποτελεί συνθήκη για να τερματιστεί πρόωρα η τρέχουσα φάση του ελιγμού), και *Relational Operator* σε συνδυασμό με το *Threshold (V)* (όπου σε περίπτωση που επιλέχθηκε κάποια *Observed State*, στο πεδίο αυτό καθορίζεται ο σχεσιακός τελεστής που θα συγκρίνει την κατάσταση του οχήματος με το κατώφλι - *threshold*).

Τέλος, στο πεδίο των περιορισμών (*Constraints*), ανοίγεται ένα αντίστοιχο GUI, το οποίο απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.8**, στο οποίο καθορίζονται τιμές διάφορων παραμέτρων.

Κάποια από τα πεδία των *longitudinal* και *lateral dynamics* είναι κοινά με αυτά στο GUI των περιορισμών, έχοντας επιπλέον τα πεδία: *Brake pedal position* (όπου στο πεδίο αυτό καθορίζει ο χρήστης τη θέση του πεντάλ του φρένου, μέσω των τιμών [0,1], στο τέλος της τρέχουσας φάσης του περιορισμού), *Minimum gear/maximum gear* (όπου εδώ καθορίζεται η ελάχιστη και η μέγιστη θέση της ταχύτητας που επιθυμεί ο χρήστης να υπάρχει στο κιβώτιο ταχυτήτων καθ' όλη τη διάρκεια της τρέχουσας φάσης), *Front/Rear/Central Differential Lock* (όπου στο πεδίο αυτό γίνεται η ενεργοποίηση του αντίστοιχου διαφορικού στην τρέχουσα φάση),

Friction scaling factor (όπου στο πεδίο αυτό ο χρήστης καθορίζει το συντελεστή κλίμακας της τριβής των τροχών στο τέλος της παρούσας φάσης, μέσω των τιμών $[0,1,2]$).

2.5.1.5.2 Ρύθμιση οδηγού

Με βάση το *license* που είναι στη διάθεσή μας, στο τμήμα ρύθμισης *οδηγού* (*Driver*) του *Simulation Control* ο χρήστης μπορεί να διαλέξει απλώς ανάμεσα σε πέντε έτοιμα προφίλ οδηγού (τα οποία ανήκουν στην κατηγορία *Basic Driver*, καθώς η κατηγορία *Advanced Driver* δεν είναι διαθέσιμη σε εμάς), καθώς και να καθορίσει την τιμή της *μέγιστης ταχύτητας* την οποία μπορεί να αναπτύξει ο εικονικός οδηγός του *veDYNA*, μέσω του πεδίου *Driver Speed*.

Για τον διαμήκη έλεγχο του οχήματος, ο *Basic Driver* χρησιμοποιεί μια λειτουργία αυτόματης ταχύτητας, την οποία χρησιμοποιούμε και εμείς όπως θα αναφερθεί παρακάτω στις αντίστοιχες ρυθμίσεις του GUI, η οποία λειτουργία δημιουργεί αυτόματα ένα προφίλ ταχύτητας με βάση τη ρύθμιση του προφίλ του οδηγού και την καθορισμένη μέγιστη ταχύτητα.

Για τον πλευρικό έλεγχο του οχήματος, μέσω του *Basic Driver* καθορίζεται η τροχιά που σχηματίζει το αμάξι, ανάλογα με τις στροφές που σχηματίζει ο δρόμος του χρήστη. Αυτό γίνεται με το να ορίσει ο χρήστης την πλευρική απόκλιση από την κεντρική γραμμή του δρόμου, μέσω των επιλογών των πλευρικών ελιγμών *QTABLE*, *QSTEP*, *QHOLD*, και *QSINE*. Στην περίπτωση μας επιλέξαμε το *QTABLE*, όπως θα δούμε παρακάτω στις αντίστοιχες ρυθμίσεις του GUI. Στην **Εικόνα 2.7** του *Lateral Maneuver GUI* μπορούμε να δούμε την επιλογή του *QTABLE*.

2.5.1.5.3 Ρύθμιση δρόμου

Στο τμήμα ρύθμισης *Δρόμου (Road)* του GUI, ο χρήστης έχει δυο επιλογές με τις οποίες καθορίζει τις ιδιότητες του δρόμου που θέλει να χρησιμοποιήσει στην προσομοίωσή του, όπου η κάθε επιλογή παρέχει τα κατάλληλα σύνολα δεδομένων. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται και οι δυο επιλογές για τις δυο διαφορετικές εφαρμογές μας: την προσομοίωση του συστήματος της ανάρτησής μας σε επίπεδο στο οποίο σε κάποιο σημείο του παρουσιάζεται ένα σαμαράκι (επιλογή *Standard*), και την προσομοίωση του συστήματος της ανάρτησής μας σε συγκεκριμένη και προκαθορισμένη πίστα (επιλογή *Two Lane*).



Η μια επιλογή είναι ο απλός (*Standard*) δρόμος, η οποία επιλογή δεν αφορά ακριβώς κάποιο είδος δρόμου, αλλά ένα οδικό επίπεδο άπειρης έκτασης. Η έκταση αυτή που θα καλύψει το όχημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, εξαρτάται αποκλειστικά από το χρόνο διάρκειας της προσομοίωσης. Η επιλογή *Standard* ενδείκνυται σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να διαμορφώσει ένα σαμαράκι σε ένα οδικό επίπεδο, στην περίπτωση που θέλει να εφαρμόσει αλλαγές της τριβής του οδοστρώματος, και συγκεκριμένα να ορίσει έναν ορθογώνιο χώρο του επιπέδου με χαμηλή τριβή (*μ-spot*), και σε περίπτωση που θέλει να καθορίσει μια στοχαστική ανομοιογένεια (*unevenness*) του οδοστρώματος.

Η άλλη επιλογή είναι ο *Two-Lane/Advanced* δρόμος (με το license να μας επιτρέπει την ύπαρξη ενός *Two-Lane* και όχι *Advanced* δρόμου), του οποίου η πληροφορία διαιρείται σε δεδομένα οριζόντιας διάταξης (*XY-Layout*) η οποία περιλαμβάνει την κλίση του δρόμου, και σε δεδομένα κάθετης διάταξης τα οποία διαμορφώνουν ένα προφίλ ύψους (*Z-Profile*), το οποίο περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος. Τα δυο αυτά κομμάτια του ορισμού του *Two-Lane* δρόμου περιγράφονται ως μια σειρά διαδοχικών τμημάτων (*segments*) του δρόμου αυτού, τα οποία τμήματα μπορούν να έχουν ξεχωριστές ιδιότητες.

2.5.1.5.4 Ρύθμιση *trace*

Στο τελευταίο τμήμα του *Simulation Control* καθορίζονται απ' το χρήστη οι *trace* μεταβλητές, οι μεταβλητές δηλαδή του *veDYNA* (και όχι μεταβλητές που έχουν οριστεί από το χρήστη), οι οποίες έχουν καταγραφεί (*traced*) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όταν τελειώσει η προσομοίωση, αυτές οι μεταβλητές καταγράφονται σε ένα αρχείο αποτελεσμάτων (*Trace File*) σε ανάλογο *directory*. Ανάλογα λοιπόν με το ποιες μεταβλητές του *veDYNA* επιθυμεί ο χρήστης να έχει σαν αποτελέσματα όταν τελειώσει η προσομοίωση, παρέχεται σε αυτόν ένα GUI όπου μπορεί να ορίσει το σύνολο των μεταβλητών αυτών. Το GUI αυτό αποτελεί ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για την εύκολη και γρήγορη εύρεση των μεταβλητών αυτών.

2.5.1.6 Πλαίσιο καθορισμού διαδικασίας χρήστη

Το πλαίσιο καθορισμού *διαδικασίας χρήστη* (*User Procedure*) επιτρέπει το άνοιγμα και κατ' επέκταση την επεξεργασία, αλλά και την εκτέλεση των διαδικασιών ελέγχου προσομοίωσης, μέσω των κουμπιών  και  (η εκτέλεση της διαδικασίας γίνεται και με *Ctrl + U*) αντίστοιχα. Μέσω αυτού του κομματιού του κεντρικού GUI, γίνεται ο προγραμματισμός και η αυτοματοποίηση της προσομοίωσης του χρήστη, αφού οι διαδικασίες ελέγχου της προσομοίωσης είναι συναρτήσεις (*functions*) του MATLAB. Οι συναρτήσεις αυτές κάνουν χρήση των ειδικών εντολών του *veDYNA*, καθώς και της λειτουργικότητας του MATLAB, και περιέχουν τον προσδιορισμό της όλης διαδικασίας προσομοίωσης (ανάθεση τιμών δεδομένων, εκτέλεση της συνάρτησης και μετεπεξεργασία).

Διάφορες προ-ρυθμισμένες διαδικασίες είναι διαθέσιμες στα *Simulation Projects* που παρέχονται με την εγκατάσταση του *veDYNA*, είτε για την απευθείας εκτέλεσή τους, είτε για την επεξεργασία τους από το χρήστη και τη μετέπειτα εκτέλεσή τους. Οι διαδικασίες αυτές θα πρέπει να εκτελείται σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο προ-επιλεγμένο μοντέλο *Simulink* και με μια ανάλογη διαμόρφωση του οχήματος.

2.5.2 Σύνολα ρυθμίσεων

Μετά την παρουσίαση της γραφικής διασύνδεσης χρήστη του *veDYNA* μέσω της περιγραφής των πλαισίων της διασύνδεσης αυτής, στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί η προβολή και η περιγραφή των ρυθμίσεων της προσομοίωσης που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Οι ρυθμίσεις αυτές έγιναν προκειμένου να προσαρμόσουμε την προσομοίωση στα δεδομένα και στις απαιτήσεις που περιλάμβανε η δική μας εφαρμογή, η προσομοίωση δηλαδή του δικού μας συστήματος ενεργητικής ανάρτησης του οχήματος, για την μετέπειτα μελέτη της συμπεριφοράς της ανάρτησης αυτής που καθορίζεται από τον ελεγκτή μας.

Στην **Εικόνα 2.9** προβάλλεται το κεντρικό GUI με τις αρχικές και προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του, απεικονίζοντας τις ρυθμίσεις που προβάλλονται στο χρήστη με την εγκατάσταση του *veDYNA*. Το σχήμα αυτό προβάλλεται με σκοπό την ευκολία του αναγνώστη στο να διακρίνει τις αλλαγές μεταξύ των προεπιλεγμένων ρυθμίσεων και των τελικών ρυθμίσεων που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Τα πεδία που άλλαξαν αναγράφονται με γραμματοσειρά σε **έντονη γραφή** στις ακόλουθες δυο υποενότητες. Στην **Εικόνα 2.10** και στην **Εικόνα 2.11** προβάλλονται τα δυο σύνολα ρυθμίσεων που έγιναν στο κεντρικό GUI για τις δυο διαφορετικές προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Το *πρώτο* σύνολο ρυθμίσεων (**Εικόνα 2.10**) αφορά την προσομοίωση του συστήματος ανάρτησης του οχήματος με το όχημα να οδηγείται σε συγκεκριμένη και προκαθορισμένη πίστα, η οποία διαμορφώνεται από ένα δρόμο τριών διαστάσεων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορά τις ρυθμίσεις αυτές *δεν* εξετάζονται ιδιαίτερα, διότι είναι περισσότερο βολικές για τα τελικά αποτελέσματα οι ρυθμίσεις για προσομοίωση σε ευθεία με σαμαράκι.

Το *δεύτερο* σύνολο ρυθμίσεων (**Εικόνα 2.11**) αφορά την προσομοίωση του συστήματος ανάρτησης του οχήματος καθώς το όχημα οδηγείται πάνω σε ένα επίπεδο στο οποίο σε κάποιο σημείο του παρουσιάζεται ένα σαμαράκι. Οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν τη *βασική προσομοίωση* που έγινε στην εργασία αυτή, αφού τα αποτελέσματα που εξετάζουμε στο τέλος είναι με βάση αυτό το σύνολο ρυθμίσεων.

2.5.2.1 Πρώτο σύνολο ρυθμίσεων

Η **Εικόνα 2.10** προβάλλει το κεντρικό GUI με τις ρυθμίσεις για προσομοίωση σε δρόμο τριών διαστάσεων, ο οποίος διαμορφώνεται αυτόματα μετά την εισαγωγή δεδομένων προκαθορισμένης πίστας.

Αρχικά, παρατηρείται ότι τα πεδία *Platform* του πλαισίου *Model and Platform*, καθώς και τα πεδία του πλαισίου *Vehicle* παραμένουν ως έχουν με αυτά στην **Εικόνα 2.9**, εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι δεν αλλάζει το είδος *Off-Board* ή *On-Board*, και γενικότερα η πλατφόρμα της προσομοίωσης (το μοντέλο υπάρχει εξ' ολοκλήρου ως αρχείο *Simulink*), αλλά και το γεγονός ότι το όχημα που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή είναι το προκαθορισμένο όχημα του *veDYNA*.

Όπως είναι φυσικό, αλλάζει το μοντέλο το οποίο προσομοιώνεται, όπου απ' το αρχικό *veDYNA_vehicle*, το οποίο αποτελεί το βασικό μοντέλο οχήματος του *veDYNA*, προσομοιώνεται μια *τροποποιημένη επέκταση* του μοντέλου αυτού, το οποίο είναι το *my_veDYNA_extern_susp*. Το μοντέλο *my_veDYNA_extern_susp* αποτελεί επέκταση του *veDYNA_vehicle*, διότι συμπεριλαμβάνει το μπλοκ της (εξωτερικής) ανάρτησης του οχήματος στο βασικό μοντέλο οχήματος, και αποτελεί επίσης τροποποίηση του αρχικού *veDYNA_extern_susp*, προκειμένου να προσαρμοστεί στις ανάγκες της εργασίας αυτής. Το μοντέλο *my_veDYNA_extern_susp* είναι το μοντέλο το οποίο προσομοιώνεται στα πλαίσια της εργασίας αυτής, και παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα **4.5.1**.

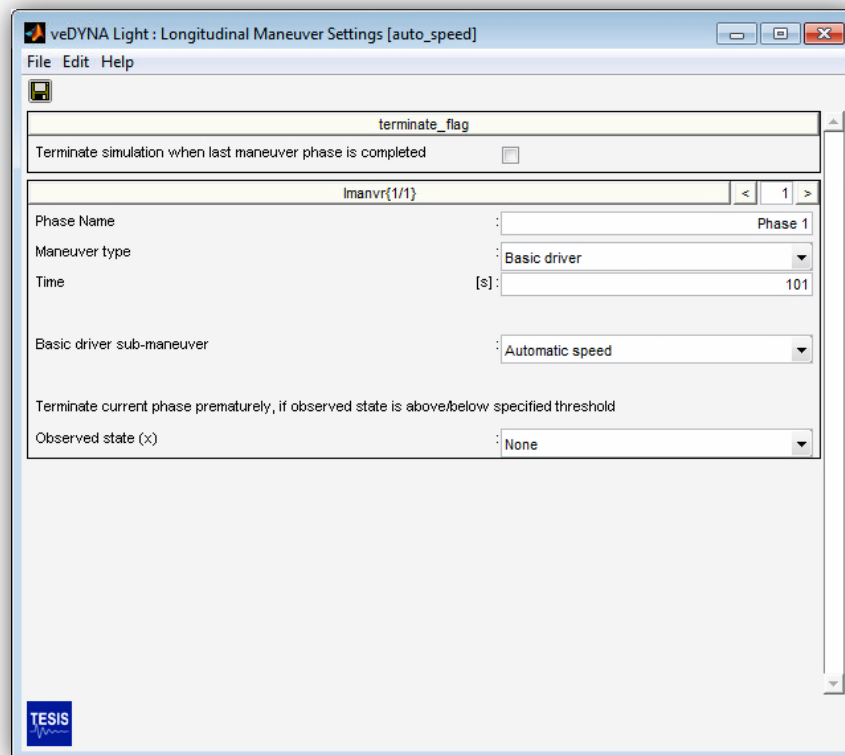
Στη συνέχεια, προχωράμε στην κατάλληλη ρύθμιση του πλαισίου *Simulation Control*, στο οποίο αρχικά αλλάζει το *Simulation Project*. Στην περίπτωση τη δική μας είναι το *demo_external*, αφού σύμφωνα με τα περιεχόμενα του φακέλου *demo_external* του *simProjects* πρέπει να γίνει και η προσομοίωση του δικού μας μοντέλου, απ' τη στιγμή που αποτελεί μια τροποποίηση του *veDYNA_extern_susp*. Το *veDYNA_extern_susp* έχει σχεδιαστεί με σκοπό να εκτελείται η προσομοίωσή του σε συνδυασμό με τα *.m* αρχεία του *demo_external*, όπως επίσης και όλα τα υπόλοιπα *extern* μοντέλα του *veDYNA*.

Τα πεδία με περιεχόμενο *auto_speed* και *auto_steer* των *Longitudinal* και *Lateral Dynamics* αντίστοιχα, αποτελούν πεδία στα οποία επιλέγονται τα ομώνυμα

.m αρχεία για τις αντίστοιχες δυναμικές, τα οποία δημιουργήθηκαν από μέρους μας. Οι ρυθμίσεις *auto_speed* στο *Longitudinal Maneuver GUI* και *auto_steer* στο *Lateral Maneuver GUI* απεικονίζονται στην **Εικόνα 2.6** και στην **Εικόνα 2.7** αντίστοιχα.

Η επιλογή *auto_speed* της διαμήκους δυναμικής του οχήματος γίνεται τόσο στην προσομοίωση του απλού δρόμου με το σαμαράκι, όσο και στην προσομοίωση του δρόμου που παίρνει τη μορφή προκαθορισμένης πίστας. Ο καθορισμός της διαμήκους δυναμικής καθορίζει και την ταχύτητα του οχήματος, και συγκεκριμένα η επιλογή *auto_speed* αφορά τον καθορισμό της αυτόματης ταχύτητας του οχήματος. Επιλέγεται σαν τύπος ελιγμού το *Basic Driver*, και κατά συνέπεια το *Automatic Speed* στο πεδίο του υπο-ελιγμού (*sub-maneuver*) στο GUI που ανοίγεται στο πεδίο αυτό, πατώντας το αντίστοιχο κουμπί.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην περιγραφή του πεδίου της ρύθμισης του προφίλ του οδηγού (στο πεδίο *Driver*, και συγκεκριμένα στο κομμάτι που αναφέρεται στο διαμήκη έλεγχο του οχήματος που γίνεται μέσω αυτού του προφίλ), ο *Basic Driver* χρησιμοποιεί μια λειτουργία αυτόματης ταχύτητας. Τη λειτουργία αυτή τη χρησιμοποιούμε προκειμένου να δημιουργήσει η λειτουργία αυτή αυτόματα ένα προφίλ ταχύτητας, με βάση τη ρύθμιση του προφίλ του οδηγού που κάνει ο χρήστης, και τον καθορισμό της μέγιστης ταχύτητας. Όπως παρατηρείται παρακάτω στο πλαίσιο ρύθμισης του προφίλ του οδηγού, η δική μας επιλογή είναι η “*skilled, racy, direct with preview*”, επομένως τα χαρακτηριστικά της επιλογής αυτής επηρεάζουν την αυτόματη ταχύτητα, τον τύπο υπο-ελιγμού δηλαδή της διαμήκους δυναμικής που έχει τύπο *Basic Driver*.



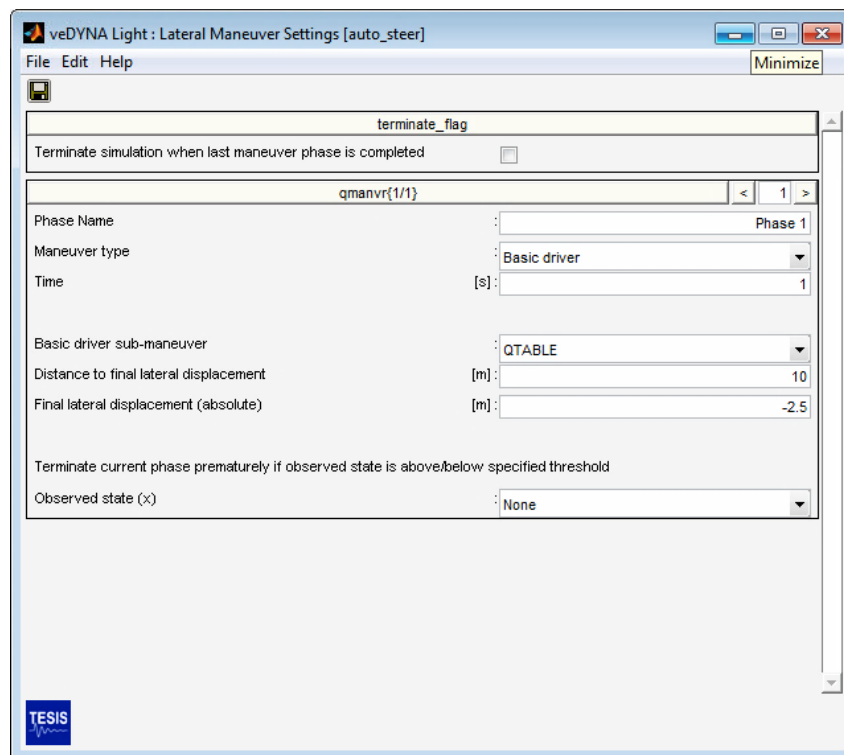
Εικόνα 2.6 – Οι ρυθμίσεις “auto_speed” στο πεδίο Longitudinal Dynamics

Όσον αφορά τώρα την πλευρική δυναμική του οχήματος, ο καθορισμός της αφορά και τον καθορισμό της διεύθυνσης του οχήματος, ο οποίος στην περίπτωσή μας γίνεται μέσω του ελέγχου του τιμονιού του οχήματος.

Συγκεκριμένα, η επιλογή **auto_steer** αφορά τον αυτόματο έλεγχο του τιμονιού του οχήματος. Ο συσχετισμός του προφίλ του οδηγού με τη διαμήκη δυναμική του οχήματος ο οποίος έγινε στην προηγούμενη παράγραφο, ισχύει προφανώς και με την πλευρική δυναμική του οχήματος. Όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κομμάτι της περιγραφής του πεδίου *Driver*, ο *Basic Driver* επηρεάζει και την πλευρική δυναμική του οχήματος. Αυτό γίνεται διότι μέσω του τύπου ελιγμού *Basic Driver* στο πεδίο της πλευρικής δυναμικής, καθορίζεται και η τροχιά που σχηματίζει το αμάξι ανάλογα με τις στροφές που σχηματίζει ο δρόμος του χρήστη. Η τροχιά αυτή του οχήματος, καθορίζεται αυτόματα με το να ορίσει ο χρήστης την πλευρική απόκλιση από την κεντρική γραμμή του δρόμου, μέσω των επιλογών των πλευρικών υπο-ελιγμών (*sub-*

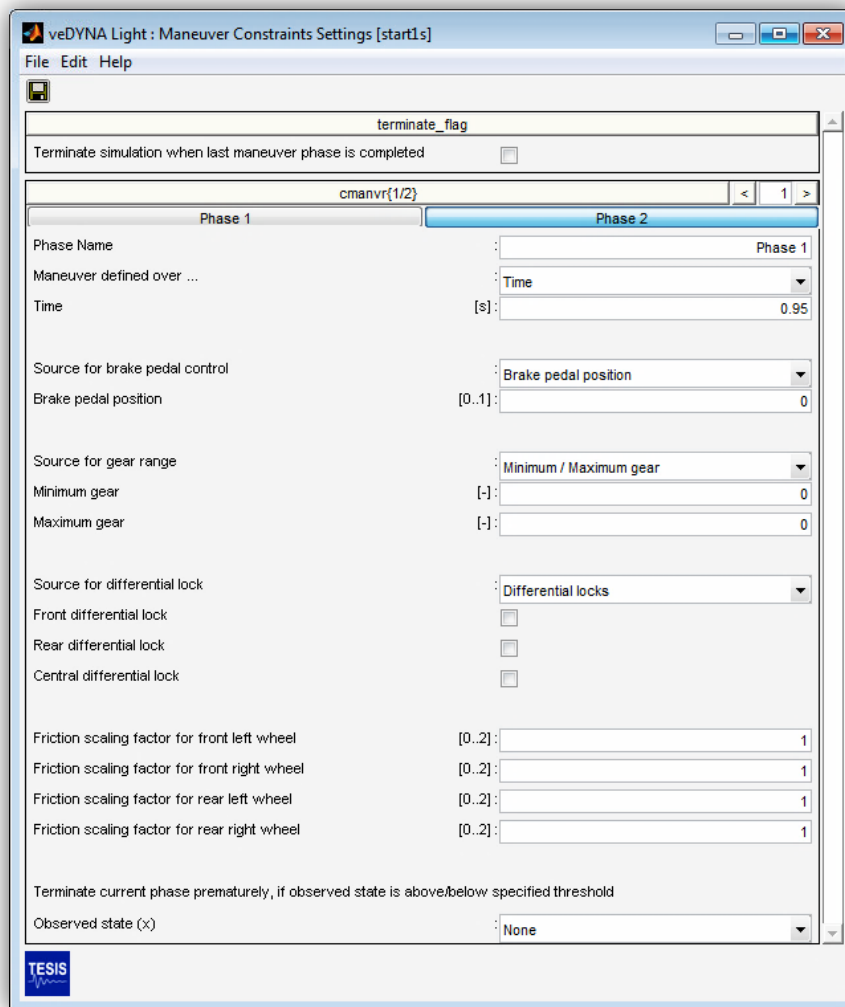
maneuvers) του *Basic Driver*, οι οποίες είναι οι *QTABLE*, *QSTEP*, *QHOLD*, και *QSINE*.

Στην περίπτωση μας, επιλέξαμε το *QTABLE*, έναν υπο-ελιγμό ο οποίος κάνει τον οδηγό στην αρχή του ελιγμού να στρίψει αυτόματα το τιμόνι δεξιά και να εισέλθει από την κεντρική λωρίδα του δρόμου στη δεξιά λωρίδα, και ο οποίος έχει ως παραμέτρους την απόσταση στην τελική πλευρική μετατόπιση, και την πλευρική μετατόπιση σε απόλυτες συντεταγμένες.



Εικόνα 2.7 – Οι ρυθμίσεις “auto_steer” στο πεδίο *Lateral Dynamics*

Στο τρίτο πεδίο του καθορισμού των ελιγμών του οχήματος, στην προσομοίωση στον απλό δρόμο αλλά και στον τρισδιάστατο δρόμο, επιλέγουμε τους περιορισμούς *startIs*, όπου καθορίζονται οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται παραπάνω στην περιγραφή αυτού του πεδίου των ελιγμών. Το GUI των περιορισμών απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.8**.



Εικόνα 2.8 – Οι ρυθμίσεις “start1s” στο πεδίο Constraints

Μετά από τον καθορισμό της δυναμικής του οχήματος μέσω των τριών ανεξάρτητων συνόλων δεδομένων που είναι διαθέσιμα με την εγκατάσταση του veDYNA, σειρά εμφάνισης στο κεντρικό GUI έχει το πεδίο του οδηγού, στο οποίο απλά επιλέγουμε ένα απ’ τα πέντε διαθέσιμα προφίλ οδηγού, το *skilled, racy, direct with preview*. Αυτό το πεδίο του *Simulation Control* περιγράφηκε σε προηγούμενες σελίδες, όπως και ο συσχετισμός του με τη δυναμική του οχήματος.

Έτσι λοιπόν, σειρά εμφάνισης στο κεντρικό GUI έχει ο καθορισμός του δρόμου, μέσω του αντίστοιχου πεδίου του πλαισίου *Simulation Control*. Αρχικά, αυτό που έγινε από μέρους μας ήταν να εισάγουμε τα δεδομένα της προκαθορισμένης πί-

στας την οποία χρησιμοποιήσαμε. Τα δεδομένα αυτά είναι οι συντεταγμένες του δρόμου στις τρεις διαστάσεις, οι οποίες ορίζουν το οριζόντιο επίπεδο της πίστας αυτής (*XY-Layout*), και το προφίλ του ύψους του δρόμου (*Z-Profile*) σε αυτό το καθορισμένο οριζόντιο επίπεδο.

Αρκεί λοιπόν ο χρήστης να εισάγει ένα *.txt* αρχείο (με format *ascii*) το οποίο περιέχει ένα σύνολο από τριάδες συντεταγμένων x, y, z της κεντρικής λωρίδας του δρόμου, (και στην οποία τριάδα μπορεί να υπάρχει και ένα τρίτο στοιχείο το οποίο ορίζει την κλίση (*inclination*) του δρόμου στο εκάστοτε x, y, z σημείο του, το οποίο σε εμάς είναι μηδέν σε όλη την έκτασή του) που στη δική μας περίπτωση το αρχείο αυτό αποτελείται από ένα σύνολο εκατοντάδων τριάδων συντεταγμένων. Οι τρεις συντεταγμένες αυτές πρέπει να χωρίζονται σε τρεις αντίστοιχες στήλες. (Το αρχείο αυτό δημιουργείται από τις συντεταγμένες της τροχιάς του οχήματος στο παράδειγμα *vr_octavia* του *Simulink* που παρέχεται με την εγκατάστασή του, οι οποίες συντεταγμένες είναι διαθέσιμες στο αρχείο *test_lap* το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο. Το όχημα εκτελεί τροχιά πάνω στην κεντρική λωρίδα του δρόμου σε όλη την έκτασή του, επομένως οι συντεταγμένες πάνω σε αυτή την λωρίδα διαμόρφωσαν, στην περίπτωσή μας, την πίστα που βλέπουμε σε αυτό το παράδειγμα.)

Τα δεδομένα αυτά του δρόμου τα εισάγαμε μέσω της επιλογής *Import GPS Data*, η οποία βρίσκεται στη γραμμή μενού του κεντρικού GUI, και συγκεκριμένα στη διαδρομή *File | Convert/Import*. Από τα δεδομένα αυτά, παράγονται αρχεία δεδομένων του δρόμου στη βάση δεδομένων του *veDYNA*. Τα αρχεία αυτά είναι τα *octavia_road.m*, τα οποία υπάρχουν στη βάση δεδομένων του δρόμου, τόσο στο μέρος της οριζόντιας διάταξης, όσο και στο προφίλ του ύψους.

Μεταξύ της στιγμής που επιλέγεται το *Import GPS Data* και της στιγμής που παράγονται τα δύο αρχεία *octavia_road*, υπάρχει ένα ειδικό GUI που ανοίγεται μέσω της επιλογής *Import GPS Data*, και στο οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το αρχείο δεδομένων του δρόμου, στη συνέχεια να επιλέξει την αυτόματη μετατροπή των δεδομένων αυτών σε format δεδομένων δρόμου του *veDYNA*, και τέλος να επιλέξει την αποθήκευση αυτού του format δεδομένων. Αυτό το format έχει όνομα το οποίο επιλέγει ο χρήστης στο GUI αυτό, και απεικονίζεται στα δυο πεδία του δρόμου στο κεντρικό GUI. Το format αυτό προβάλλεται στο χρήστη με το άνοιγμα των αντίστοι-

χων GUI μέσω των ανάλογων κουμπιών που βρίσκονται στο πεδίο του δρόμου, όπου βασικό χαρακτηριστικό του format αυτού είναι ότι χωρίζει το δρόμο σε τμήματα (*segments*), με το πλήθος των τμημάτων αυτών να είναι (με βάση το δικό μας license) μέχρι πενήντα, τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κάθετο επίπεδο, αριθμό που χρησιμοποιούμε και εμείς μέσω του ειδικού GUI της εισαγωγής δεδομένων δρόμου.

Στη συνέχεια, στο πεδίο *Trace*, δημιουργήθηκε νέο αρχείο trace το οποίο έχει τις μεταβλητές του *veDYNA*, των οποίων τις τιμές θα μπορούσαμε να εξετάσουμε μετά την προσομοίωση μέσω των plots του εργαλείου *Plot GUI* του *veDYNA*, όμως δε χρησιμοποιήθηκε ούτε το αρχείο αυτό, αλλά ούτε και το εργαλείο ιδιαίτερα από μέρους μας, απ' τη στιγμή που είναι διαθέσιμες μόνο μεταβλητές του *veDYNA*, και όχι μεταβλητές ορισμένες από το χρήστη. Χρησιμοποιήσαμε ένα *.m (script)* αρχείο το οποίο δημιουργήσαμε, το οποίο ορίζει τις δικές μας μεταβλητές και κάνει plot τις τιμές των μεταβλητών αυτών.

Τέλος, στο πλαίσιο καθορισμού της διαδικασίας χρήστη έχουμε τη διαδικασία *my_suspension_procedure*, μέσω της οποίας γίνεται ο προγραμματισμός και η εκτέλεση της προσομοίωσης του μοντέλου *my_veDYNA_extern_susp*. Αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης και η συγκεκριμένη διαδικασία αλληλοσυνδέονται, με την ύπαρξη του ενός να προϋποθέτει την ύπαρξη του άλλου για τα επιθυμητά αποτελέσματα της εργασίας αυτής. Η διαδικασία αυτή δημιουργήθηκε έπειτα από τροποποίηση της διαδικασίας *go_ext_susp* του *veDYNA*, διαδικασία για την προσομοίωση του μοντέλου *veDYNA_extern_susp*. Η διαδικασία αυτή είναι συνάρτηση του MATLAB, όπου με την εκτέλεσή της (*Ctrl + U*), και μέσω της χρήσης ειδικών εντολών του *veDYNA*, εφαρμόζονται όλες οι ρυθμίσεις και οι επιλογές των πλαισίων που επιθυμούμε και που βλέπουμε στις παρακάτω αντίστοιχες εικόνες. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης που επιθυμεί να εφαρμόσει αυτές τις ρυθμίσεις του σχήματος, αρκεί να εκτελέσει τη διαδικασία αυτή. Ακόμα, γίνεται χρήση της λειτουργικότητας του MATLAB, όπου μέσω αυτής επιτυγχάνεται:

- η εκτέλεση του αλγορίθμου ελέγχου που αφορά την ανάρτηση του οχήματος *veDYNA* , η οποία αναπτύσσεται στο 4^ο κεφάλαιο

- η φόρτωση της παραμέτρου $K1$ που αποτελεί έξοδο του αλγορίθμου αυτού, με το $K1$ να είναι ίσο με $-K$, όπου K ο βέλτιστος πίνακας της στρατηγικής ελέγχου του αλγορίθμου LQR , όπως θα δούμε στο 4^ο κεφάλαιο
- η φόρτωση της παραμέτρου $G1$, με το $G1$ να είναι ο G^T της σχέσης (4.16), στοιχείο του αλγορίθμου ελέγχου του 4^{ου} κεφαλαίου
- ο ορισμός της τιμής του διακόπτη *switch1*, μέσω του οποίου ο χρήστης επιλέγει εάν θέλει να εφαρμοστεί μόνο η (εξωτερική) ανάρτηση του μοντέλου, ή αυτή η ανάρτηση να προστεθεί στην εσωτερική ανάρτηση του *veDYNA*.
- ανάθεση των τιμών των παραπάνω παραμέτρων και της τιμής του διακόπτη στις αντίστοιχες παραμέτρους των block του μοντέλου προσομοίωσης του οχήματος *veDYNA* με όνομα *my_veDYNA_extern_susp*, μέσω των εντολών
`IMDL.EXTSUSP.Gain.v = K1 , IMDL.EXTSUSP.G_transpose.v = G1 ,`
`IMDL.EXTSUSP.onoff.v = switch1` αντίστοιχα
- έλεγχος *run-time errors* μέσω *if-else* που υπάρχει πιθανότητα να γίνουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης
- έλεγχος λαθών που υπάρχει πιθανότητα να παρουσιαστούν κατά την εφαρμογή των ρυθμίσεων
- εκτύπωση ανάλογου μηνύματος των παραπάνω ελέγχων στην κονσόλα του MATLAB
- εκτέλεση ξεχωριστού *.m (script)* αρχείου το οποίο κάνει plot τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο 4^ο κεφάλαιο.

Για τον αλγόριθμο ελέγχου, τα K και G^T , το διακόπτη *switch1*, και τα blocks στα οποία ανατίθενται αυτές οι τιμές, θα επεκταθούμε στο 4^ο κεφάλαιο.

2.5.2.2 Δεύτερο σύνολο ρυθμίσεων

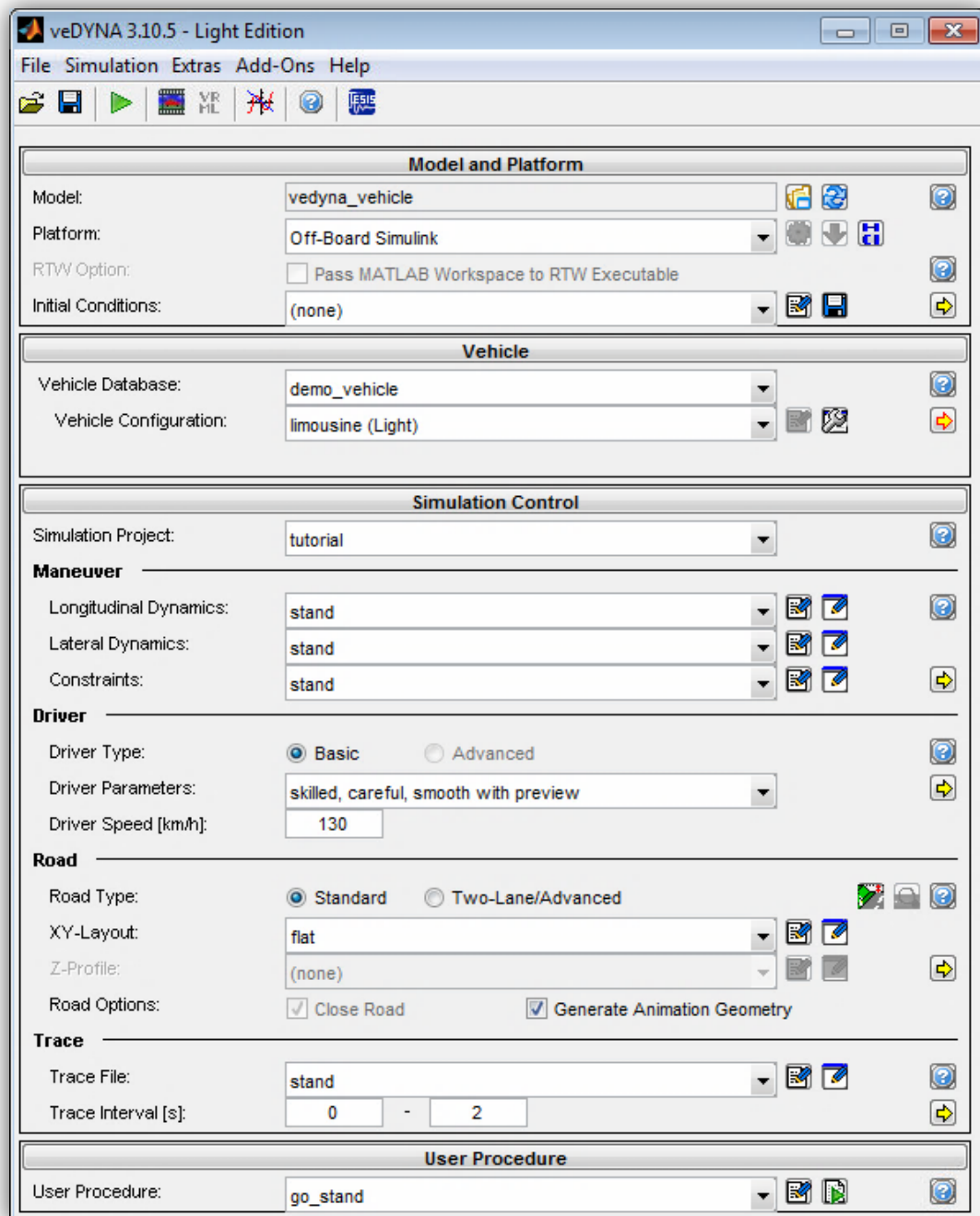
Η **Εικόνα 2.11** προβάλλει το κεντρικό GUI με τις ρυθμίσεις για προσομοίωση σε ευθεία με σαμαράκι. Οι περισσότερες ρυθμίσεις σε σχέση με την προηγούμενη

ενότητα παραμένουν οι ίδιες. Τα στοιχεία που αλλάζουν είναι η πλευρική δυναμική του οχήματος, ο χρόνος προσομοίωσης (ο οποίος είναι μικρότερος λόγω της μικρότερης διαδρομής που εκτελεί το όχημα), η τιμή της μέγιστης ταχύτητας του οχήματος (η οποία είναι μικρότερη προκειμένου να είναι περισσότερο ομαλή και φυσική η διαταραχή που ασκεί το σαμαράκι στην κάθετη μετατόπιση του οχήματος), και φυσικά το οδόστρωμα.

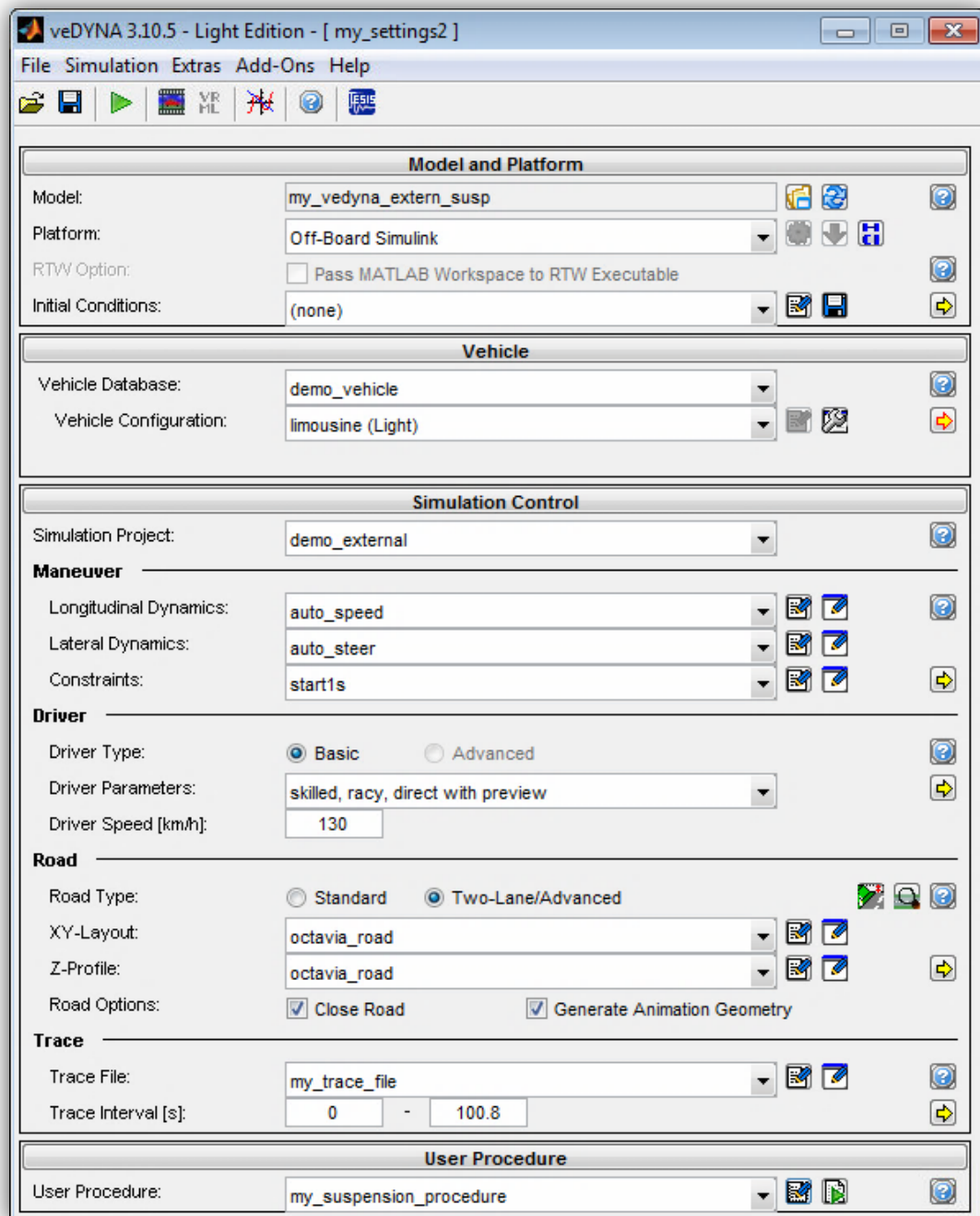
Συγκεκριμένα, όσον αφορά την πλευρική δυναμική του οχήματος, δημιουργούμε το *.m* αρχείο ***straight_line***, μέσω του οποίου καθορίζουμε τον τύπο ελιγμού, ο οποίος τύπος ονομάζεται “*Controlled straight line driving*”. Όπως δηλώνει και το όνομά του, το όχημα στο οποίο καθορίζεται αυτός ο τύπος ελιγμού της πλευρικής δυναμικής, εκτελεί μια ελεγχόμενη οδήγηση ευθείας γραμμής στην κατεύθυνση του *x*-άξονα της κίνησής του, κάτι το οποίο σημαίνει ότι δεν αλλάζει η διεύθυνση του οχήματος αυτού.

Στο πεδίο καθορισμού του δρόμου, επιλέγουμε το ***muesplit***, μέσω του οποίου καθορίζεται ένα επίπεδο στο οποίο εμφανίζεται ένα σαμαράκι, σε θέση την οποία καθορίζει ο χρήστης μέσω των *x*, *y* συντεταγμένων του κέντρου του σαμαριού που επιθυμεί να έχει το κέντρο αυτό πάνω στο επίπεδο. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να διαμορφώσει το σχήμα στο σαμαράκι αυτό, το οποίο είναι ένα ισοσκελές τραπέζιο, και διαμορφώνεται μέσω τιμών που δίνει ο χρήστης σε ειδικές παραμέτρους. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων καθορίζουν το μήκος των βάσεων του τραπεζίου, το ύψος, και το πλάτος του.

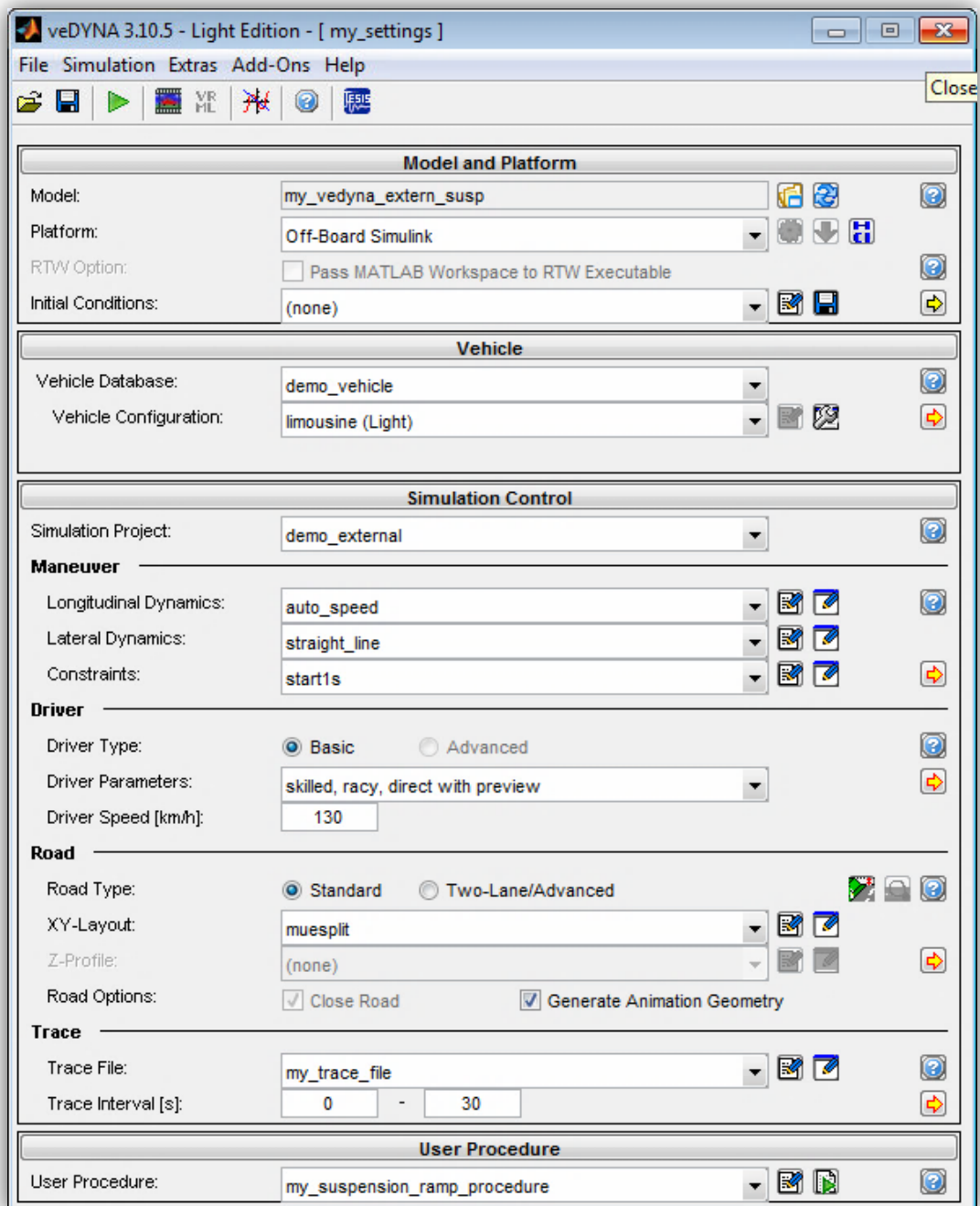
Τέλος, αναφορικά με τη διαδικασία χρήστη, ο χρήστης αρκεί να εκτελέσει τη διαδικασία ***my_suspension_ramp_procedure***, όπου μέσω της εκτέλεσης αυτής καθορίζονται αυτόματα όλα όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα αυτή, εφαρμόζοντας τις ρυθμίσεις που βλέπουμε στην εικόνα 2.11. Η διαδικασία αυτή περιέχει ότι αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα **2.5.2.1** σχετικά με τη διαδικασία ***my_suspension_procedure*** και το συσχετισμό της με τη λειτουργικότητα του MATLAB.



Εικόνα 2.9 – Κεντρικό GUI με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις



Εικόνα 2.10 – Κεντρικό GUI με τις ρυθμίσεις για προσομοίωση σε προκαθορισμένη πίστα



Εικόνα 2.11 – Κεντρικό GUI με τις ρυθμίσεις για προσομοίωση σε ευθεία με σαμαράκι

Κεφάλαιο 3 – Συστήματα ανάρτησης οχημάτων

3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αφορά αρχικά την παρουσίαση ενός συστήματος συμβατικής ανάρτησης, δίνοντας αρχικά μια σύντομη περιγραφή των συστημάτων αυτών στην ενότητα 3.2, και δίνοντας έπειτα έναν γενικό ορισμό και τους στόχους όλων των συστημάτων ανάρτησης στην ενότητα 3.3. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γενική διάταξη και η γενική λειτουργία της συμβατικής αυτής ανάρτησης στην ενότητα 3.4. Η γενική αυτή διάταξη περιλαμβάνει τα βασικά εξαρτήματα ενός συστήματος ανάρτησης τροχοφόρου οχήματος. Η λειτουργία μιας συμβατικής ανάρτησης περιγράφεται μέσω της λειτουργίας των στοιχείων απ' τα οποία αποτελείται η ανάρτηση αυτή, αλλά και μέσω της αλληλεπίδρασης των στοιχείων αυτών μεταξύ τους.

Στη συνέχεια, στην ενότητα 3.5, τα συστήματα ανάρτησης χωρίζονται σε τρεις συγκεκριμένες κατηγορίες: το σύστημα παθητικής ανάρτησης, το σύστημα ημιενεργητικής ανάρτησης, και το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης. Μπορούν να γίνουν διάφοροι διαχωρισμοί των συστημάτων ανάρτησης σε κατηγορίες, με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών. Ο διαχωρισμός ο οποίος γίνεται στα πλαίσια της εργασίας αυτής, γίνεται με βάση τη λειτουργία του αποσβεστήρα ταλαντώσεων, το στοιχείο δηλαδή στο οποίο παρεμβαίνουμε εμείς και το τροποποιούμε. Η παρουσίαση και ο διαχωρισμός των τριών αυτών κατηγοριών συστημάτων γίνεται με σκοπό την περιγραφή της συγκεκριμένης διάταξης/κατηγορίας που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της εργασίας αυτής, η οποία είναι το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης, αλλά και με σκοπό την ανάδειξη των διαφορών της διάταξης αυτής σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο.

Στην υποενότητα 3.5.1.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του συστήματος παθητικής ανάρτησης του περιβάλλοντος *veDYNA*. Είναι τα χαρα-

κτηριστικά των στοιχείων του αρχικού και μη τροποποιημένου -απ' το χρήστη- συστήματος παθητικής ανάρτησης του *veDYNA*. Το σύστημα αυτό το τροποποιούμε για τις ανάγκες της εργασίας αυτής. Συγκεκριμένα, είναι το σύστημα το οποίο μετατρέπουμε σε σύστημα ενεργητικής ανάρτησης, μέσω της στρατηγικής ελέγχου που αναπτύσσουμε και εφαρμόζουμε. Αυτή η στρατηγική ελέγχου αφορά τον παθητικό αποσβεστήρα ταλαντώσεων του *veDYNA*, ο οποίος παρουσιάζεται στην υποενότητα **3.5.1.1**, με τη στρατηγική αυτή να τον μετατρέπει σε ενεργητικό. Η στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζεται στην εργασία αυτή παρουσιάζεται στο 4^ο κεφάλαιο.

3.2 Τα συστήματα ανάρτησης οχημάτων γενικά

Το σύστημα ανάρτησης ενός οχήματος είναι αναμφισβήτητα ένα από τα βασικότερα μέρη του οχήματος. Ο καθορισμός τόσο της γεωμετρίας της ανάρτησης όσο και των διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων (όπως η σταθερά ελατηρίου και η σταθερά απόσβεσης), επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του συστήματος στις διαταραχές που προέρχονται από το οδόστρωμα, και οι οποίες εισέρχονται στο σύστημα της ανάρτησης. Οι αναρτήσεις σε συνδυασμό με το όχημα συνθέτουν ένα πλήρες ταλαντευτικό σύστημα, στο οποίο μια ομαλή αλλά και έντονη εξασθένιση των διαταραχών του οδοστρώματος αποτελεί όχι μόνο στόχο, αλλά και πρόκληση για πολλούς μηχανικούς και κατασκευαστές αυτοκινήτων.

Εκτός από την πλευρική και τη διαμήκη δυναμική του οχήματος, έγιναν συνεχή ερευνητικά πονήματα και στην κάθετη δυναμική του οχήματος κατά τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων δεκαετιών.

Σε γενικές γραμμές, ο έλεγχος του συστήματος ανάρτησης του οχήματος, η αποφυγή της ανατροπής του, και η εκτίμηση της κλίσης του εδάφους, είναι τρεις από τις κύριες ερευνητικές κατευθύνσεις του τομέα της κάθετης δυναμικής του οχήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχολούμαστε με τον έλεγχο του συστήματος ανάρτησης του οχήματος.

Το σύστημα ανάρτησης του οχήματος το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στην κάθετη δυναμική του οχήματος, ελκύει σήμερα το έντονο ενδιαφέρον των ακαδημαϊκών κοινοτήτων, των ερευνητών, και των βιομηχανιών αυτοκινήτων παγκοσμίως, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για την καλύτερη οδηγική άνεση και τη δυνατότητα ελέγχου των οδικών οχημάτων. Μάλιστα, στο πεδίο της κάθετης δυναμικής του οχήματος έχουν γίνει εκατοντάδες, αν όχι χιλιάδες, δημοσιεύσεις κατά τη διάρκεια της σχεδόν σαραντάχρονης ιστορίας του.

3.3 Ορισμός και στόχοι

Ένας γενικός ορισμός της ανάρτησης θα μπορούσε να την καταστήσει ως ένα είδος ελαστικού συνδέσμου, ο οποίος έχει ως θεμελιώδη στόχο να διαχωρίζει τις αναρτημένες μάζες (όπως είναι το πλαίσιο, η μηχανή, οι επιβάτες, κ.ά.) με τις μη αναρτημένες μάζες (δηλαδή οι τροχοί, οι δίσκοι πέδησης, οι άξονες του διαφορικού, κ.ά.) ενός οχήματος. Ήδη από την εποχή των ιππήλατων αμαξών είχε γίνει αντιληπτό ότι ήταν απαραίτητο να παρεμβληθεί αυτό το είδος ελαστικού συνδέσμου ανάμεσα στους τροχούς και το αμάξωμα, ο οποίος σύνδεσμος θα εξασφάλιζε αφενός τέλεια συνοχή (σύνδεση) αμαξώματος και τροχών, και αφετέρου απομόνωση του αμαξώματος από τους κραδασμούς που προέρχονται απ' τις ανωμαλίες του δρόμου.

Αυτός λοιπόν ο ελαστικός σύνδεσμος είναι το *Σύστημα Ανάρτησης*. Κάθε Σύστημα Ανάρτησης αποτελείται από ένα σύνολο μηχανικών αρθρώσεων και συναρμογών, όπου με αυτό το σύνολο συνεργάζονται τα *ελατήρια* (*springs*) και οι *αποσβεστήρες ταλαντώσεων* (των ελατηρίων) ή αλλιώς αποσβεστήρες κραδασμών (που προέρχονται από τις ανωμαλίες του δρόμου) (*dampers*), όπου για τους αποσβεστήρες χρησιμοποιείται στην καθομιλουμένη ο όρος “*αμορτισέρ*”.

Αυτά τα στοιχεία λειτουργούν για να εξασφαλίσουν την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη *ένισχυση* της οδηγικής *άνεσης*, δηλαδή την *μείωση* των *ταλαντώσεων* που φτάνουν στο αμάξωμα και στην καμπίνα των επιβατών, οι οποίες ταλαντώσεις οφείλονται στη διαταραχή του δρόμου, με τη διαταραχή αυτή να αποτελεί την είσοδο στο σύστημα ανάρτησης. Αυτή η μείωση των ταλαντώσεων οφείλεται στον έλεγχο της αυξομείωσης της απόστασης των τροχών από το αναρτημένο κυρίως σώμα του οχήματος. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανάρτηση αυτοκινήτου λειτουργούν επίσης για να εξασφαλίσουν την όσο το δυνατόν *μεγαλύτερη ασφάλεια* στην οδήγηση, τη *βελτίωση* της *συμπεριφοράς* του αυτοκινήτου, αλλά και έναν *ευκολότερο χειρισμό* του οχήματος.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί, λοιπόν, η κατάλληλη ανάρτηση σε ένα όχημα, διαμορφώνεται το ονομαζόμενο *Σύστημα Ανάρτησης*, το οποίο είναι ένα είδος ελαστικού συνδέσμου, όπως αναφέρθηκε πριν, και που θεωρείται ότι εκπληρώνει τον προορισμό του όταν:

- Εξασφαλίζει άνεση στους επιβάτες συνδυασμένη με ασφάλεια στο φορτίο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ρύθμισης της κίνησης του αμαξώματος, αφού ένας από τους ρόλους ενός συστήματος ανάρτησης είναι να απομονώνει το αμάξωμα από τις διαταραχές του εδάφους στο οποίο προσπίπτουν οι τροχοί, όπως επίσης και να απομονώνει το αμάξωμα από τις διαταραχές που σχετίζονται με τις στροφές (*cornering*), οι οποίες προκαλούν διαταραχές στη γωνία *roll* του αμαξώματος, και με την πέδηση/επιτάχυνση, που προκαλούν διαταραχές στη γωνία *pitch* του αμαξώματος.
- Εξασφαλίζει τη συνεχή επαφή των τροχών με το δρόμο και συγχρόνως την ευστάθεια του οχήματος στην πορεία του, μέσω της βέλτιστης διανομής των κάθετων δυνάμεων που ασκούνται από το δρόμο στους τέσσερις τροχούς.
- Συνδέει με ελαστικότητα αλλά και με ομαλότητα, όπως επίσης και με ασφάλεια, τις αναρτημένες με τις μη αναρτημένες μάζες, και μεταδίδει από τις πρώτες στις δεύτερες και αντίστροφα, όλες εκείνες τις δυνάμεις και αντιδράσεις που δημιουργούνται κατά την κίνηση του οχήματος, και οι οποίες γενικά, συνθέτουν τη στατική και δυναμική του κατάσταση, όπως για παράδειγμα τις δυνάμεις του βάρους, της αδράνειας, της επιτάχυνσης, κ.ά..
- Περιορίζει την καταπόνηση των μερών του οχήματος από τους κραδασμούς.

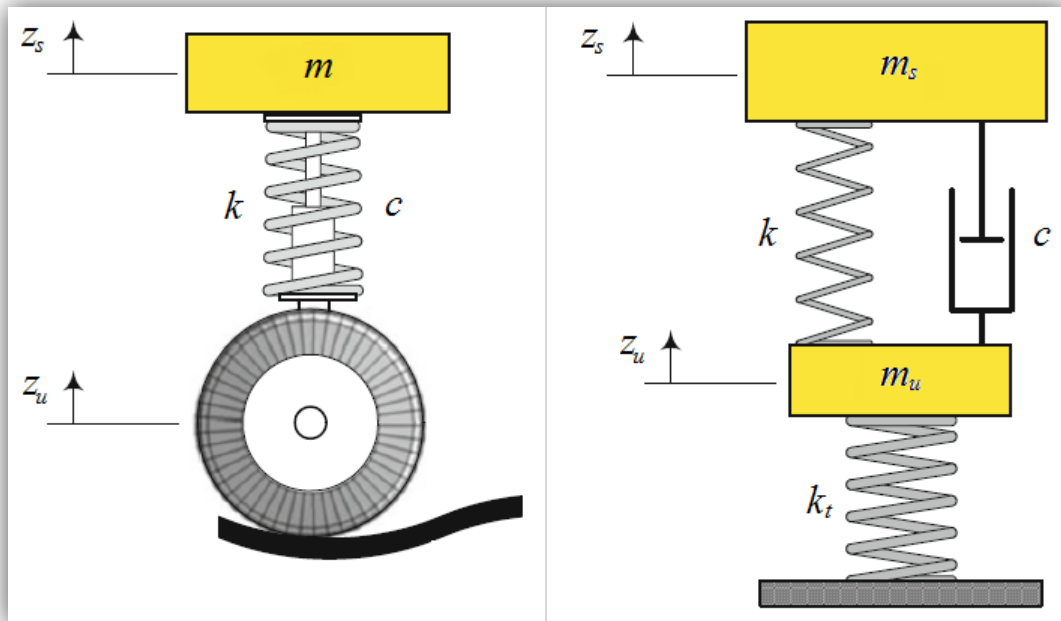
Οι στόχοι αυτοί των συστημάτων ανάρτησης διαμορφώνουν με τη σειρά τους τα κριτήρια απόδοσης της στρατηγικής ελέγχου που εφαρμόστηκε στην εργασία αυτή, τα οποία αναφέρονται στην ενότητα **4.5** του 4^{ου} κεφαλαίου.

3.4 Η γενική διάταξη και η λειτουργία μιας συμβατικής ανάρτησης

Στην προηγούμενη ενότητα δόθηκε ένας ορισμός της ανάρτησης των οχημάτων. Στον ορισμό αυτό αναφέρθηκε ότι το σύστημα της ανάρτησης είναι ένα είδος ελαστικού συνδέσμου, ο οποίος διαχωρίζει τις *αναρτημένες* με τις *μη αναρτημένες* μάζες. Πάνω σε αυτό στηριζόμαστε προκειμένου να παρουσιαστεί και να περιγραφεί η γενική διάταξη ενός συστήματος *συμβατικής* ανάρτησης, δηλαδή μιας ανάρτησης κλασικού τύπου, η οποία έχει την παραδοσιακή της μορφή (παρακάτω θα δούμε ότι αυτή είναι μια “παθητική” ανάρτηση).

Στην **Εικόνα 3.1** παρουσιάζεται η διάταξη αυτή, με τα βασικά μέρη ενός συστήματος ανάρτησης σε μοντέλο ενός τετάρτου του αυτοκινήτου (*quarter car model*). Η εικόνα αυτή χωρίζεται σε δυο μέρη: στο αριστερό μέρος της εικόνας απεικονίζεται η *αναρτημένη μάζα* (m) του αυτοκινήτου, ο *τροχός*, και το *σύστημα ανάρτησης*, το οποίο αποτελείται από το *ελατήριο* το οποίο χαρακτηρίζεται από μια σταθερά ακαμψίας k , και τον *αποσβεστήρα ταλαντώσεων* ο οποίος χαρακτηρίζεται από τον βαθμό απόσβεσης c . Στη διάταξη του δεξιού μέρους της εικόνας υπάρχουν δυο κύρια στοιχεία: το *σύστημα ανάρτησης*, το οποίο αποτελείται από το *ελατήριο* και τον *αποσβεστήρα ταλαντώσεων*, και οι *μάζες* με τις οποίες συνυπάρχει το σύστημα αυτό. Οι μάζες αυτές είναι, όπως και στο αριστερό μέρος της εικόνας, η *αναρτημένη μάζα* (m_s) του αυτοκινήτου, και ο *τροχός* ο οποίος απεικονίζεται ως μια *μη αναρτημένη μάζα* (m_u), του οποίου το ελαστικό χαρακτηρίζεται από μια σταθερά ακαμψίας (k_t), όπως και το ελατήριο.

Παρακάτω περιγράφονται οι μάζες αυτές, και έπειτα την περιγραφή αυτή περιγράφονται τα εξαρτήματα του συστήματος ανάρτησης, η λειτουργία τους και η αλληλεπίδρασή τους με την αναρτημένη και τη μη αναρτημένη μάζα.



Εικόνα 3.1 – Η γενική διάταξη των βασικών μερών μιας συμβατικής ανάρτησης σε μοντέλο ενός τετάρτου του αυτοκινήτου (quarter car model). Στο αριστερό μέρος της εικόνας απεικονίζεται η αναρτημένη μάζα (m) του αυτοκινήτου, το ελατήριο (που χαρακτηρίζεται από τη σταθερά ακαμψίας k), ο αποσβεστήρας ταλαντώσεων (που χαρακτηρίζεται από το βαθμό απόσβεσης c), και ο τροχός. Στο δεξί μέρος της εικόνας ο τροχός απεικονίζεται ως μια μη αναρτημένη μάζα (m_u), του οποίου το ελαστικό χαρακτηρίζεται από μια σταθερά ακαμψίας (k_t), όπως και το ελατήριο.

Οι μάζες του αυτοκινήτου χωρίζονται σε δυο ομάδες, ως συνέπεια της παρεμβολής της ανάρτησης στις μάζες αυτές. Έτσι λοιπόν έχουμε:

- Τις μάζες που υπόκεινται άμεσα τους κραδασμούς που δημιουργούνται απ' την τραχύτητα του εδάφους, όπως είναι οι τροχοί και τα εξαρτήματα που συνδέονται σταθερά με τους τροχούς, με τα εξαρτήματα αυτά να είναι οι άξονες του διαφορικού, οι δίσκοι πέδησης κ.ά.. Οι μάζες αυτές ονομάζονται *μη αναρτημένες μάζες* (m_u - *unsprung mass*).
- Τις μάζες που συνδέονται με τους τροχούς μέσω της ανάρτησης (δηλαδή μέσω του ελατηρίου και του αποσβεστήρα), με τις μάζες αυτές να είναι το πλαίσιο, το αμάξωμα, η μηχανή, το κιβώτιο ταχυτήτων, οι επιβάτες, τα φορτία

κ.ά... Οι μάζες αυτές στηρίζονται στα ελατήρια και ονομάζονται *αναρτημένες μάζες* (m_s - *sprung mass*).

Έπειτα από την περιγραφή των μαζών, σειρά έχει η περιγραφή των εξαρτημάτων του συστήματος της ανάρτησης.

Το *ελατήριο* αποτελεί το κύριο εξάρτημα μιας ανάρτησης και είναι ένα ελαστικό σώμα που καθώς συμπιέζεται και αλλάζει σχήμα, αποθηκεύει μέσα του ένα ποσό μηχανικής (και συγκεκριμένα δυναμικής) ενέργειας και το απελευθερώνει αμέσως μόλις επανέλθει στο αρχικό του σχήμα. Όλα τα ελατήρια χαρακτηρίζονται από το συντελεστή σκληρότητας/ακαμψίας k . Εξετάζουμε τα ελατήρια που διαθέτουν έναν συγκεκριμένο και σταθερό συντελεστή k . Ο συντελεστής αυτός είναι ο λόγος της δύναμης που ασκεί το ελατήριο για να επαναφερθεί στο μήκος ισορροπίας του, προς το μέγεθος της παραμόρφωσης που προκαλείται. Στην υποενότητα **3.4.2** περιγράφεται περαιτέρω αυτός ο συντελεστής k .

Στη γενική διάταξη λοιπόν που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.1**, έχουμε το πλαίσιο του οχήματος το οποίο φέρει το βάρος του κινητήρα, του αμαξώματος, των μηχανικών μερών και των επιβατών. Το πλαίσιο με τη σειρά του στηρίζεται στα ελατήρια, που αποτελούν τη σύνδεση του αυτοκινήτου με τους τροχούς και με το δρόμο. Το βάρος του οχήματος ενεργεί σαν μια αρχική συμπίεση στα ελατήρια. Τα τελευταία θα συμπιεστούν ακόμα περισσότερο, ή θα εκταθούν, καθώς οι τροχοί περνούν πάνω από ανωμαλίες του δρόμου. Οι τροχοί μπορούν να αλλάζουν θέση σχετικά ανεξάρτητα από το πλαίσιο, καθώς τα ελατήρια παραλαμβάνουν ένα μέρος της κίνησης των τροχών. Έτσι, μέσω της ύπαρξης των ελατηρίων, απομονώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο η κίνηση του αμαξώματος από την κίνηση των τροχών. Στην τελευταία παράγραφο περιγράφεται το πώς έρχεται αυτό το αποτέλεσμα της σχετικής απομόνωσης τροχού-αμαξώματος.

Όμως, επειδή τα ελατήρια δημιουργούν ταλαντώσεις στο ίδιο τους το σύστημα, περιλαμβάνονται στο σύστημα ανάρτησης και ειδικά εξαρτήματα απόσβεσης αυτών των ταλαντώσεων των ελατηρίων, αλλά και απόσβεσης των κραδασμών που δημιουργούνται απ' την τραχύτητα του δρόμου. Τα εξαρτήματα αυτά είναι οι *αποσβεστήρες ταλαντώσεων/κραδασμών*, ή αλλιώς “*αμορτισέρ*”. Στα εξαρτήματα αυτά υπάρχει

ένα μικρό έμβολο το οποίο αναγκάζεται σε παλινδρόμηση μέσα σε έναν κύλινδρο γεμάτο με υδραυλικό υγρό κατάλληλου ιξώδους. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αρχή κατά την οποία όταν ένα υγρό συμπιέζεται σε ένα χώρο από ένα έμβολο, τότε το υγρό αυτό περνάει υποχρεωτικά σε ένα άλλο χώρο μέσα από μια μικρή δίοδο (οπή) ή βαλβίδα, με αποτέλεσμα το υγρό να δημιουργεί μια αντίσταση στην κίνηση του εμβόλου, διότι αναπτύσσεται υδραυλική (ιξώδης) τριβή μεταξύ υγρού και εμβόλου. Είναι σαφέστατα αρκετά πιο πολύπλοκα στοιχεία από τα ελατήρια, όμως επικεντρωνόμαστε στο ότι χαρακτηρίζονται και αυτά τα στοιχεία από έναν συντελεστή απόσβεσης (*damping coefficient*), όπου στον αλγόριθμο ελέγχου μας τον συμβολίζουμε με το b , και είναι ένας συντελεστής παρόμοιας σημασίας με αυτόν του ελατηρίου. Υψηλός συντελεστής απόσβεσης σημαίνει μεγάλη μείωση ενέργειας που μεταφέρεται στο αμάξωμα, και επομένως μικρότερη δύναμη που ασκείται από τον αποσβεστήρα στο πλαίσιο. Αντιθέτως, χαμηλός συντελεστής απόσβεσης σημαίνει μικρή μείωση ενέργειας που ασκείται από τον αποσβεστήρα στο πλαίσιο.

Στην υποενότητα **3.4.2** περιγράφεται περαιτέρω ο συντελεστής αυτός. Ανάλογα με τη μεταβλητότητα του συντελεστή αυτού κατηγοριοποιούνται οι αναρτήσεις στην εργασία αυτή, όπως θα δούμε παρακάτω στα είδη των συστημάτων αναρτήσεων των υποενότητων **3.5.1**, **3.5.2**, **3.5.3**. Η Στρατηγική Ελέγχου της εργασίας αυτής εισέρχεται σε αυτό ακριβώς το στοιχείο της συστήματος ανάρτησης, όπου ελέγχονται, όπως θα δούμε παρακάτω, οι δυνάμεις που ασκούν οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων στο αμάξωμα.

3.4.1 Αναρτήσεις και μηχανική ενέργεια

Μέσω της υποενότητας αυτής γίνεται περισσότερο κατανοητή στον αναγνώστη η αλληλεπίδραση ελατηρίου- αποσβεστήρα-(αναρτημένων και μη αναρτημένων) μαζών κατά τη διάρκεια της πορείας ενός οχήματος. Για το λόγο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο αυτή η αλληλεπίδραση αυτή υπό το πρίσμα της

μηχανικής ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ανάρτησης του αυτοκινήτου.

Οι μηχανικές δονήσεις είναι αποτέλεσμα της συνεχούς μετατροπής της κινητικής ενέργειας K σε δυναμική ενέργεια V και αντίστροφα, η οποία μετατροπή γίνεται μέσω του συστήματος ανάρτησης. Όταν η δυναμική ενέργεια είναι μέγιστη, η κινητική ενέργεια είναι μηδέν, και αντιστρόφως. Καθώς λοιπόν εμφανίζονται οι περιοδικές διακυμάνσεις της κινητικής ενέργειας ως μια περιοδική κίνηση ενός ογκώδους σώματος, λαμβάνει χώρα η μετατροπή ενέργειας που αναφέρθηκε προηγουμένως. Αυτή τη μετατροπή ενέργειας την ονομάζουμε μηχανικές δονήσεις. Το μηχανικό στοιχείο το οποίο αποθηκεύει κινητική ενέργεια καλείται μάζα (*mass*), και το μηχανικό στοιχείο το οποίο αποθηκεύει δυναμική ενέργεια καλείται ελατήριο (*spring*). Εάν η συνολική τιμή της μηχανικής ενέργειας $E = K + V$ ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της δόνησης/του κραδασμού, τότε υπάρχει ένα μηχανικό στοιχείο το οποίο απορροφά το ποσό ενέργειας που ελαττώνεται, όπου το στοιχείο αυτό είναι ο αποσβεστήρας ταλαντώσεων/κραδασμών, ή αλλιώς “αμορτισέρ” (*damper*).

Έτσι λοιπόν, εν’ ολίγοις, η διαταραχή του εδάφους στο οποίο προσπίπτει ο τροχός αποτελεί την είσοδο του συστήματος ανάρτησης. Αυτή η διαταραχή δίνει κινητική ενέργεια τους τροχούς. Έτσι, τα ελατήρια που συνδέονται άμεσα με τους τροχούς επιμηκύνονται και συμπιέζονται, με αποτέλεσμα να απορροφούν ένα μέρος της μηχανικής ενέργειας και να το μετατρέπουν σε δυναμική. (Εάν δεν υπήρχαν τα ελατήρια αυτή η κινητική ενέργεια θα μεταφερόταν εξ’ ολοκλήρου στο αμάξωμα και στα μέρη με τα οποία συνδέεται, καθιστώντας έτσι σχεδόν ενιαία την κίνηση τροχών και αμαξώματος, κάτι που θα είχε ιδιαίτερα δυσάρεστες συνέπειες στην οδήγηση, στη συμπεριφορά και τα μέρη του αμαξιού, και κυρίως στην ασφάλεια και την άνεση των επιβατών.) Αυτή η συνεχής μετατροπή ενέργειας που γίνεται καθώς ο τροχός διέρχεται από κάποιες ανωμαλίες του εδάφους, επιφέρει τους κραδασμούς της αναρτημένης μάζας, ή αλλιώς του αμαξώματος και των μερών που συνδέονται με αυτό. Αυτούς τους κραδασμούς τους περιορίζουν οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων/κραδασμών μέσω της κατασκευής τους και του εσωτερικού τους, ελαττώνοντας έτσι τη μηχανική ενέργεια που παράγεται.

3.4.2 Δυνάμεις ελατηρίου και αποσβεστήρα

Στην υποενότητα 3.4.1 εξετάστηκε η αλληλεπίδραση των βασικών στοιχείων ενός συστήματος συμβατικής ανάρτησης υπό το πρίσμα της μηχανικής ενέργειας που παράγεται στο σύστημα αυτό, κατά τη διάρκεια της μεταφορικής κίνησης του οχήματος.

Βέβαια, η μεταφορική κίνηση του οχήματος είναι αποτέλεσμα κάποιας αιτίας. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη το γεγονός ότι ασχολούμαστε με το σύστημα ανάρτησης των οχημάτων, μας ενδιαφέρει η αιτία των διαταραχών του πλαισίου και των τροχών που “προσπαθεί” να εξαλείψει το σύστημα ανάρτησης. Η αιτία αυτή είναι η *δύναμη*. Εξετάζουμε λοιπόν αυτή τη φορά την αλληλεπίδραση ελατηρίου-αποσβεστήρα- (αναρτημένων και μη αναρτημένων) μαζών στο μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου του αυτοκινήτου (*quarter car model*) υπό το πρίσμα της *δύναμης* που ασκούν τα στοιχεία αυτά στην αναρτημένη μάζα κατά τη διάρκεια της πορείας του αυτοκινήτου, με σκοπό να καταλήξουμε αργότερα στον ορισμό της παθητικής, της ημι-ενεργητικής και της ενεργητικής ανάρτησης.

Δύναμη στην Κλασική Μηχανική είναι η αιτία που προκαλεί κάθε μεταβολή της κίνησης ή της γεωμετρίας των σωμάτων. Στην περίπτωση επομένως που ο τροχός του οχήματος προσπίπτει σε ανώμαλο έδαφος, κατά τη διάρκεια της πρόσφυσης αυτής ασκείται *δύναμη* από το έδαφος, λόγω της γεωμετρίας του, στο ελαστικό του τροχού. Η αρχική αιτία όλων των διαταραχών που τείνει να εξαλείψει το σύστημα ανάρτησης, ή αλλιώς η *είσοδος στο σύστημα ανάρτησης* είναι η δύναμη αυτή, η οποία καθορίζεται από τη γεωμετρία του εδάφους και εξαρτάται από τη σταθερά ακαμψίας του ελαστικού. Η δύναμη που ασκείται από το έδαφος στον τροχό προκαλεί τη μεταβολή της κάθετης κίνησης του τροχού, που με τη σειρά του ασκεί δύναμη στο ελατήριο και τον αποσβεστήρα ταλαντώσεων. Ο αποσβεστήρας με τη σειρά του ασκεί δύναμη στο πλαίσιο, με τη δύναμη αυτή να αποτελεί την *έξοδο του συστήματος ανάρτησης*. Το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η δύναμη αυτή καθορίζει το είδος της ανάρτησης, όπως θα δούμε αναλυτικά παρακάτω.

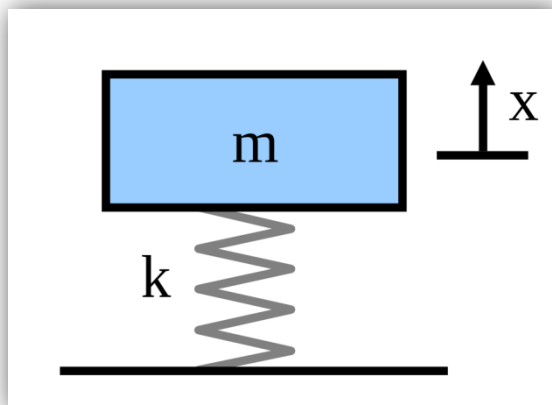
Ας δούμε λοιπόν τώρα τη δύναμη που ασκούν τα βασικά στοιχεία της ανάρτησης στο αμάξωμα, λόγω της δύναμης που ασκεί ο τροχός στα στοιχεία αυτά. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η δύναμη που ασκεί το ελατήριο στο αμάξωμα.

Θεωρούμε ότι έχουμε ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου όπως αυτό που απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.2**. Στο σύστημα αυτό έχουμε μια αναρτημένη μάζα που αναρτάται πάνω σε ένα ελατήριο με συντελεστή ακαμψίας k . Σύμφωνα με το νόμο του *Hooke*, εάν ασκηθεί δύναμη σε ένα ελατήριο η οποία το παραμορφώνει κατά μήκος x και δεν το βγάζει από τα όρια ελαστικότητάς του, τότε ασκείται μια δύναμη

$$F = -kx \quad (3.1)$$

από το ελατήριο, η οποία έχει φορά αντίθετη προς την φορά της παραμόρφωσής του, και κατ' επέκταση η δύναμη αυτή έχει φορά αντίθετη προς τη φορά μετατόπισης της μάζας. Στο σύστημα της εικόνας η δύναμη αυτή ασκείται στη μάζα η οποία αναρτάται πάνω σε αυτό. Η δύναμη αυτή λοιπόν το ωθεί προς τα πίσω και είναι γραμμικά ανάλογη με την απόσταση από το μήκος ισορροπίας του ελατηρίου. Αυτή η παραμόρφωση x του ελατηρίου είναι ίση με τη μετατόπιση x της αναρτημένης πάνω στο ελατήριο μάζας.

Κάθε ελατήριο διαθέτει έναν συγκεκριμένο συντελεστή σκληρότητας/ακαμψίας k , ο οποίος είναι ο λόγος της δύναμης F που ασκεί το ελατήριο για να επαναφερθεί στο μήκος ισορροπίας του, προς το μήκος της παραμόρφωσης x που προκαλείται στο ελατήριο αυτό. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την κατασκευή και το υλικό του ελατηρίου, και η μονάδα μέτρησής του είναι N/m . Ο λόγος αυτός εκφράζει το κατά πόσο πολύ αυξάνεται η σκληρότητα/ακαμψία του ελατηρίου ανάλογα με τη μεταβολή του μήκους του, δηλαδή το κατά πόσο αυξάνεται η δύναμη που ασκεί το ελατήριο, η οποία τείνει να το επαναφέρει στο αρχικό του μήκος, καθώς επιμηκύνεται ή συμπιέζεται.



Εικόνα 3.2 – Σύστημα μάζας-ελατηρίου

Μετά από τη δύναμη του ελατηρίου, έχουμε τη δύναμη του δεύτερου βασικού στοιχείου μιας συμβατικής ανάρτησης: αυτή του αποσβεστήρα ταλαντώσεων.

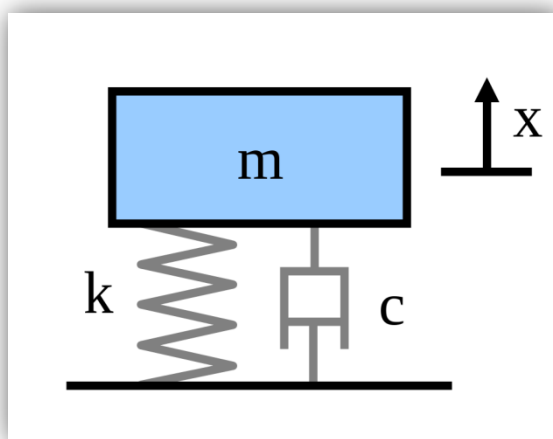
Στο σύστημα της εικόνας 3.2 προσθέτουμε έναν αποσβεστήρα ταλαντώσεων με συντελεστή απόσβεσης c , έχοντας έτσι ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα (*mass-spring-damper*), το οποίο απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.3**. Εάν ασκηθεί δύναμη στον αποσβεστήρα η οποία του μεταβάλλει το μήκος κατά x , τότε ασκείται μια δύναμη

$$F_d = -cu = -c \frac{dx}{dt} \quad (3.2)$$

από τον αποσβεστήρα (*damping force*), η οποία έχει φορά αντίθετη προς την φορά μεταβολής του μήκους του, και κατ' επέκταση η δύναμη αυτή έχει φορά αντίθετη προς τη φορά μετατόπισης της μάζας. Στο σύστημα της εικόνας η δύναμη αυτή ασκείται στη μάζα η οποία αναρτάται πάνω στον αποσβεστήρα και το ελατήριο. Η δύναμη αυτή είναι γραμμικά ανάλογη με τη χρονική παράγωγο της απόστασης από το μήκος που είχε ο αποσβεστήρας πριν ασκηθεί η δύναμη αυτή, ή αλλιώς, είναι γραμμικά ανάλογη με την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η απόσταση αυτή. Αυτή η μεταβολή x του μήκους του αποσβεστήρα στο σύστημα αυτό είναι ίση με την παρα-

μόρφωση x του ελατηρίου, η οποία είναι ίση με τη μετατόπιση x της αναρτημένης μάζας.

Κάθε αποσβεστήρας ταλαντώσεων διαθέτει έναν συγκεκριμένο συντελεστή σκληρότητας/ακαμψίας c , ο οποίος είναι ο λόγος της δύναμης F_d που ασκεί ο αποσβεστήρας για να επαναφερθεί στο μήκος ισορροπίας του, προς την ταχύτητα u με την οποία μεταβάλλεται η απόσταση από το αρχικό μήκος του αποσβεστήρα. Ο λόγος αυτός εκφράζει το κατά πόσο πολύ αυξάνεται η απόσβεση της ταλάντωσης του ελατηρίου μέσω του αποσβεστήρα, (η οποία γίνεται μέσω της αντίστασης υγρού που υπάρχει στο εσωτερικό του), ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται το μήκος του αποσβεστήρα. Με λίγα λόγια, υψηλός συντελεστής απόσβεσης σημαίνει μεγάλη μείωση ενέργειας που μεταφέρεται στο αμάξωμα και επομένως μικρότερη δύναμη που ασκείται από τον αποσβεστήρα στο πλαίσιο. Αντιθέτως, χαμηλός συντελεστής απόσβεσης σημαίνει μικρή μείωση ενέργειας που ασκείται από τον αποσβεστήρα στο πλαίσιο. Η μονάδα μέτρησής του είναι Ns/m , και εμείς στην εργασία αυτή τον συμβολίζουμε όπου τον χρησιμοποιούμε στον αλγόριθμο ελέγχου με το b .



Εικόνα 3.3 – Σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα

Το μοντέλο ενός τετάρτου του αυτοκινήτου (*quarter car model*) το οποίο χρησιμοποιούμε για την περιγραφή, τη μελέτη, και την κατηγοριοποίηση των συστημά-

των ανάρτησης του κεφαλαίου αυτού, αντιπροσωπεύει ένα σύστημα όπως αυτό της εικόνας 3.3, με τη διαφορά ότι στο μοντέλο ενός τετάρτου του αυτοκινήτου έχουμε μάζες που χωρίζονται σε αναρτημένες και μη αναρτημένες. Επομένως, οι δυνάμεις που παράγονται στο μοντέλο αυτό είναι οι δυνάμεις του ελατηρίου και του αποσβεστήρα που έχουν περιγραφτεί στην υποενότητα αυτή.

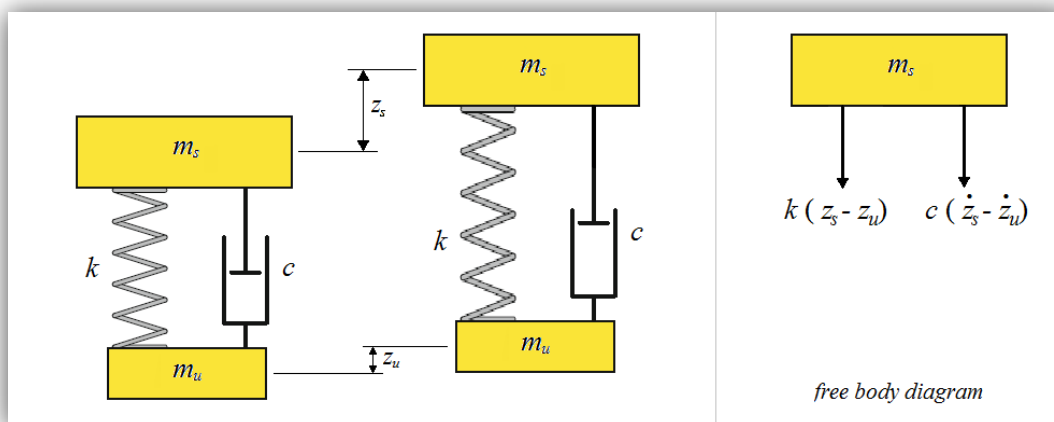
Έστω ότι στο μοντέλο ενός τετάρτου του αυτοκινήτου η μάζα m_u μετατοπίζεται κάθετα προς τα πάνω κατά z_u από τη θέση ισορροπίας της, και ότι η μάζα m_s μετατοπίζεται κάθετα προς τα πάνω κατά z_s από τη θέση ισορροπίας της. Τότε, παράγονται οι δυνάμεις του ελατηρίου με μέτρο

$$F = k(z_s - z_u) \quad (3.3)$$

και του αποσβεστήρα με μέτρο

$$F_d = c(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (3.4)$$

με τη φορά προς τα κάτω, όπως απεικονίζεται στο δεξί μέρος της **Εικόνα 3.4**, με το μέρος αυτό να είναι το διάγραμμα ελευθέρου σώματος (*free body diagram*) της αναρτημένης μάζας του αριστερού μέρους της εικόνας αυτής.



Εικόνα 3.4 – Στο αριστερό και το μεσαίο κομμάτι της εικόνας απεικονίζεται η θέση ισορροπίας και η μετατοπισμένη θέση της αναρτημένης και της μη αναρτημένης μάζας. Στο δεξί μέρος της εικόνας έχουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος (free body diagram) της αναρτημένης μάζας.

Έτσι λοιπόν, στο σημείο της υποενότητας αυτής, είμαστε έτοιμοι να δούμε τι είναι αυτό που ελέγχεται στην εργασία αυτή.

Η στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής βρίσκει και εφαρμόζει έμμεσα το βέλτιστο συντελεστή απόσβεσης c του αποσβεστήρα ταλαντώσεων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του τροποποιημένου (από μέρους μας) μοντέλου οχήματος του *veDYNA*. Το μοντέλο αυτό συμπεριλαμβάνει τη στρατηγική αυτή, η οποία καθορίζει και την προσομοιωμένη συμπεριφορά του οχήματος.

Είδαμε ωστόσο ότι ο συντελεστής αυτός είναι ο λόγος της δύναμης F_d που ασκεί ο αποσβεστήρας για να επαναφερθεί στο μήκος ισορροπίας του, προς την ταχύτητα u με την οποία μεταβάλλεται η απόσταση από το αρχικό μήκος του αποσβεστήρα. Σε μια σχέση ταχύτητας u - δύναμης F_d , η ταχύτητα u είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και η δύναμη F_d είναι η εξαρτημένη μεταβλητή. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά του αποσβεστήρα καθορίζεται από τη δύναμη F_d που ασκεί ο αποσβεστήρας σε συνάρτηση με την ταχύτητα u .

Η στρατηγική ελέγχου λοιπόν της εργασίας αυτής βρίσκει άμεσα τη ρυθμισμένη και βέλτιστη δύναμη F_d που ασκεί ο αποσβεστήρας στο αμάξωμα (που όπως θα δούμε, στην περίπτωσή μας η δύναμη αυτή δεν είναι στην ουσία συναρτήσει της ταχύτητας u). Κάτι τέτοιο επιτυγχάνει τη ρυθμισμένη και βελτιωμένη συμπεριφορά ενός

συστήματος ανάρτησης αυτοκινήτου. Αυτό που τροποποιείται από μέρους μας είναι αυτή ακριβώς η δύναμη του αρχικού και μη τροποποιημένου αποσβεστήρα ταλαντώσεων του *veDYNA*.

3.5 Κατηγορίες συστημάτων ανάρτησης

Μπορούν να γίνουν διάφοροι διαχωρισμοί των συστημάτων ανάρτησης ανάλογα με τη γεωμετρία της ανάρτησης, αλλά και ανάλογα με το είδος, τα χαρακτηριστικά, και τις ιδιότητες των στοιχείων της. Ο σκοπός και η υλοποίηση της παρούσας εργασίας μας οδηγεί στην κατηγοριοποίηση των συστημάτων ανάρτησης ανάλογα με τον έλεγχο της ενέργειας που καταναλώνεται ή παράγεται στα συστήματα αυτά. Έτσι λοιπόν έχουμε τα:

- Συστήματα παθητικής ανάρτησης (*passive suspension*)
- Συστήματα ημι-ενεργητικής ανάρτησης (*semi-active suspension*)
- Συστήματα ενεργητικής ανάρτησης (*active suspension*)

Είναι χρήσιμο να αρχίσει η περιγραφή αυτής της κατηγοριοποίησης αναλύοντας το κομμάτι “ανάλογα με τον έλεγχο της ενέργειας που καταναλώνεται ή παράγεται στα συστήματα αυτά” της προηγούμενης παραγράφου.

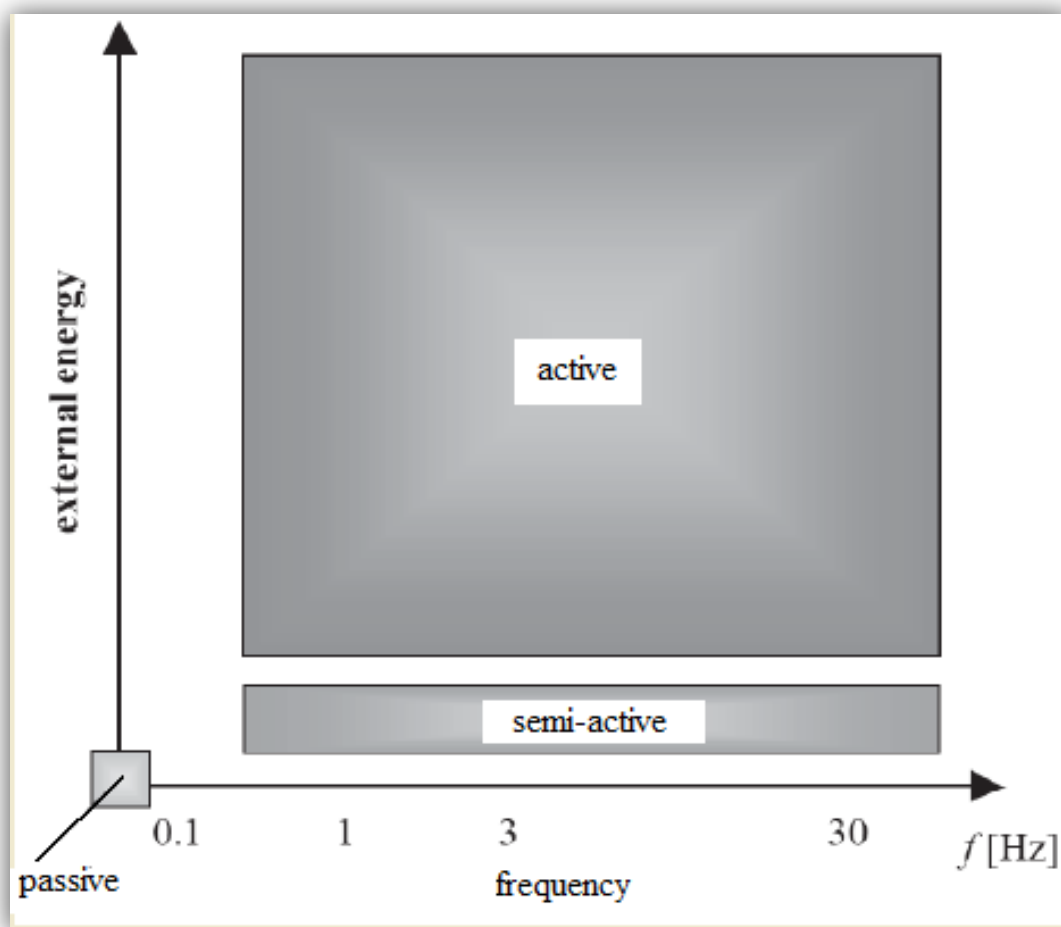
Ο έλεγχος της ενέργειας που αναφέρθηκε προηγουμένως αφορά τα συστήματα ενεργητικής και ημι-ενεργητικής ανάρτησης, διότι στα συστήματα παθητικής ανάρτησης, όπως θα δούμε παρακάτω, ο έλεγχος αυτός είναι μηδενικός. Η ενέργεια που καταναλώνεται και ελέγχεται αφορά τα συστήματα ημι-ενεργητικής ανάρτησης, και η ενέργεια που ελέγχεται και παράγεται αφορά τα συστήματα ενεργητικής ανάρτησης.

Έχουμε λοιπόν ενέργεια που καταναλώνεται στα συστήματα παθητικής ανάρτησης, ενώ στα συστήματα ημιενεργητικής ανάρτησης έχουμε κυρίως ενέργεια που καταναλώνεται, με ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας να παράγεται μέσω του ελέγχου της ενέργειας που καταναλώνεται. Η διαφορά λοιπόν μεταξύ αυτών των δυο συστημάτων

είναι ότι στην *ημιενεργητική* ανάρτηση η ενέργεια που καταναλώνεται *ελέγχεται* (με αποτέλεσμα να παράγεται ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας), ενώ στην *παθητική* δεν παράγεται ενέργεια, μόνο *καταναλώνεται*, η οποία ενέργεια *δεν ελέγχεται* και είναι καθορισμένη.

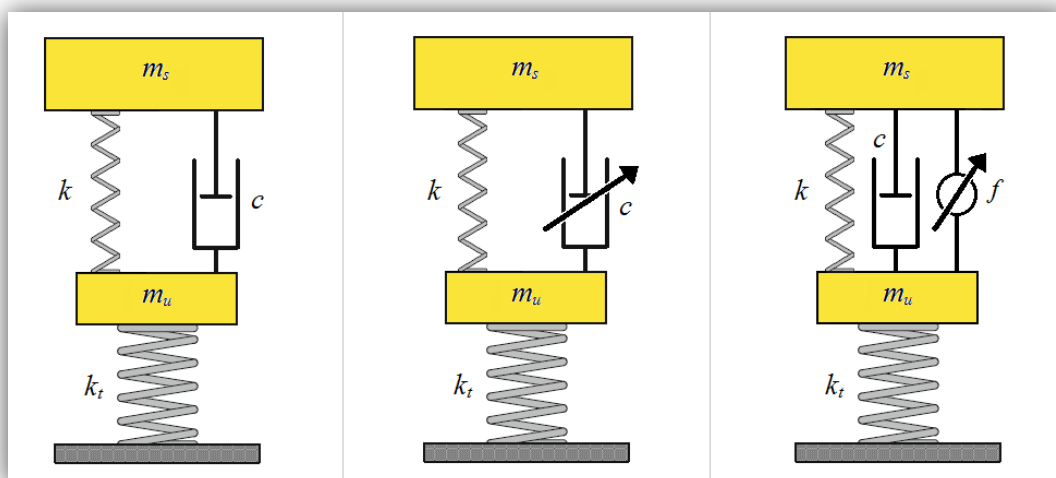
Στα συστήματα *ενεργητικής* ανάρτησης έχουμε ενέργεια η οποία *καταναλώνεται*, αλλά και ενέργεια η οποία *παράγεται*, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δυο συστήματα αυτής της κατηγοριοποίησης όπου είτε *δεν παράγεται* ενέργεια (σύστημα *παθητικής* ανάρτησης), είτε παράγεται *ελάχιστο* ποσό ενέργειας (σύστημα *ημι-ενεργητικής* ανάρτησης). Η ενέργεια της ενεργητικής ανάρτησης που *παράγεται* είναι και αυτή η οποία *ελέγχεται*.

Στην **Εικόνα 3.5** απεικονίζεται το εύρος της ενέργειας η οποία παράγεται στα τρία αυτά είδη συστημάτων ανάρτησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα των δονήσεων που εισέρχονται στα συστήματα αυτά. Στην *παθητική* ανάρτηση η ενέργεια αυτή είναι μηδενική αφού είδαμε ότι δεν παράγεται ενέργεια. Στην *ημιενεργητική* η ενέργεια που παράγεται είναι ελάχιστη, ενώ στην *ενεργητική* το εύρος της ενέργειας είναι μεγάλο. Στα δυο τελευταία είδη παρατηρείται ότι η ενέργεια που παράγεται “αγγίζει” όλες τις συχνότητες των δονήσεων, αφού ο έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτά φροντίζει να βελτιώνει την οδηγική άνεση και την ευστάθεια του αυτοκινήτου για κάθε συχνότητα δονήσεων. Σε αντίθεση με αυτά τα δυο συστήματα, το σύστημα *παθητικής* ανάρτησης δεν “αγγίζει” κάποιο εύρος συχνοτήτων, αφού δε βελτιώνει κάποια στοιχεία, όπως κάνουν τα άλλα δυο συστήματα, και η συμπεριφορά του είναι προκαθορισμένη, “αγνοώντας” έτσι οποιαδήποτε συχνότητα δονήσεων.



Εικόνα 3.5 – Το εύρος της ενέργειας η οποία παράγεται στα τρία είδη συστημάτων ανάρτησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα των δονήσεων που εισέρχονται σε αυτά. Στην παθητική ανάρτηση η ενέργεια αυτή είναι μηδενική, στην ημιενεργητική είναι ελάχιστη, ενώ στην ενεργητική το εύρος της ενέργειας είναι μεγάλο.

Στο σημείο αυτό περνάμε σε μια περαιτέρω περιγραφή του περιεχομένου των προηγούμενων παραγράφων της ενότητας αυτής. Για το σκοπό αυτό αρχίζουμε με την περιγραφή της λειτουργίας του κάθε τύπου συστήματος ανάρτησης, με βάση τη γενική διάταξη του κάθε τύπου στην απεικόνιση της **Εικόνα 3.6**.



Εικόνα 3.6 – Η γενική διάταξη των τριων συστημάτων ανάρτησης που μελετάμε. Στο αριστερό κομμάτι της εικόνας έχουμε την παθητική ανάρτηση, στο μεσαίο κομμάτι της εικόνας έχουμε την ημι-ενεργητική ανάρτηση, και στο δεξί κομμάτι της εικόνας έχουμε την ενεργητική ανάρτηση.

Το σύστημα που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της **Εικόνα 3.6** είναι ένα σύστημα *παθητικής* ανάρτησης, το σύστημα που βρίσκεται στο μεσαίο κομμάτι της εικόνας αυτής είναι ένα σύστημα *ημι-ενεργητικής* ανάρτησης, και στο δεξί κομμάτι της εικόνας έχουμε ένα σύστημα *ενεργητικής* ανάρτησης.

Φυσικά, και τα τρία αυτά είδη αναρτήσεων περιέχουν σαν βασικά στοιχεία το *ελατήριο* και τον *αποσβεστήρα ταλαντώσεων*, τα στοιχεία δηλαδή που περιγράφηκαν συνοπτικά στην ενότητα **3.4**, με τα χαρακτηριστικά τους να περιγράφονται περαιτέρω στην ενότητα **3.4.2**.

Το ελατήριο δεν καθορίζει κάποιον από αυτούς τους τύπους αναρτήσεων που μελετάμε, και χαρακτηρίζεται, όπως είδαμε, από το συντελεστή ακαμψίας k , ο οποίος (στα συγκεκριμένα είδη αναρτήσεων) εξαρτάται αποκλειστικά από την κατασκευή του ελατηρίου. Στη συγκεκριμένη λοιπόν κατηγοριοποίηση των συστημάτων αναρτήσεων που γίνεται στα πλαίσια της εργασίας αυτής, η συμπεριφορά του αποσβεστήρα ταλαντώσεων είναι αυτή η οποία καθορίζει το αν έχουμε παθητική, ημι-ενεργητική, ή ενεργητική ανάρτηση. Επομένως, σε αυτή την ενότητα μας ενδιαφέρει μόνο η συμπεριφορά του αποσβεστήρα ταλαντώσεων στο κάθε σύστημα.

Περνάμε λοιπόν στην **Εικόνα 3.6**. Η *παθητική* ανάρτηση ταυτίζεται με τη συμβατική ανάρτηση, την κλασική δηλαδή ανάρτηση που έχει εγκατασταθεί στα συμβατικά οχήματα. Γι' αυτό το λόγο, η εικόνα της παθητικής ανάρτησης στην εικόνα αυτή είναι η ίδια με το δεξί κομμάτι της **Εικόνα 3.1**. Η *ημιενεργητική* ανάρτηση έχει τον αποσβεστήρα ο οποίος ελέγχεται μέσα από μια Στρατηγική Ελέγχου. Αυτό τον έλεγχο δηλώνει το βέλος “↗” πάνω στον αποσβεστήρα της εικόνας. Η *ενεργητική* ανάρτηση περιέχει τον παθητικό αποσβεστήρα ταλαντώσεων και ένα μηχανικό στοιχείο, τον *ενεργοποιητή/επενεργητή (actuator)*. Ο *ενεργοποιητής/επενεργητής* είναι το στοιχείο το οποίο προσδίδει επιπλέον ενέργεια στο σύστημα, και το οποίο ελέγχεται μέσω μιας *Στρατηγικής Ελέγχου*. Αυτόν τον έλεγχο δηλώνει και το βέλος “↗” της εικόνας πάνω στον ενεργοποιητή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να απαντηθεί το ερώτημα “*ποιον ακριβώς έλεγχο δηλώνει αυτό το βέλος, και γενικά για ποιον έλεγχο και για ποια ενέργεια μιλάμε;*”

Ο έλεγχος αυτός είναι ο έλεγχος της *δύναμης* που ασκεί ο αποσβεστήρας ταλαντώσεων στο αμάξωμα, και η *ενέργεια* η οποία αναφέρεται στις παραπάνω παραγράφους της ενότητας αυτής αφορά την ενέργεια που παράγει η δύναμη αυτή, δηλαδή τη *μηχανική ενέργεια*. Η δύναμη αυτή του αποσβεστήρα περιγράφεται και αναλύεται στην ενότητα **3.4.2**. Στην ενότητα 3.4.2 αναφέρθηκε ότι με βάση τη στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής, ελέγχεται έμμεσα ο συντελεστής απόσβεσης c του αποσβεστήρα ταλαντώσεων, και άμεσα η δύναμη F_d που ασκεί ο αποσβεστήρας στο αμάξωμα.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να προχωρήσουμε στον ορισμό των τριών αυτών ειδών συστημάτων ανάρτησης :

Το *σύστημα παθητικής ανάρτησης* είναι ένα συμβατικό σύστημα ανάρτησης στο οποίο δεν παράγεται ενέργεια, μόνο καταναλώνεται. Περιέχει έναν μη ελεγχόμενο αποσβεστήρα ταλαντώσεων, ο οποίος έχει την ιδιότητα να έχει προκαθορισμένη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του συστήματος αυτού. Ο αποσβεστήρας κατά τη διάρκεια αυτή λειτουργεί ασκώντας δυνάμεις προκαθορισμένου μέτρου, οι οποίες δυνάμεις εξαρτώνται *αποκλειστικά* από την ταχύτητα u του αποσβεστήρα. Αυτό σημαίνει ότι η κάθετη μετατόπιση των τροχών καθορίζεται *αποκλειστικά* από την επιφάνεια του εδάφους στο οποίο προσπίπτουν οι τροχοί. Η χαρα-

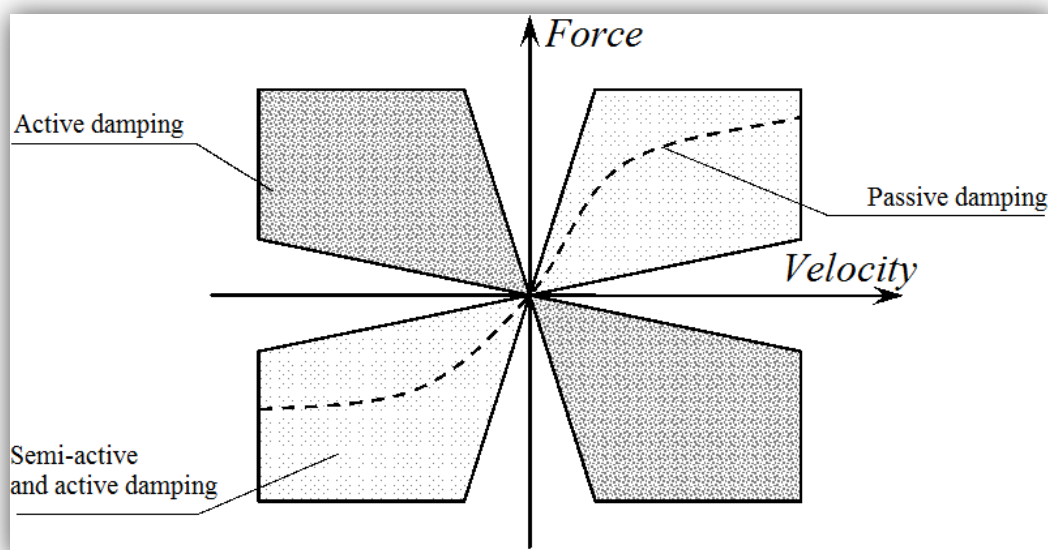
κτηριστική της σχέσης δύναμης-ταχύτητας (*damper force-velocity characteristic*) του αποσβεστήρα είναι μη γραμμική (*non-linear*). Ο συντελεστής απόσβεσης μεταβάλλεται με βάση αυτή τη χαρακτηριστική, παίρνοντας έτσι ο συντελεστής αυτός (και κατ' επέκταση οι δυνάμεις) προκαθορισμένες τιμές, καθιστώντας έτσι *μη ελεγχόμενο* τον αποσβεστήρα. Το μη τροποποιημένο (απ' το χρήστη) μοντέλο οχήματος του *veDYNA* είναι ένα σύστημα παθητικής ανάρτησης, το οποίο και τροποποιούμε μετατρέποντάς το σε σύστημα ενεργητικής ανάρτησης. Περαιτέρω ανάλυση των συστημάτων αυτών γίνεται στην ενότητα **3.5.1**, με την παθητική ανάρτηση του *veDYNA* να παρουσιάζεται και να περιγράφεται στην υποενότητα **3.5.1.1**.

Το *σύστημα ημι-ενεργητικής ανάρτησης* είναι ένα σύστημα ανάρτησης στο οποίο καταναλώνεται ενέργεια, και παράγεται ένα *ελάχιστο* ποσό ενέργειας. Περιέχει έναν ελεγχόμενο αποσβεστήρα ταλαντώσεων, του οποίου η δύναμη που ασκεί στο αμάξωμα ρυθμίζεται μέσα από κάποια *τεχνική ελέγχου*. Αυτό σημαίνει ότι ο αποσβεστήρας δεν έχει την προκαθορισμένη συμπεριφορά του αποσβεστήρα του παθητικού συστήματος, αφού η κάθετη μετατόπιση των τροχών δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την επιφάνεια του εδάφους στο οποίο προσπίπτουν οι τροχοί. Η μετατόπιση αυτή ρυθμίζεται και βελτιώνεται έπειτα από την τεχνική ελέγχου υπό την οποία λειτουργεί ο αποσβεστήρας. Αυτή η ελεγχόμενη λειτουργία του αποσβεστήρα εφαρμόζει τις βέλτιστες δυνάμεις που ασκούνται στο αμάξωμα, με στόχο τη βελτίωση της οδηγικής άνεσης και της ευστάθειας του αυτοκινήτου σε σχέση με το παθητικό σύστημα. Παρακάτω στην ενότητα αυτή θα δούμε τις χαρακτηριστικές *damper force-velocity* ενός συστήματος ημιενεργητικής ανάρτησης, και τη σύγκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών των τριών ειδών αναρτήσεων. Περαιτέρω ανάλυση των συστημάτων αυτών γίνεται στην ενότητα **3.5.2**.

Το *σύστημα ενεργητικής ανάρτησης* είναι ένα σύστημα ανάρτησης στο οποίο όχι μόνο καταναλώνεται, αλλά και παράγεται ενέργεια. Περιέχει έναν μη ελεγχόμενο αποσβεστήρα ταλαντώσεων και έναν ενεργοποιητή (*actuator*), ο οποίος προσδίδει επιπλέον ενέργεια στο σύστημα μέσω της επιπλέον δύναμης που παράγει και ασκεί στο αμάξωμα. Η δύναμη που παράγει ο ενεργοποιητής ρυθμίζεται μέσα από κάποια *τεχνική ελέγχου*, και προστίθεται στη δύναμη που ασκεί ο παθητικός αποσβεστήρας στο αμάξωμα. Αυτός ο παθητικός αποσβεστήρας ταλαντώσεων μπορεί από μόνος

του να έχει προκαθορισμένη συμπεριφορά, όμως η παρουσία του ενεργοποιητή στο σύστημα ενεργητικής ανάρτησης βελτιώνει σημαντικά την οδηγική άνεση και την ευστάθεια του αυτοκινήτου σε σχέση με τα συστήματα παθητικής και ημιενεργητικής ανάρτησης. Αυτό συμβαίνει επειδή με την ύπαρξη του ενεργοποιητή, η κάθετη μετατόπιση των τροχών δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την επιφάνεια του εδάφους στο οποίο προσπίπτουν οι τροχοί. Η μετατόπιση αυτή ρυθμίζεται έπειτα από την τεχνική ελέγχου υπό την οποία λειτουργεί ο ενεργοποιητής. Αυτή η ελεγχόμενη λειτουργία του ενεργοποιητή παράγει τις βέλτιστες προσθετικές δυνάμεις στο αμάξωμα. Παρακάτω θα δούμε τις χαρακτηριστικές *damper force-velocity* ενός συστήματος ενεργητικής ανάρτησης, και τη σύγκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών των τριών ειδών αναρτήσεων. Περαιτέρω ανάλυση των συστημάτων αυτών γίνεται στην ενότητα 3.5.3.

Στην **Εικόνα 3.7** παρουσιάζεται το εύρος των *Force-Velocity* χαρακτηριστικών των αποσβεστήρων ταλαντώσεων για την περίπτωση της ημιενεργητικής απόσβεσης (*semi-active damping*) και για την περίπτωση της ενεργητικής απόσβεσης (*active damping*).



Εικόνα 3.7 – Το εύρος των *Force-Velocity* χαρακτηριστικών των αποσβεστήρων ταλαντώσεων για την περίπτωση της ημιενεργητικής απόσβεσης (*semi-active damping*) και για την περίπτωση της ενεργητικής απόσβεσης (*active damping*)

Η παθητική απόσβεση (*passive damping*) δεν έχει κάποιο εύρος στη χαρακτηριστική, αφού όπως είδαμε η συμπεριφορά των συστημάτων παθητικής ανάρτησης είναι προκαθορισμένη, και εξαρτάται αποκλειστικά απ' την επιφάνεια του εδάφους στο οποίο προσπίπτουν οι τροχοί. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των αποσβεστήρων των παθητικών αναρτήσεων λοιπόν δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων με τις αναρτήσεις αυτές. Το μόνο που παρατηρείται να μεταβάλλεται στο διάγραμμα αυτό είναι η γραμμικότητα της χαρακτηριστικής αυτής σε συνάρτηση με την ταχύτητα.

Ο χώρος του 1^{ου} και 3^{ου} τεταρτημορίου σε αυτό το δισδιάστατο επίπεδο αφορά την ημιενεργητική απόσβεση. Η ημιενεργητική ανάρτηση, όπως περιγράφηκε παραπάνω, περιλαμβάνει ένα στοιχείο απόσβεσης του οποίου ο συντελεστής, και κατ' επέκταση η δύναμη, μπορεί να μεταβάλλεται σε πραγματικό χρόνο, μέσω της διαδικασίας ελέγχου υπό την οποία λειτουργεί το στοιχείο αυτό. Αυτό φέρει σαν αποτέλεσμα το εύρος της χαρακτηριστικής καμπύλης του στοιχείου απόσβεσης να αλλάζει. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι το εύρος αυτό δε θα περιορίζεται στο δισδιάστατο επίπεδο της εικόνας αυτής. Η παρέμβαση του στοιχείου ελέγχου στο σύστημα ημιενεργητικής ανάρτησης περιορίζει τις δυνάμεις ελέγχου του αποσβεστήρα. Ο περιορισμός αυτός ισχύει με το να δίνει το στοιχείο ελέγχου στις δυνάμεις αυτές την ίδια κατεύθυνση τη χρονική στιγμή t της λειτουργίας του συστήματος, με την κατεύθυνση που θα είχαν οι δυνάμεις του παθητικού αποσβεστήρα την ίδια αυτή χρονική στιγμή t . Αυτός ο περιορισμός λοιπόν εξηγεί τις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος ημιενεργητικής ανάρτησης.

Στην περίπτωση της ενεργητικής ανάρτησης παρατηρείται ότι το εύρος της χαρακτηριστικής είναι αυτό της ημιενεργητικής ανάρτησης, το οποίο επεκτείνεται στο 2^ο και 4^ο τεταρτημόριο, καταλαμβάνοντας έτσι το εύρος αυτό όλα τα τεταρτημόρια του δισδιάστατου επιπέδου. Η διαφορά σε σχέση με την περίπτωση της ημιενεργητικής απόσβεσης είναι ότι στο 2^ο και στο 4^ο τεταρτημόριο καλύπτονται οι συνθήκες υπό τις οποίες το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης απαιτεί την παραγωγή επιπλέον ενέργειας. Το στοιχείο ελέγχου του ενεργοποιητή “φροντίζει” για τη βέλτιστη δύναμη που θα ασκήσει ο αποσβεστήρας. Μέσω του ενεργοποιητή, ο οποίος παράγει επιπλέον ενέργεια, η τιμή της δύναμης αυτής μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε τε-

ταρτημόριο. Αυτό σημαίνει ότι μέσω του ενεργοποιητή παράγονται δυνάμεις αποσβεστήρα με την ίδια ή με την αντίθετη κατεύθυνση τη χρονική στιγμή t της λειτουργίας του συστήματος, που θα είχαν οι δυνάμεις του παθητικού αποσβεστήρα την ίδια αυτή χρονική στιγμή t . Αυτή η επέκταση του εύρους της χαρακτηριστικής της ενεργητικής απόσβεσης εξηγεί τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος ενεργητικής ανάρτησης.

3.5.1 Σύστημα Παθητικής Ανάρτησης

Τα συστήματα παθητικής ανάρτησης είναι τα συμβατικά και τα πιο απλά συστήματα ανάρτησης, και υπάρχουν στα περισσότερα συμβατικά οχήματα.

Ο όρος “παθητικότητα” (*passivity*) εισέρχεται στα συστήματα ελέγχου, χαρακτηρίζοντας ένα στοιχείο που έχει παθητικότητα ως “παθητικό” (*passive component*), και δηλώνει την αποκλειστική κατανάλωση (και όχι παραγωγή) ενέργειας, δηλαδή την απουσία εξωτερικών πηγών ενέργειας. Αυτό αντανακλά και η σχέση (ή η χαρακτηριστική) δύναμης-ταχύτητας αποσβεστήρα.

Το πλεονέκτημά του συγκεκριμένου τύπου ανάρτησης είναι η απλότητα του σχεδιασμού, γεγονός που έχει άμεσο αντίκτυπο στο κόστος κατασκευής. Η παθητική ανάρτηση τυπικά περιλαμβάνει ένα ελαστικό στοιχείο, το οποίο χαρακτηρίζει μία γραμμική ή μη γραμμική ελαστικότητα, και ένα στοιχείο απόσβεσης με μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Με λίγα λόγια, για τη μοντελοποίηση και τη σχεδίαση μιας παθητικής ανάρτησης χρησιμοποιούνται μόνο ένα ελατήριο και ένας αποσβεστήρας.

Το κυριότερο όμως μειονέκτημα των παθητικών αναρτήσεων είναι ότι η μόνη ελευθερία στη μοντελοποίηση και το σχεδιασμό τους υπάρχει στην επιλογή των δυο παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των συστημάτων αυτών, από τα αρχικά στάδια της μοντελοποίησης και του σχεδιασμού μέχρι και τα τελικά στάδια ανάπτυξης των συστημάτων αυτών. Οι δυο αυτές παράμετροι είναι η ακαμψία του ελατηρίου και ο βαθμός απόσβεσης του αποσβεστήρα. Κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας μιας παθητικής ανάρτησης αυτές οι παράμετροι παραμένουν σταθερές.

Αφενός η σταθερότητα αυτή των παραμέτρων του συστήματος παθητικής ανάρτησης θεωρείται πλεονέκτημα απ' τη στιγμή που η κατασκευή του μπορεί να γίνει απλή, αλλά αφετέρου αυτή η ανάρτηση του οχήματος δεν θα αποδώσει με το βέλτιστο τρόπο σαν απόκριση στις εισόδους του παθητικού συστήματος.

Σε ένα ιδανικό σύστημα ανάρτησης, η ανάρτηση θα πρέπει να είναι μαλακή για την οδηγική άνεση, ενώ θα πρέπει παράλληλα να είναι σκληρή για την ευστάθεια του οχήματος. Στο παθητικό σύστημα ανάρτησης δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, και γενικότερα η παθητική ανάρτηση δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις κάποιων περιπτώσεων οδήγησης.

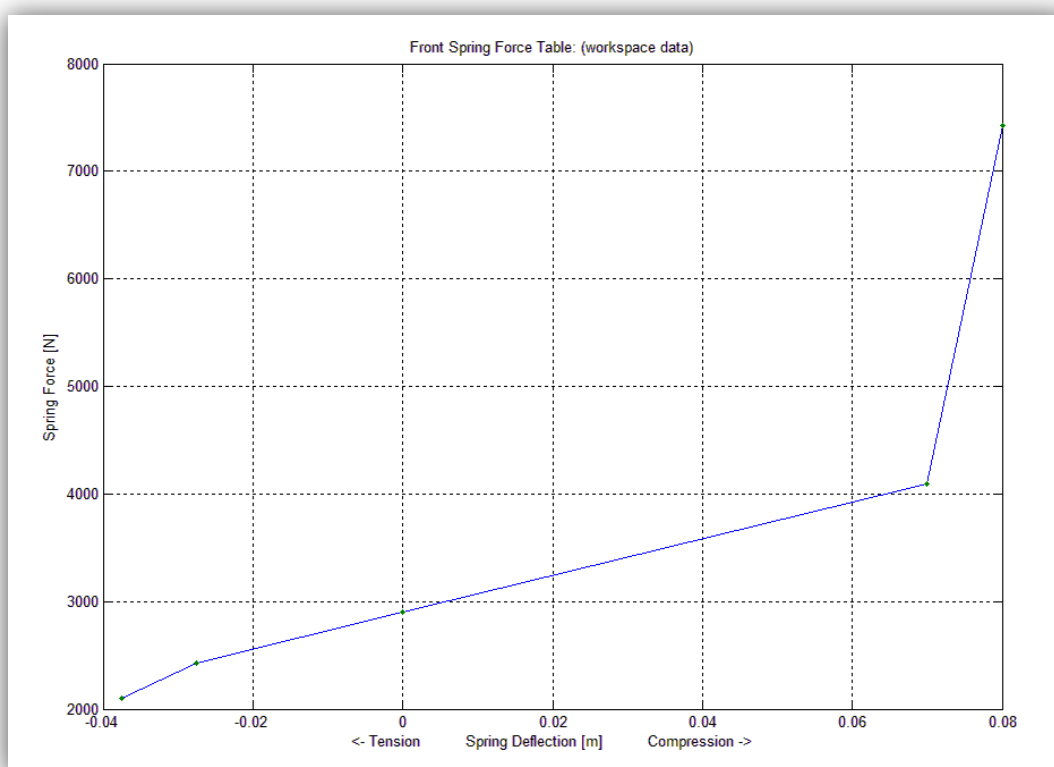
3.5.1.1 Η παθητική ανάρτηση του *veDYNA*

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται και αναλύονται οι χαρακτηριστικές των στοιχείων του αρχικού -μη τροποποιημένου απ' το χρήστη- συστήματος παθητικής ανάρτησης του *veDYNA*.

Στην **Εικόνα 3.8** παρουσιάζεται η χαρακτηριστική γραμμή των ελατηρίων των μπροστινών τροχών του συστήματος ανάρτησης στο αυτοκίνητο του *veDYNA*. Η γραμμή αυτή είναι τμηματικά γραμμική (*piecewise linear*), δηλαδή μια συνδεδεμένη σειρά από ευθύγραμμα τμήματα (σε επόμενη παράγραφο εξηγείται αυτή η μορφή). Στην **Εικόνα 3.9** απεικονίζεται η μορφή που έχει η χαρακτηριστική γραμμή των ελατηρίων των μπροστινών τροχών του συστήματος ανάρτησης στο αυτοκίνητο του *veDYNA*. Η εικόνα 3.9 προβάλλει το τμήμα των ελατηρίων των μπροστινών τροχών στο *vehicle Assembly GUI* του *veDYNA*, στο οποίο καθορίζεται η γραμμή της χαρακτηριστικής των ελατηρίων αυτών, μέσω των τιμών που δίνει ο χρήστης σε παραμέτρους του ελατηρίου, οι οποίες τιμές δίνονται σαν είσοδο στα πεδία της εικόνας αυτής. Η χαρακτηριστική του ελατηρίου στην Εικόνα 3.8, έχει τη μορφή της γραμμής του διαγράμματος στο τμήμα του ελατηρίου στο *vehicle Assembly GUI*. Η χαρακτηριστική του ελατηρίου που διαμορφώνεται με βάση τις προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων που διαμορφώνουν τη χαρακτηριστική αυτή στο *vehicle Assembly GUI*,

προβάλλεται στο χρήστη έπειτα από το πάτημα του κουμπιού “Plot”, και είναι το διάγραμμα που προβάλλεται στην Εικόνα 3.8.

Στην Εικόνα 3.8 έχουμε στον οριζόντιο άξονα την απόσταση του παραμορφωμένου ελατηρίου από το αρχικό μήκος ισορροπίας του (το μήκος ισορροπίας του είναι στο σημείο μηδέν του οριζόντιου άξονα) και στον κάθετο άξονα έχουμε τη δύναμη του ελατηρίου η οποία τείνει να το επαναφέρει στο μήκος ισορροπίας του. Απ’ το μηδέν προς τα θετικά του οριζόντιου άξονα η παραμόρφωση αυτή συμπιέζει το ελατήριο και το μέτρο της θετικής δύναμης του ελατηρίου αυξάνεται, και απ’ το μηδέν προς τα αρνητικά του οριζόντιου άξονα η παραμόρφωση αυτή επιμηκώνει το ελατήριο και το μέτρο της αρνητικής δύναμης επίσης αυξάνεται.



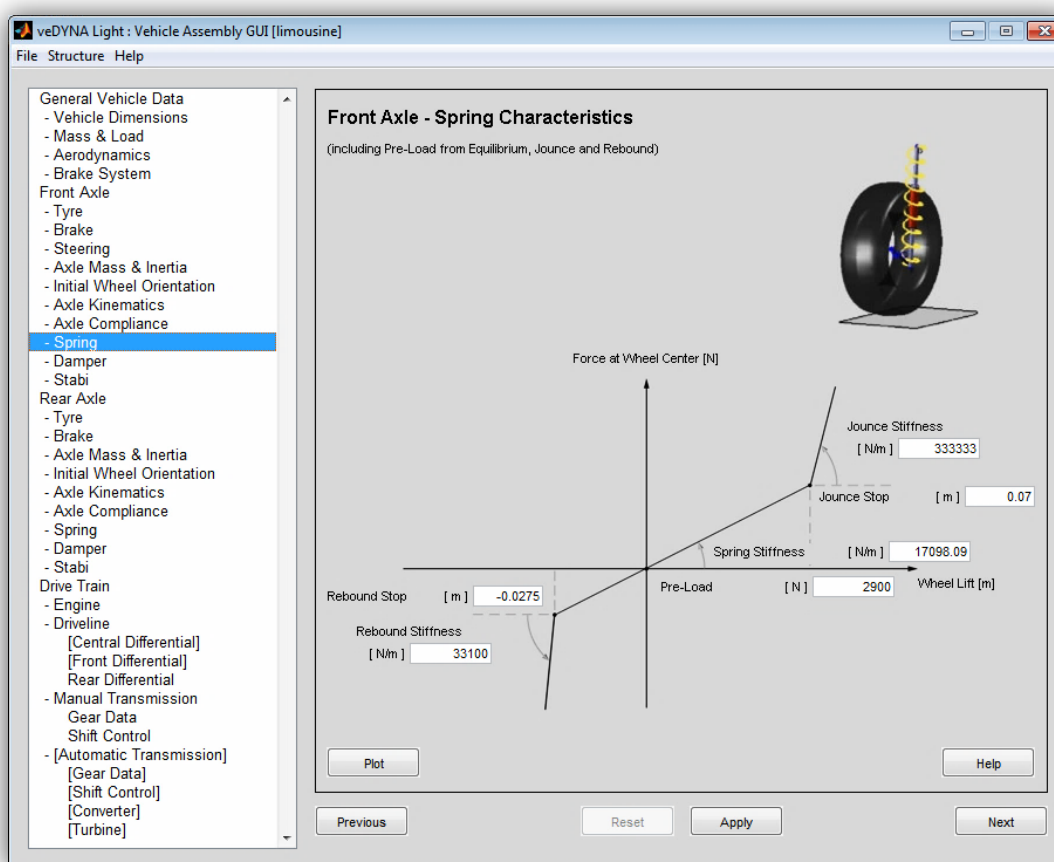
Εικόνα 3.8 – Η χαρακτηριστική γραμμή των ελατηρίων των μπροστινών τροχών του οχήματος του veDYNA. Απ’ το μηδέν προς τα θετικά του οριζόντιου άξονα η παραμόρφωση αυτή συμπιέζει το ελατήριο και το μέτρο της θετικής δύναμης του ελατηρίου αυξάνεται, και απ’ το μηδέν προς τα αρνητικά του οριζόντιου άξονα η παραμόρφωση αυτή επιμηκώνει το ελατήριο και το μέτρο της αρνητικής δύναμης επίσης αυξάνεται.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η χαρακτηριστική του ελατηρίου της εικόνας 3.8 ερμηνεύεται διαφορετικά από το *veDYNA* κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για αυτό το λόγο στην Εικόνα 3.9 βλέπουμε να αναγράφεται *Wheel lift* στον οριζόντιο άξονα και *Force at Wheel Center* στον κάθετο, έχοντας έτσι διαφορετικούς τίτλους αξόνων μεταξύ των δυο διαγραμμάτων. Η χαρακτηριστική αυτή του ελατηρίου στην εικόνα 3.8 είναι μια γραμμή η οποία έχει σαν είσοδο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης όχι την απόσταση από το μήκος ισορροπίας του ελατηρίου, αλλά την *κάθετη μετατόπιση* του κέντρου μάζας του τροχού (το μήκος z_u στην Εικόνα 3.1). Επομένως, η χαρακτηριστική αυτή δεν επιστρέφει τη δύναμη του ελατηρίου λόγω της επιμήκυνσης ή της συμπίεσής του σαν έξοδο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, αλλά την κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο κέντρο μάζας του τροχού, λόγω της κάθετης μετατόπισης του κέντρου μάζας του τροχού, την ώρα που επηρεάζει το ελατήριο τη δύναμη (αλλά και τη μετατόπιση) αυτή.

Από την **Εικόνα 3.9** γίνεται κατανοητό ότι αυτή η τμηματικά γραμμική μορφή του διαγράμματος της χαρακτηριστικής του ελατηρίου, προκύπτει από το γεγονός ότι ο συντελεστής k είναι ναί μεν σταθερός και σχηματίζει ευθεία γραμμή στο διάγραμμα, αλλά η σταθερότητα αυτή αφορά ένα συγκεκριμένο εύρος του οριζόντιου άξονα. Έξω απ' το εύρος αυτό έχουμε άλλες δυο έννοιες: τις έννοιες “*Jounce*” και “*Rebound*” του ελατηρίου.

Οι έννοιες “*Jounce*” και “*Rebound*” μπορούν να διαμορφώσουν έναν σχηματισμό διαφορετικών γωνιών από αυτή που σχηματίζει ο συντελεστής k με τον οριζόντιο άξονα, στα σημεία που εισχωρούν αυτές οι έννοιες, τα οποία είναι τα *Jounce Stop* και *Rebound Stop*. *Jounce* λοιπόν είναι η κάθετη μετατόπιση του τροχού προς το αμάξωμα, η ανοδική δηλαδή κάθετη μετατόπιση του κέντρου μάζας της ρόδας κατά την οποία το ελατήριο συμπιέζεται. Στο σημείο λοιπόν *Jounce Stop*, η συμπίεση του ελατηρίου είναι αρκετά μεγάλη (για παράδειγμα στην περίπτωση που διέρχεται ο τροχός απ' το ανώτερο σημείο ενός σαμαριού). Ο χρήστης τότε καθορίζει ένα νέο συντελεστή ακαμψίας του ελατηρίου, όπου μέσω της τιμής του νέου αυτού συντελεστή ασκείται δύναμη ελατηρίου με μεγαλύτερο μέτρο, με σκοπό να επαναφέρει η δύναμη αυτή τον τροχό στη θέση ισορροπίας του γρηγορότερα σε σχέση με πριν. *Rebound* είναι η αντίθετη κίνηση σε σχέση με το *Jounce*, και ισχύουν τα ανάλογα.

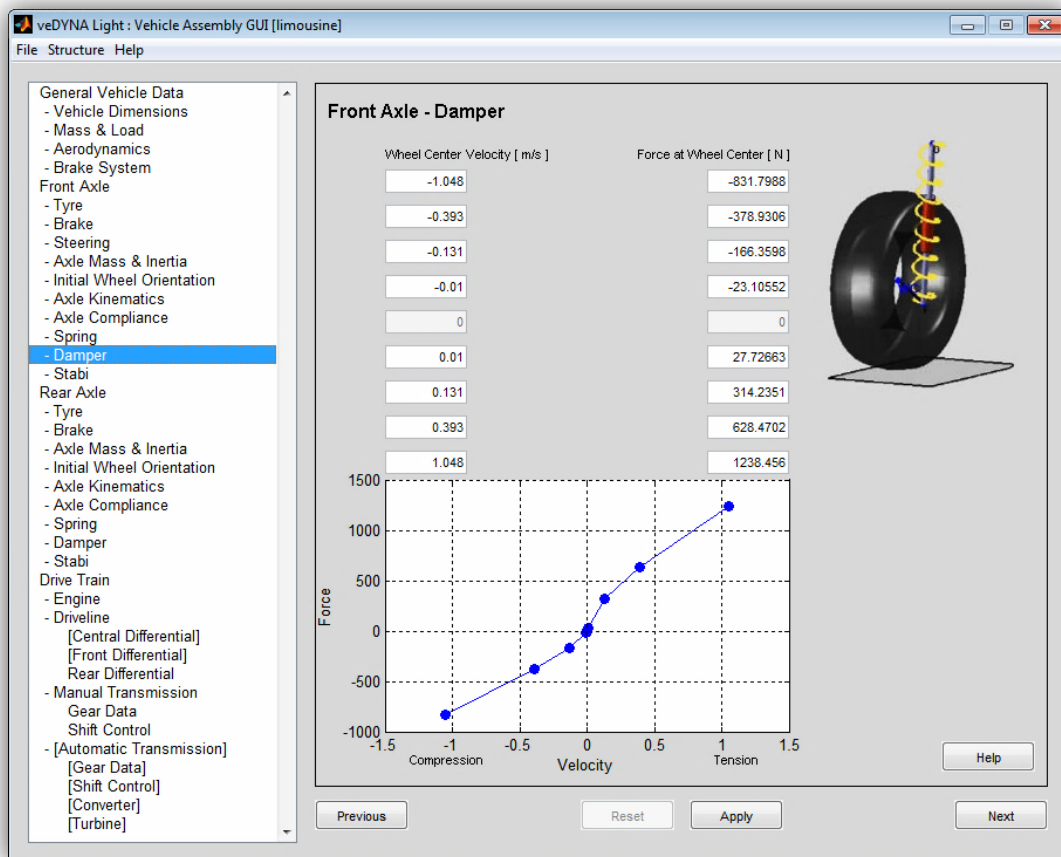
Τέλος, έχουμε το *Pre-Load* το οποίο καθορίζει την κάθετη απόσταση της ευθείας της χαρακτηριστικής από το σημείο μηδέν του άξονα των δυνάμεων, και είναι μια παράμετρος που δηλώνει την αρχική δύναμη που ασκείται από το όχημα στα ελατήρια, τα οποία συμπιέζονται λόγω της δύναμης του βάρους του φορτίου του οχήματος όταν τα στοιχεία του συστήματος ανάρτησης βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 3.9 – Το τμήμα των ελατηρίων των μπροστινών τροχών στο vehicle Assembly GUI του veDYNA, στο οποίο καθορίζεται η γραμμή της χαρακτηριστικής του ελατηρίου του συστήματος ανάρτησης, μέσω των τιμών πέντε παραμέτρων που δίνει σαν είσοδο ο χρήστης στα πεδία της εικόνας αυτής. Η χαρακτηριστική του ελατηρίου έχει τη μορφή που έχει η γραμμή του διαγράμματος αυτού. Η χαρακτηριστική του ελατηρίου που διαμορφώνεται με βάση τις προκαθορισμένες αυτές τιμές, προβάλλεται στο χρήστη έπειτα από το πάτημα του κουμπιού “Plot” και είναι το διάγραμμα που προβάλλεται στην Εικόνα 3.8

Στο σημείο αυτό περνάμε στο δεύτερο στοιχείο του συστήματος ανάρτησης του οχήματος του *veDYNA* μετά το ελατήριο, το οποίο είναι ο *παθητικός* αποσβεστήρας ταλαντώσεων (*passive damper*).

Στην **Εικόνα 3.10** προβάλλεται το τμήμα των αποσβεστήρων ταλαντώσεων των μπροστινών τροχών στο *vehicle Assembly GUI* του *veDYNA*, στο οποίο καθορίζεται η γραμμή της χαρακτηριστικής των αποσβεστήρων του συστήματος ανάρτησης. Ο καθορισμός αυτός γίνεται μέσω των τιμών που δίνει σαν είσοδο ο χρήστης σε οκτώ ζευγάρια παραμέτρων στα πεδία της εικόνας αυτής. Τα οκτώ αυτά ζευγάρια αποτελούν τις συντεταγμένες των οκτώ σημείων της χαρακτηριστικής. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται και το αντίστοιχο διάγραμμα της χαρακτηριστικής του αποσβεστήρα, που διαμορφώνεται βάσει των σημείων αυτών.



Εικόνα 3.10 – Το τμήμα των αποσβεστήρων ταλαντώσεων των μπροστινών τροχών στο vehicle Assembly GUI του veDYNA, στο οποίο καθορίζεται η γραμμή της χαρακτηριστικής των αποσβεστήρων του συστήματος ανάρτησης, μέσω των τιμών που δίνει σαν είσοδο ο χρήστης στα πεδία της εικόνας αυτής. Παρατηρείται και το αντίστοιχο διάγραμμα που διαμορφώνεται βάσει των τιμών αυτών.

Το διάγραμμα στην Εικόνα 3.10 θα έπρεπε να έχει στον κάθετο άξονα τις δυνάμεις F_d , και στον οριζόντιο άξονα την ταχύτητα u με την οποία μεταβάλλεται το μήκος του αποσβεστήρα. Η χαρακτηριστική αυτή όμως ερμηνεύεται διαφορετικά από το veDYNA κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως ακριβώς και στην περίπτωση του ελατηρίου.

Η χαρακτηριστική του αποσβεστήρα στην εικόνα 3.10 είναι μια γραμμή η οποία σχηματίζεται έχοντας σαν είσοδο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης όχι την ταχύτητα u με την οποία μεταβάλλεται το μήκος του αποσβεστήρα, αλλά την ταχύτητα της κάθετης μετατόπισης του κέντρου μάζας του τροχού (την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η κάθετη μετατόπιση z_u στην Εικόνα 3.1). Η χαρακτηριστική

αυτή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δεν επιστρέφει τη δύναμη του αποσβεστήρα λόγω της ταχύτητας u σαν έξοδο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, αλλά την κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο κέντρο μάζας του τροχού (*Force at Wheel Center*), λόγω της ταχύτητας της κάθετης μετατόπισης του κέντρου μάζας του τροχού (*Wheel Center Velocity*), την ώρα που επηρεάζει ο αποσβεστήρας τη δύναμη (αλλά και την ταχύτητα) αυτή.

Έτσι, στο διάγραμμα που προβάλλεται στην Εικόνα 3.10 έχουμε στον οριζόντιο άξονα την ταχύτητα της κάθετης μετατόπισης του κέντρου μάζας του τροχού, και στον κάθετο άξονα έχουμε την κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο κέντρο μάζας του τροχού, υπό το πρίσμα της παρεμβολής του αποσβεστήρα στις αναρτημένες και μη αναρτημένες μάζες του οχήματος. Απ' το μηδέν προς τα *θετικά* του οριζόντιου άξονα ο αποσβεστήρας *επιμηκώνεται* και το *μέτρο* της *θετικής* δύναμης που ασκείται στο κέντρο μάζας του τροχού *αυξάνεται*, και απ' το μηδέν προς τα *αρνητικά* του οριζόντιου άξονα ο αποσβεστήρας *συμπιέζεται* και το *μέτρο* της *αρνητικής* δύναμης *επίσης αυξάνεται*.

Τέλος, μένει να απαντηθεί το ερώτημα “για ποιο λόγο χαρακτηρίζεται ένας αποσβεστήρας με αυτή τη χαρακτηριστική ως *παθητικός* (ή αλλιώς, γιατί το σύστημα ανάρτησης που περιέχει έναν τέτοιο αποσβεστήρα χαρακτηρίζεται ως *παθητικό*)”.

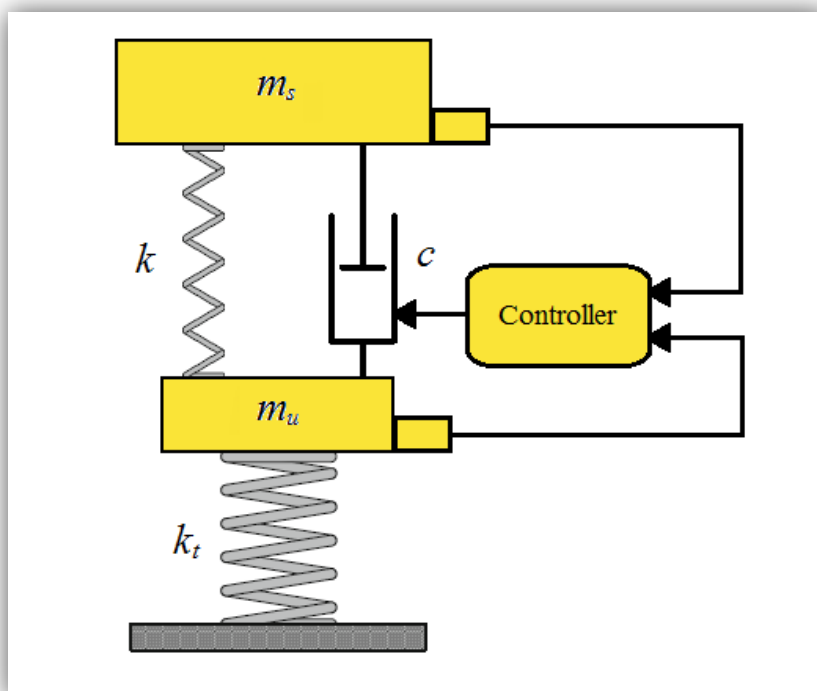
Η χαρακτηριστική στην Εικόνα 3.10 είναι μια μη γραμμική (*non linear*) χαρακτηριστική, αφού συντίθεται από συνδεδεμένα ευθύγραμμα τμήματα, όπου σε κάθε σημείο το οποίο καθορίζει την αρχή καθενός απ' τα τμήματα αυτά, αλλάζει η γωνία της ευθείας του τμήματος αυτού με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι αλλάζει η εφαπτομένη καθεμιάς απ' τις γωνίες αυτές (η οποία ισούται με το λόγο της δύναμης προς την ταχύτητα του διαγράμματος σε κάθε ευθύγραμμο τμήμα), δηλαδή ο συντελεστής απόσβεσης c . Ο συντελεστής απόσβεσης με βάση αυτή τη χαρακτηριστική μπορεί να πάρει περισσότερες από μια τιμές, οι οποίες είναι *προκαθορισμένες*, καθιστώντας κάτι τέτοιο *μη ελεγχόμενο* τον αποσβεστήρα. Αυτός ο καθορισμένος και μη ελεγχόμενος συντελεστής απόσβεσης καθιστά το -μη τροποποιημένο απ' το χρήστη- σύστημα ανάρτησης του *veDYNA* ως *παθητικό*.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής λοιπόν είναι να μετατρέψουμε το συντελεστή απόσβεσης του αποσβεστήρα ταλαντώσεων του *veDYNA* από μη ελεγχόμενο (παθητικό αποσβεστήρα) σε ελεγχόμενο (ενεργητικό αποσβεστήρα), μέσα από μια συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου. Αυτή η στρατηγική ελέγχου αναπτύσσεται στο 4^ο κεφάλαιο.

3.5.2 Σύστημα Ημιενεργητικής Ανάρτησης

Τα συστήματα ημιενεργητικής ανάρτησης βασίζονται στη δομή των συστημάτων παθητικής ανάρτησης. Η διαφορά ενός συστήματος ημιενεργητικής ανάρτησης σε σχέση με ένα σύστημα παθητικής ανάρτησης έγκειται στο γεγονός ότι στην ημιενεργητική ανάρτηση είναι εφικτή η μεταβολή του συντελεστή απόσβεσης, και κατ' επέκταση η μεταβολή της δύναμης που ασκεί ο αποσβεστήρας στο αμάξωμα.

Στην **Εικόνα 3.11** απεικονίζεται το γενικό μοντέλο ενός τετάρτου αυτοκινήτου (*quarter car model*) το οποίο αφορά το σύστημα ημιενεργητικής ανάρτησης. Τα βασικά επιπρόσθετα στοιχεία του συστήματος αυτού, σε σχέση με την παθητική ανάρτηση, είναι οι αισθητήρες και ο ελεγκτής, ο οποίος μετατρέπει τον παθητικό αποσβεστήρα σε ημιενεργητικό. Αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στην αναρτημένη και τη μη αναρτημένη μάζα, ανιχνεύουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης των μαζών αυτών, και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά αυτά εισέρχονται με τη μορφή σημάτων στον ελεγκτή. Τα σήματα των αισθητήρων λοιπόν αποτελούν τις εισόδους του ελεγκτή προκειμένου να προσδιοριστεί η παρούσα κατάσταση του οχήματος, και στη συνέχεια να ρυθμιστεί μέσω του ελεγκτή η επόμενη κατάσταση βάσει της παρούσας κατάστασης. Η έξοδος του ελεγκτή είναι αυτή η οποία εισέρχεται στον αποσβεστήρα ταλαντώσεων και που ελέγχει την απόκριση του αποσβεστήρα.



Εικόνα 3.11 – Το σύστημα ημιενεργητικής ανάρτησης. Σε σχέση με την παθητική ανάρτηση περιλαμβάνει επιπλέον τους αισθητήρες και τον ελεγκτή. Οι αισθητήρες παρέχουν τα σήματα εισόδου στον ελεγκτή, ο οποίος στη συνέχεια ρυθμίζει το συντελεστή απόσβεσης του αποσβεστήρα ταλαντώσεων με βάση τη στρατηγική ελέγχου που ακολουθεί ο ελεγκτής αυτός. Αυτή η ρύθμιση του συντελεστή που αναλαμβάνει ο ελεγκτής γίνεται μέσω του ελέγχου της δύναμης που ασκεί ο αποσβεστήρας στο αμάξωμα.

Σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου αυτού αναφέρθηκε ότι στους αποσβεστήρες ταλαντώσεων υπάρχει ένα μικρό έμβολο το οποίο αναγκάζεται σε παλινδρόμηση μέσα σε έναν κύλινδρο γεμάτο με υδραυλικό υγρό κατάλληλου ιξώδους. Αναφέρθηκε επίσης ότι η λειτουργία τους στηρίζεται στην αρχή κατά την οποία όταν ένα υγρό συμπιέζεται σε ένα χώρο από ένα έμβολο, τότε το υγρό αυτό περνάει υποχρεωτικά σε ένα άλλο χώρο μέσα από μια μικρή δίοδο (οπή) ή βαλβίδα, με αποτέλεσμα το υγρό να δημιουργεί μια αντίσταση στην κίνηση του εμβόλου, λόγω της υδραυλικής (ιξώδους) τριβής μεταξύ υγρού-εμβόλου. Το μέγεθος της βαλβίδας αυτής καθορίζει αυτή την αντίσταση.

Ένας βασικός τρόπος ελέγχου της συμπεριφοράς του αποσβεστήρα σε ένα σύστημα ημιενεργητικής ανάρτησης, είναι η ρύθμιση της βαλβίδας του αποσβεστήρα, έτσι ώστε η οδήγηση να προσαρμόζεται στις συνθήκες, κατά περίπτωση. Αυτή η

ρύθμιση μεταβάλλει και την αντίσταση του εμβόλου. Ανάλογα με τη ρυθμισμένη και επιθυμητή τιμή που δίνει ο ελεγκτής, ρυθμίζεται η βαλβίδα αυτή, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον ελεγκτή. Έτσι, εφαρμόζονται οι υπολογισμένες και επιθυμητές δυνάμεις του ελεγκτή και κατ' επέκταση του εμβόλου, καθορίζοντας κατ' αυτό τον τρόπο την απόκριση του αποσβεστήρα. Ο τύπος της ημιενεργητικής ανάρτησης που λειτουργεί με τον τρόπο αυτό είναι ο βασικότερος και ο οικονομικότερος, και ονομάζεται “*Solenoid/valve actuated*”. Ένας άλλος τύπος ημιενεργητικής ανάρτησης είναι η ανάρτηση με χρήση “*magneto rheological*” αποσβεστήρων, όμως αυτό το είδος δε χρειάζεται να μας απασχολήσει στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων ημιενεργητικής ανάρτησης είναι οι μικρές ενεργειακές απαιτήσεις κατά την λειτουργία του συστήματος αυτού, λόγω του γεγονότος ότι μια ημιενεργητική ανάρτηση δεν παράγει καμιά ενεργό δύναμη, όπως οι ενεργητικές. Έπειτα, η ρύθμιση του συντελεστή απόσβεσης μέσω κάποιων τεχνικών ελέγχου μπορεί να προσφέρει σαφέστατα καλύτερη απόδοση σε σχέση με την παθητική ανάρτηση, χωρίς συγχρόνως να απαιτούνται τόσο μεγάλα ποσά ενέργειας όπως στην περίπτωση της ενεργητικής ανάρτησης.

Όμως, η απόδοσή τους δε θεωρείται τόσο καλή σε σχέση με τα συστήματα ενεργητικής ανάρτησης, αφού δεν έχουν την “ευελιξία” της ενεργητικής ανάρτησης. Με τον όρο “ευελιξία” εννοούμε ότι στη σχέση δύναμης - ταχύτητας αποσβεστήρα υπάρχει κάποιος περιορισμός στο εύρος των δυνάμεων στην περίπτωση της ημιενεργητικής ανάρτησης, όπως είδαμε στην ενότητα 3.5, σε αντίθεση με την περίπτωση της ενεργητικής ανάρτησης όπου δεν υπάρχει αυτός ο περιορισμός.

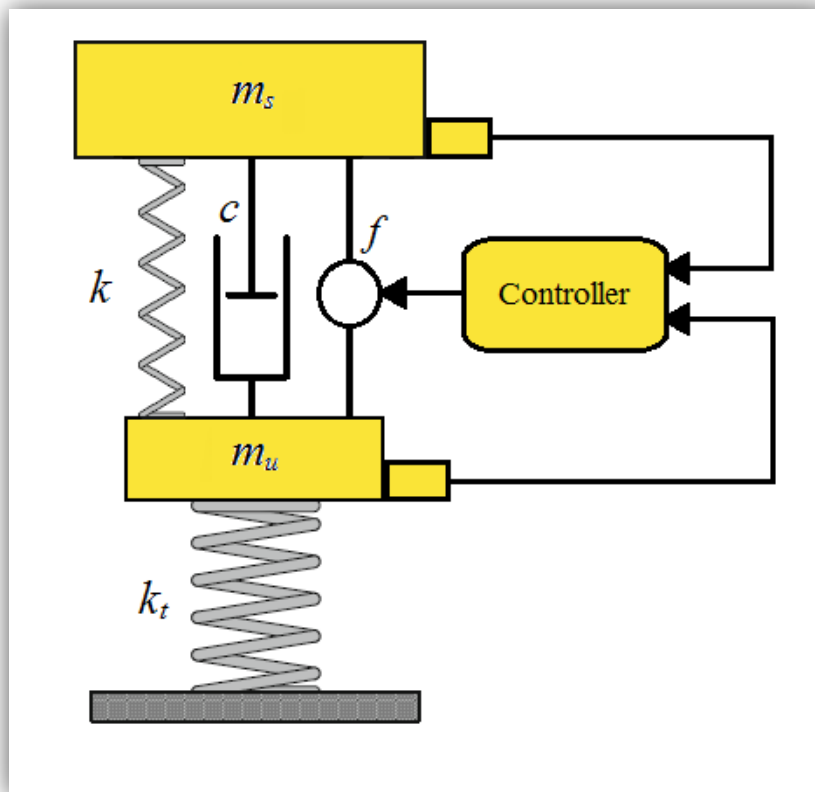
3.5.3 Σύστημα Ενεργητικής Ανάρτησης

Το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης είναι το σύστημα του οποίου η συμπεριφορά προσομοιώνεται, και του οποίου η απόκριση μελετάται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας στο θέμα του ελέγχου

της οδικής συμπεριφοράς των οχημάτων και ειδικότερα της συμπεριφοράς των αναρτήσεων, βρίσκει συνήθως εφαρμογή σε αυτά τα συστήματα.

Η διαφορά ενός συστήματος ενεργητικής ανάρτησης σε σχέση με ένα σύστημα παθητικής ανάρτησης έγκειται στο γεγονός ότι στην ενεργητική ανάρτηση υπάρχει επιπλέον ένα μηχανικό στοιχείο, ο *ενεργοποιητής*, ο οποίος προσθέτει επιπλέον ενέργεια στο σύστημα. Αυτή η επιπλέον ενέργεια έχει τη μορφή της δύναμης που ασκεί ο αποσβεστήρας στο αμάξωμα, με τη δύναμη αυτή να ρυθμίζεται με βάση κάποια τεχνική ελέγχου. Η επιπλέον δύναμη στην ουσία προστίθεται στη δύναμη του παθητικού αποσβεστήρα.

Στην **Εικόνα 3.12** απεικονίζεται το γενικό μοντέλο ενός τετάρτου αυτοκινήτου (*quarter car model*), το οποίο αφορά το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης. Τα βασικά επιπρόσθετα στοιχεία του συστήματος αυτού, σε σχέση με την παθητική ανάρτηση, είναι οι αισθητήρες, ο ελεγκτής, και ο ενεργοποιητής. Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στην αναρτημένη και τη μη αναρτημένη μάζα, ανιχνεύουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης των μαζών αυτών, και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά αυτά εισέρχονται με τη μορφή σημάτων στον ελεγκτή. Τα σήματα των αισθητήρων λοιπόν αποτελούν τις εισόδους του ελεγκτή προκειμένου να προσδιοριστεί η παρούσα κατάσταση του οχήματος, και στη συνέχεια να ρυθμιστεί μέσω του ελεγκτή η επόμενη κατάσταση βάσει της παρούσας κατάστασης. Η έξοδος του ελεγκτή συνδέεται με τον ενεργοποιητή, παρέχοντας την επιπλέον ενέργεια που απαιτεί ο ενεργοποιητής.



Εικόνα 3.12 – Το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης. Σε σχέση με την παθητική ανάρτηση περιλαμβάνει επιπλέον τους αισθητήρες, τον ελεγκτή, και τον ενεργοποιητή. Οι αισθητήρες παρέχουν τα σήματα εισόδου στον ελεγκτή, και ο ελεγκτής στη συνέχεια παρέχει την ενέργεια που απαιτεί ο ενεργοποιητής. Στη δύναμη που ασκούν οι παθητικοί αποσβεστήρες ταλαντώσεων στο αμάξωμα προστίθεται μέσω του ενεργοποιητή η δύναμη που αποτελεί την έξοδο του ελεγκτή.

Τα συστήματα ενεργητικής ανάρτησης χρησιμοποιούν ξεχωριστούς ενεργοποιητές, οι οποίοι ασκούν ανεξάρτητη δύναμη από αυτή του αποσβεστήρα, με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών στοιχείων της οδήγησης.

Οι ενεργητικές αναρτήσεις χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- *Hydraulic Actuated*
- *Electromagnetic Recuperative*

Οι *Hydraulic Actuated* ενεργητικές αναρτήσεις λειτουργούν και ελέγχονται με τη χρήση των υδραυλικών σερβομηχανισμών (*hydraulic servomechanisms*).

Ο σερβομηχανισμός είναι μια μηχανική διάταξη, ικανή να λειτουργήσει μόνη της, σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα λειτουργίας. Έτσι, η κατασκευή ενός σερβομηχανισμού είναι τέτοια, ώστε να υπάρχει ένα κατάλληλο σύστημα σύγκρισης μεγεθών που μπορεί να μεταβάλλονται, για να υπάρχει και η ικανότητα του αυτοέλεγχου. Σκοπός των σερβομηχανισμών είναι η διατήρηση -σε σταθερά επίπεδα- της τιμής ενός μεγέθους, και ο καθορισμός της θέσης ενός οργάνου σε σύγκριση με τη θέση ενός άλλου οργάνου. Ο σερβομηχανισμός αποτελείται από δύο γενικές διατάξεις. Μία διάταξη που επισημαίνει τη μεταβολή των διάφορων μεγεθών και μία άλλη διάταξη ικανή να προσφέρει τόση ισχύ, όση είναι απαραίτητη για την απόσβεση της μεταβολής και τον εκμηδενισμό του σφάλματος.

Οι ενεργοποιητές λοιπόν υπάρχουν ως υδραυλικοί σερβομηχανισμοί, και η υδραυλική πίεση στους σερβομηχανισμούς παρέχεται από μια υδραυλική αντλία. Οι αισθητήρες παρακολουθούν διαρκώς την κίνηση του αμαξώματος και των τροχών, παρέχοντας νέα δεδομένα στην ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου. Όσο αυτή η μονάδα λαμβάνει και επεξεργάζεται δεδομένα, χειρίζεται τους σερβομηχανισμούς που είναι τοποθετημένοι δίπλα σε κάθε τροχό. Σχεδόν στιγμιαία, οι σερβο-ρυθμιζόμενες ενεργητικές αναρτήσεις δημιουργούν δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση του αμαξώματος κατά τη διάρκεια των ελιγμών της οδήγησης.

Οι *Electromagnetic Recuperative* ενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούν γραμμικούς ηλεκτρομαγνητικούς κινητήρες που τοποθετούνται στον κάθε τροχό. Παρέχει εξαιρετικά γρήγορη απόκριση και επιτρέπει την εκ νέου παραγωγή της ενέργειας που καταναλώνεται αξιοποιώντας τους κινητήρες ως γεννήτριες. Αυτό υπερνικά τα προβλήματα του χαμηλού χρόνου απόκρισης και της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας των υδραυλικών συστημάτων.

Το πλεονέκτημα των συστημάτων ενεργητικής ανάρτησης είναι ότι η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει στο μέγιστο και να ξεπεράσει ακόμα και τη βελτιωμένη (σε σχέση με τις παθητικές αναρτήσεις) απόδοση των ημιενεργητικών αναρτήσεων. Στην ενότητα **3.5** είδαμε στη σχέση δύναμης - ταχύτητας αποσβεστήρα, και συγκεκριμένα στην **Εικόνα 3.7**, ότι δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στο εύρος των δυνάμεων στην περίπτωση της ενεργητικής ανάρτησης, σε αντίθεση με την ημιενεργητική ανάρτηση. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα ενεργητικής ανάρτησης μπορούν είτε να

ελέγχουν τις δυνάμεις του αποσβεστήρα όπως στην ημιενεργητική ανάρτηση, χωρίς να αντιτίθενται στην κατεύθυνση της δύναμης αυτής, είτε μπορούν να αντιτίθενται στην κατεύθυνση της δύναμης αυτής, έχοντας έτσι μια “ευελιξία” ο έλεγχος των δυνάμεων των αποσβεστήρων.

Θεωρητικά είναι ο ιδανικός τρόπος βελτιστοποίησης της οδικής συμπεριφοράς οποιουδήποτε οχήματος. Μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη άνεση, αφού η ανάρτηση μπορεί να είναι μαλακή για αυτό το σκοπό, και η μέγιστη ευστάθεια, αφού η ανάρτηση μπορεί να είναι συγχρόνως και σκληρή για το σκοπό αυτό. Θεωρείται ότι κάτι τέτοιο είναι ευκολότερο να γίνει σε σχέση με την περίπτωση της ημιενεργητικής ανάρτησης.

Αυτή η βέλτιστη απόδοση όμως των ενεργητικών αναρτήσεων, έχει και ένα σημαντικό κόστος. Μειονεκτήματα αυτού του τύπου αποτελούν η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και άρα το μεγάλο κόστος του. Από τη στιγμή που απαιτείται η τοποθέτηση μιας ισχυρής και ακριβής μονάδας παροχής ισχύος για την κίνηση των ισχυρών σερβομηχανισμών του συστήματος αυτού, το σύστημα αυτό αποτελεί μια πολύπλοκη και ακριβή λύση η οποία πρακτικά είναι αδύνατον να εφαρμοστεί παρά σε κάποια ειδικά οχήματα παραγωγής ή αγωνιστικές κατασκευές. Μέχρι στιγμής ενεργητικές αναρτήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί σε спор αυτοκίνητα και σε ακριβά μοντέλα αυτοκινήτων. Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτούν και καταναλώνουν τα συστήματα αυτά είναι αρκετά μεγάλη.

Κεφάλαιο 4 – Στρατηγική ελέγχου

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αφορά τη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή, με σκοπό τη ρύθμιση της απόκρισης του συστήματος ενεργητικής ανάρτησης του οποίου η συμπεριφορά προσομοιώνεται στο περιβάλλον *veDYNA*.

Το κεφάλαιο αυτό αρχίζει με τη γενική περιγραφή του αυτομάτου ελέγχου στην ενότητα 4.2, διατυπώνοντας στη συνέχεια το γενικό πρόβλημα του ελέγχου στην ενότητα 4.3, με σκοπό να καταλήξουμε στο πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου στην 4.4. Ο βέλτιστος έλεγχος είναι η επιστημονικός χώρος στον οποίο ανήκει το ερώτημα το οποίο καλείται να απαντήσει η εργασία αυτή. Το ερώτημα αυτό τίθεται και απαντάται στην ενότητα 4.5, στην οποία παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ελέγχου πάνω στον οποίο εκτελέστηκε η προσομοίωση της εργασίας αυτής. Αυτός ο αλγόριθμος επιλύει το πρόβλημα του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή, με το ρυθμιστή αυτό να αποτελεί βασικό στοιχείο του βέλτιστου ελέγχου, και ο ρυθμιστής αυτός αναπτύσσεται στην ενότητα 4.4.2, αφού έχει προηγηθεί η περιγραφή του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου στην ενότητα 4.4.1. Αυτός ο ρυθμιστής χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της εργασίας αυτής, μέσω της υλοποίησης του αλγορίθμου ελέγχου της ενότητας 4.5. Η υλοποίηση αυτή είναι πρώτα απ' όλα *προγραμματιστική*, αφού αναπτύσσεται και εκτελείται αυτός ο αλγόριθμος σε *script* του MATLAB (ο κώδικας της προγραμματιστικής υλοποίησης του αλγορίθμου βρίσκεται στο Παράρτημα και συγκεκριμένα στην ενότητα A.2), αλλά και *σχεδιαστική*, αφού υλοποιείται στο ηλεκτρονικό/υπολογιστικό μοντέλο οχήματος του *veDYNA*. Αυτή η σχεδιαστική υλοποίηση παρουσιάζεται στην ενότητα 4.5.1. Στην ενότητα 4.6 προβάλλονται τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσής μας.

Το 3^ο κεφάλαιο της ανάρτησης και αυτό το κεφάλαιο του ελέγχου συνδέονται λόγω του ότι η τεχνική ελέγχου που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό αφορά το σύστημα ανάρτησης του οχήματος *veDYNA*. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνει την παρουσίαση της υλοποίησης που εφαρμόστηκε στην εργασία αυτή, μια υλοποίηση που έγινε τόσο με βάση τις ρυθμίσεις της γραφικής διασύνδεσης χρήστη του *veDYNA* οι οποίες παρουσιάστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στις υποενότητες 2.5.2.1 και 2.5.2.2, όσο και με βάση τις τροποποιήσεις του μοντέλου οχήματος του *veDYNA*, οι οποίες παρουσιάζονται και αναλύονται στην ενότητα 4.5.1. Αυτό το τροποποιημένο μοντέλο έχει παραμέτρους που υπολογίστηκαν βάσει του κώδικα του παραρτήματος Α.2, και προσομοιώνεται βάσει των ρυθμίσεων του 2^{ου} κεφαλαίου στις υποενότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

4.2 Ο αυτόματος έλεγχος γενικά

Η *Θεωρία Ελέγχου (Control Theory)* είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος της Μηχανικής και των Μαθηματικών, ο οποίος ασχολείται με τη συμπεριφορά των δυναμικών συστημάτων. Ο *Αυτόματος Έλεγχος (Automatic Control)* είναι η εφαρμογή της Θεωρίας Ελέγχου για τη ρύθμιση κάποιων διαδικασιών χωρίς την άμεση παρέμβαση του ανθρώπου.

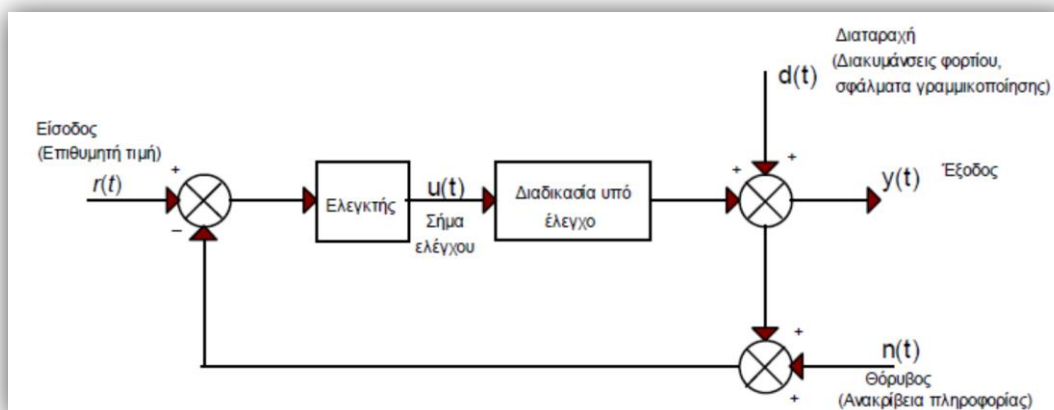
Τα συστήματα που σχετίζονται με τον αυτόματο έλεγχο, τα λεγόμενα *Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου*, είναι σήμερα μια από τις σημαντικότερες περιοχές της επιστήμης και της τεχνολογίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αυτοματισμός είναι συνυφασμένος με την ανάπτυξη σχεδόν κάθε μορφής τεχνολογίας. Εάν εξετάσουμε προσεκτικά τα διάφορα μηχανήματα που κατασκευάζει σήμερα ο άνθρωπος, θα διαπιστώσουμε ότι υπερτερούν των παλαιότερων διότι περιέχουν περισσότερους αλλά και ακριβέστερους αυτοματισμούς. Τέτοια μηχανήματα είναι για παράδειγμα το αυτοκίνητο, το αεροπλάνο, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, το ρομπότ, οι βιομηχανικές μονάδες, κ.ά..

Ο αυτόματος έλεγχος αναπτύχθηκε ραγδαία κατά τα τελευταία εξήντα χρόνια, ιδιαίτερα δε από τη δεκαετία του '60 μέχρι και σήμερα. Τα τελευταία σαράντα χρόνια το τελευταίο πεδίο έρευνας και ανάπτυξης στον αυτόματο έλεγχο είναι εκείνο του βέλτιστου και του στοχαστικού ελέγχου. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μέχρι σήμερα είναι αρκετά εντυπωσιακά τόσο από θεωρητικής πλευράς, όσο και από πλευράς εφαρμογών. Από θεωρητικής πλευράς, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλο βάθος και ευρύτητα, όπου χάρις σε αυτά μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο αυτόματος έλεγχος καθιερώθηκε ως ένας ξεχωριστός και ταυτόχρονα πολύ σημαντικός κλάδος της επιστήμης και της τεχνολογίας. Από πρακτικής πλευράς, τα αποτελέσματα έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε σύνθετα και πολύπλοκα συστήματα με μεγάλες απαιτήσεις σχεδίασης, γεγονός που ενισχύει το ρόλο του αυτοματισμού σε πολλές πλευρές της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως π.χ. στην παραγωγή, στα μέσα μεταφοράς και επικοινωνιών, στη μείωση εργατικών και άλλων ατυχημάτων, στην καταπολέμηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος, στην Ιατρική, στην Οικονομία, κ.λπ..

4.3 Το γενικό πρόβλημα του ελέγχου

Ο βέλτιστος έλεγχος αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Θεωρίας Ελέγχου. Για το λόγο αυτό, στην ενότητα αυτή γίνεται μια γρήγορη επισκόπηση της Θεωρίας (Αυτομάτου) Ελέγχου, με σκοπό να καταλήξουμε στο βέλτιστο έλεγχο που αναπτύσσεται στην επόμενη ενότητα.

Το παρακάτω δομικό διάγραμμα στην **Εικόνα 4.1** είναι ένα τυπικό διάγραμμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου, και χρησιμοποιείται συνήθως για την κατανόηση των βασικών εννοιών της Θεωρίας Ελέγχου.



Εικόνα 4.1 – Τυπικό διάγραμμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου

Το βασικό πρόβλημα είναι το εξής: ποιο είναι το κατάλληλο σήμα ελέγχου $u(t)$, έτσι ώστε η έξοδος $y(t)$ να συμβαδίζει με την επιθυμητή τιμή της, $r(t)$, παρ' όλες τις εξωτερικές διαταραχές $d(t)$, και την ανακρίβεια στην πληροφορία που προέρχεται από τον θόρυβο $n(t)$, περί της πραγματικής κατάστασης της εξόδου.

Η δυσκολία του προβλήματος αυτού εξαρτάται από τη πολυπλοκότητα της διαδικασίας υπό έλεγχο, από το μέγεθος και την προβλεψιμότητα των εξωτερικών διαταραχών, και το μέγεθος του θορύβου.

Η συγκεκριμένη δομή είναι σε διάταξη ανατροφοδότησης (*feedback*) ή κλειστού βρόχου (*closed loop*). Το βασικό του χαρακτηριστικό είναι η συνεχής πληροφόρηση του ελεγκτή για τη κατάσταση του συστήματος. Σε αντίθεση με ένα σύστημα ανοικτού βρόχου (*open loop*), το σύστημα κλειστού βρόχου έχει πιθανότητες να επιλύσει το βασικό πρόβλημα. Αν οι διαταραχές απουσίαζαν, τότε τα δύο συστήματα θα ήταν ισοδύναμα, αφού το μέλλον θα ήταν απόλυτα προβλέψιμο και η πληροφόρηση περί της κατάστασης, περιττή.

4.4 Το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου

Οι μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων ελέγχου μπορούν να διακριθούν σε *κλασικές* και σε *σύγχρονες*. Οι *κλασικές* μέθοδοι αναπτύχθηκαν κυρίως από το 1930 έως το 1950, και περιλαμβάνουν τα διαγράμματα *Nyquist*, *Bode*, το γεωμετρικό τόπο των ριζών, κ.λπ.. Οι *σύγχρονες* μέθοδοι αναπτύχθηκαν κυρίως από το τέλος της δεκαετίας του '50 και μετά, και περιλαμβάνουν την περιγραφή των συστημάτων στο χώρο κατάστασης, την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης, το στοχαστικό έλεγχο, τον προσαρμοστικό έλεγχο, κ.ά., και στην περίπτωση μας, και το *βέλτιστο έλεγχο*.

Παρόλο που οι αρχικές εφαρμογές της θεωρίας υλοποιήθηκαν σε κλασικές περιοχές της επιστήμης του μηχανικού (ηλεκτρολογία, μηχανολογία κλπ.), στη συνέχεια βρήκε ευρεία εφαρμογή σε πληθώρα τομέων. Είναι γεγονός ότι οποιοδήποτε φυσικό ή τεχνητό δυναμικό σύστημα που μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων (σε κατάλληλη μορφή), μπορεί να αναλυθεί και ελεγχθεί μέσω της θεωρίας του βέλτιστου ελέγχου.

Οι περισσότερες από τις σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι στο πεδίο του χρόνου, και στοχεύουν σε μια *βέλτιστη στρατηγική έλεγχου*. Αυτή η βέλτιστη στρατηγική συνιστάται στον προσδιορισμό ενός *βέλτιστου* σήματος ελέγχου, τέτοιο ώστε να καθιστά ένα συγκεκριμένο κριτήριο κόστους *ελάχιστο*.

Το κριτήριο κόστους εκφράζει τις προδιαγραφές ενός κλειστού συστήματος, οι οποίες περιλαμβάνουν (εκτός από τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν και οι κλασικές τεχνικές) και άλλα χρήσιμα χαρακτηριστικά, όπως είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από το ίδιο το σύστημα, η απαιτούμενη ενέργεια για τον έλεγχο του κλειστού συστήματος, κ.ά.. Μια από τις βασικές ιδέες, βάσει των οποίων διατυπώνονται και στη συνέχεια λύνονται τα προβλήματα περί σχεδίασης συστημάτων ελέγχου, περιστρέφεται γύρω από την *ελαχιστοποίηση ενός κριτηρίου κόστους* (ή συνάρτησης κόστους, ή δείκτη απόδοσης) για ένα σύστημα που ικανοποιεί κάποιες δεδομένες μαθηματικές σχέσεις.

Το αντικείμενο του προβλήματος του βέλτιστου ελέγχου, είναι ο προσδιορισμός ενός διανύσματος ελέγχου $u(t)$, τέτοιου ώστε να “εξαναγκάζει” τη συμπεριφορά του υπό έλεγχου συστήματος να ελαχιστοποιεί κάποιο κριτήριο κόστους, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιεί τους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος. Με τον όρο φυσικούς περιορισμούς εννοούμε τις εξισώσεις κατάστασης του συστήματος. Πέρα όμως από τις εξισώσεις κατάστασης μπορούν να υπάρχουν πρόσθετοι φυσικοί περιορισμοί, όπως είναι π.χ. ότι η απόλυτη τιμή του πλάτους των στοιχείων του διανύσματος $u(t)$ να μη μπορεί να είναι μεγαλύτερη από κάποια σταθερά. Έτσι, και η σκέψη της ελαχιστοποίησης του κριτηρίου κόστους έχει φυσική έννοια, όπως είναι π.χ. η ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας του εκάστοτε συστήματος που αναπτύσσει ένας μηχανικός έλεγχου.

Τι είναι λοιπόν ο βέλτιστος έλεγχος; Ο Βέλτιστος Έλεγχος (*Optimal Control*) ασχολείται με το πρόβλημα της εύρεσης ενός κανόνα ελέγχου για ένα δεδομένο δυναμικό σύστημα, στο οποίο ικανοποιείται κάποιο κριτήριο βελτιστοποίησης. Ένα πρόβλημα ελέγχου περιλαμβάνει μια συνάρτηση κόστους, η οποία είναι συνάρτηση των μεταβλητών κατάστασης και των μεταβλητών ελέγχου ενός συστήματος. Ο βέλτιστος έλεγχος λοιπόν είναι ένα σύνολο από διαφορικές εξισώσεις, με τις εξισώσεις αυτές να περιγράφουν τις μεταβλητές ελέγχου οι οποίες ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους του προβλήματος ελέγχου.

4.4.1 Γραμμικός τετραγωνικός έλεγχος

Το πρόβλημα του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου (*linear quadratic - LQ control*) είναι ένα ειδικό και σημαντικό πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου.

Από φυσικής πλευράς, το πρόβλημα του ρυθμιστή μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Θεωρούμε ένα γραμμικό σύστημα με μηδενική αρχική διέγερση και με μη μηδενικές αρχικές συνθήκες $x(t_0)$. Δηλαδή, εδώ το $x(t_0)$ είναι η μόνη αρχική διέγερση του συστήματος. Ζητείται να βρεθεί ένα βέλτιστο σήμα ελέγχου $u(t)$, τέτοιο ώστε να επαναφέρει το διάνυσμα κατάστασης $x(t)$ στο σημείο ηρεμίας του, δηλαδή

το $x(t_f) \approx 0$, ελαχιστοποιώντας κάποιο κριτήριο κόστους. Με t_0 συμβολίζεται ο αρχικός χρόνος, και με t_f ο τελικός χρόνος. (Σημειώνεται ότι το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται μόνο σε συστήματα συνεχούς χρόνου, από τη στιγμή που στην εργασία αυτή προσομοιώνεται ένα μοντέλου ενός τέτοιου συστήματος, σε αντίθεση με τα συστήματα διακριτού χρόνου τα οποία δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης για την εργασία αυτή.)

Από *μαθηματικής* πλευράς, η διατύπωση του προβλήματος του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου έχει ως εξής: Δίνεται ένα *γραμμικό, χρονικά μεταβαλλόμενο* σύστημα, που περιγράφεται στο χώρο κατάστασης από την εξίσωση

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{B}(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (4.1)$$

Ζητείται να βρεθεί ένα σήμα ελέγχου $u(t)$ που ελαχιστοποιεί το κριτήριο κόστους

$$J = \frac{1}{2}x^T(t_f)\mathbf{S}_f x(t_f) + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)\mathbf{Q}(t)x(t) + u^T(t)\mathbf{R}(t)u(t)] dt \quad (4.2)$$

Το κόστος J είναι ένα άθροισμα εσωτερικών γινομένων των διανυσμάτων $x(t)$ και $u(t)$, και για το λόγο αυτό η (4.2) ονομάζεται κριτήριο κόστους *τετραγωνικής* μορφής. Οι πίνακες \mathbf{S}_f , $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{R}(t)$ ονομάζονται *πίνακες βάρους*, και τους επιλέγουμε να είναι συμμετρικοί. Πρέπει να τονιστεί ότι ένας σημαντικός λόγος που οι τετραγωνικοί όροι $x^T(t)\mathbf{Q}(t)x(t)$ και $u^T(t)\mathbf{R}(t)u(t)$ έχουν συμπεριληφθεί στο κριτήριο κόστους J , είναι για να υπάρχει περιορισμός στο πλάτος των διανυσμάτων $x(t)$ και $u(t)$ αντίστοιχα. Ο τετραγωνικός όρος $x^T(t_f)\mathbf{S}_f x(t_f)$ συμπεριλαμβάνεται για να είναι η τελική τιμή $x(t_f)$ του $x(t)$ όσο πιο κοντά στο σημείο ηρεμίας του συστήματος. Σημειώνεται ότι το $x(t_f)$ είναι ακαθόριστο.

Αρα λοιπόν, το πρόβλημα του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου είναι ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου, στο οποίο η δυναμική του συστήματος περιγράφεται από ένα σύνολο *γραμμικών* διαφορικών εξισώσεων και το κόστος περιγράφεται από μια *τετραγωνική* συνάρτηση.

4.4.2 Γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής

Μια συγκεκριμένη μορφή του προβλήματος του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου συναντάται σε πολλά προβλήματα ελέγχου, και είναι αυτή του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή (*linear quadratic regulator – LQR*). Το πρόβλημα αυτό είναι ένα απ' τα σημαντικότερα και θεμελιώδη προβλήματα του βέλτιστου ελέγχου.

Στη μέθοδο *LQR* όλοι οι πίνακες, και συγκεκριμένα οι πίνακες \mathbf{A} και \mathbf{B} της σχέσης (4.1) και οι πίνακες \mathbf{Q} και \mathbf{R} της σχέσης (4.2), είναι σταθεροί. Όσον αφορά τους χρόνους ολοκλήρωσης, ισχύει ότι $t_0 = 0$, και το t_f μπορεί να είναι είτε κάποιος σταθερός αριθμός (*finite horizon*), είτε να τείνει στο άπειρο (*infinite horizon*). Ορίζουμε το πρόβλημα *LQR* λαμβάνοντας υπόψη το t_f της δεύτερης (και γενικευμένης) περίπτωσης.

Το πρόβλημα *LQR* λοιπόν τίθεται ως εξής: Να βρεθεί το σήμα ελέγχου $u(t)$ που να ελαχιστοποιεί την τετραγωνική συνάρτηση κόστους συνεχούς χρόνου

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [x^T(t) \mathbf{Q} x(t) + u^T(t) \mathbf{R} u(t)] dt \quad (4.3)$$

(μετατρέποντας έτσι τη γενική μορφή της (4.2) σε αυτή την ειδική μορφή της συνάρτησης κόστους) η οποία αφορά ένα γραμμικό, χρονικά αμετάβλητο σύστημα, που περιγράφεται στο χώρο κατάστασης από την εξίσωση

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (4.4)$$

Η φυσική σημασία της ελαχιστοποίησης αυτής είναι να περιορίσει την κατάσταση του συστήματος κοντά στο μηδέν, έχοντας συγχρόνως ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Οι πίνακες \mathbf{Q} και \mathbf{R} χρησιμοποιούνται για να εξισορροπούν αυτές τις δυο ιδιότητες. Η εφαρμογή της αρχής του ελαχίστου του Pontryagin (*Pontryagin's minimum principle*) δίνει λύση στο πρόβλημα αυτό. Αυτή η αρχή χρησιμοποιείται στη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου προκειμένου να βρει τον καλύτερο πιθανό έλεγχο

ο οποίος θα μεταβιβάσει ένα δυναμικό σύστημα από τη μια κατάσταση στην άλλη, ειδικά υπό την παρουσία των *φυσικών περιορισμών*.

Σύμφωνα με την αρχή αυτή, η βέλτιστη λύση του προβλήματος του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή είναι της μορφής

$$u(t) = -\mathbf{K}(t)x(t) \quad (4.5)$$

όπου $\mathbf{K}(t)$ είναι ο πίνακας κέρδους ή πίνακας ανατροφοδότησης κατάστασης του συστήματος και δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{K}(t) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) \quad (4.6)$$

Στη σχέση (4.5) λοιπόν έχουμε το βέλτιστο σήμα ελέγχου $u(t)$ στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους της σχέσης (4.3) το οποίο θέτει ο γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής. Γενικά, η σχέση (4.5) δείχνει τη μορφή ανατροφοδότησης του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή. Ο γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής υπολογίζει το βέλτιστο πίνακα $\mathbf{K}(t)$ της ανατροφοδότησης αυτής.

Για τον υπολογισμό του βέλτιστου $\mathbf{K}(t)$ στη σχέση (4.6), προσδιορίζεται ο πίνακας $\mathbf{P}(t)$ της σχέσης αυτής, μέσω της *διαφορικής εξίσωσης Riccati* σε μητρική μορφή

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = -\mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \mathbf{Q} + \mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) \quad (4.7)$$

Η εξίσωση (4.7) είναι μια μη γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης με τερματικές οριακές συνθήκες και άγνωστο τον πίνακα $\mathbf{P}(t)$. Συνήθως λύνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, σπανίως δε αναλυτικά. Ο έλεγχος που προκύπτει είναι χρονικά μεταβαλλόμενος, και για να υλοποιηθεί μέσω υπολογιστή πρέπει να λυθεί η (4.7) “προς τα πίσω”, αρχίζοντας από τον τελικό χρόνο $t = t_f$ (περίπτωση *finite horizon*). Η λύση πρέπει να αποθηκευθεί ψηφιακά για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από τον μηχανισμό του ελεγκτή.

Μια πιο απλή λύση της (4.7) προκύπτει αν τεθεί $t = \infty$ (περίπτωση *infinite horizon*). Στην περίπτωση αυτή ισχύει $\frac{dP}{dt} = 0$, και η (4.7) καταλήγει στην αλγεβρική εξίσωση *Riccati* σε μητρική μορφή

$$0 = -A^T P - PA - Q + PBR^{-1}B^T P \quad (4.8)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής καταλήγει σε σταθερό πίνακα ανατροφοδότησης K . Ο πίνακας αυτός οδηγεί σε ένα συνολικά ευσταθές σύστημα εάν:

- το ζεύγος (A, B) είναι *σταθεροποιήσιμο*,
- $R > 0$ (θετικά ορισμένος), και
- ο Q μπορεί να παραγοντοποιηθεί ως $Q = C_q^T C_q$, όπου C_q είναι οποιοσδήποτε πίνακας, τέτοιος ώστε το ζεύγος (C_q, A) να είναι *εντοπίσιμο*.

Στην (4.8) που προκύπτει στην περίπτωση αυτή, οι πίνακες A, B, Q, R είναι *σταθεροί*. Σημειώνεται ότι γενικά υπάρχουν πολλαπλές λύσεις στην (4.8), όμως μόνο η θετική λύση χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του κέρδους ανατροφοδότησης για τη μετέπειτα χρησιμοποίησή του στη σχέση (4.5).

Συνοψίζοντας με το θεωρητικό κομμάτι του *LQR*, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ρυθμίσεις του ελεγκτή που ακολουθεί τον αλγόριθμο *LQR* αφορούν είτε μια μηχανή είτε μια διαδικασία (όπως, για παράδειγμα, ένα αεροπλάνο ή έναν χημικό αντιδραστήρα). Οι ρυθμίσεις αυτές βρίσκονται χρησιμοποιώντας αυτόν το μαθηματικό αλγόριθμο, ο οποίος ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους που είδαμε, με τη συνάρτηση αυτή να έχει συντελεστές στάθμισης (τους πίνακες Q και R) οι οποίοι παρέχονται από τον άνθρωπο (και συγκεκριμένα το μηχανικό). Αυτή η συνάρτηση κόστους ορίζεται συχνά ως το άθροισμα των αποκλίσεων των βασικών μετρήσεων από τις επιθυμητές τιμές τους. Στην πραγματικότητα, αυτός ο αλγόριθμος βρίσκει τις ρυθμίσεις του ελεγκτή οι οποίες ελαχιστοποιούν αυτές τις ανεπιθύμητες αποκλίσεις.

Όλα όσα αναφέρθηκαν όμως παραπάνω, στην ενότητα αυτή, δύσκολα επιλύονται χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Γι' αυτό το λόγο, περνάμε, στο σημείο αυτό, στην εφαρμογή των παραπάνω στο MATLAB.

Η εντολή του MATLAB “lqr” εντάσσεται στην κατηγορία των λειτουργιών του MATLAB που αφορούν τη σχεδίαση ελέγχου σε συστήματα πολλών εισόδων-πολλών εξόδων (*multiple input-multiple output*, ή αλλιώς “MIMO”), και συγκεκριμένα η εντολή αυτή αφορά τη σχεδίαση ενός γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή. Μέσω της εντολής αυτής υπολογίζεται ο βέλτιστος πίνακας ενίσχυσης \mathbf{K} , έτσι ώστε ο έλεγχος ανάδρασης καταστάσεων στη σχέση (4.5) να ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους

$$J(u) = \int_0^\infty [x^T(t)\mathbf{Q}x(t) + u^T(t)\mathbf{R}u(t) + 2x^T(t)\mathbf{N}u(t)] dt \quad (4.9)$$

υπό τον περιορισμό ενός συστήματος που έχει την εξίσωση κατάστασης (4.4).

Η εντολή αυτή συντάσσεται ως:

$$\mathbf{K} = \text{lqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N})$$

για να επιστρέψει τον βέλτιστο \mathbf{K} το οποίο ικανοποιεί την $u(t) = -\mathbf{K}x(t)$. Παρατηρείται από την (4.9) ότι έχουμε την περίπτωση “infinite horizon” του LQR προβλήματος, άρα οι πίνακες είναι σταθεροί, επομένως και ο \mathbf{K} (βλ. σχέση (4.8)).

Ακόμη, συντάσσεται γενικά ως:

$$[\mathbf{K}, \mathbf{S}, \mathbf{e}] = \text{lqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N})$$

με το \mathbf{S} να επιστρέφει, εφ’ όσον το επιθυμεί ο χρήστης, τη λύση \mathbf{S} της εξίσωσης

$$0 = \mathbf{A}^T\mathbf{S} + \mathbf{S}\mathbf{A} - (\mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{N})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{B}^T\mathbf{S} + \mathbf{N}^T) + \mathbf{Q} \quad (4.10)$$

η οποία έχει τη μορφή της (4.8), με τη διαφορά ότι ο πίνακας \mathbf{P} συμβολίζεται στην (4.10) ως \mathbf{S} , και ότι στον όρο $\mathbf{PBR}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}$ παρεμβάλλεται το \mathbf{N} . Ο πίνακας \mathbf{K} υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{B}^T\mathbf{S} + \mathbf{N}^T) \quad (4.11)$$

η οποία έχει τη μορφή της (4.6). Ακόμη, η εντολή *lqr* επιστρέφει και τις ιδιοτιμές $\mathbf{e} = \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{BK})$.

Το πρόβλημα της σχεδίασης του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή στο περιβάλλον του MATLAB πρέπει να ικανοποιεί τους εξής περιορισμούς:

- το ζεύγος (\mathbf{A}, \mathbf{B}) είναι σταθεροποιήσιμο
- $\mathbf{R} > 0$ (θετικά ορισμένος), και $\mathbf{Q} - \mathbf{NR}^{-1}\mathbf{N}^T \geq 0$
- οι $(\mathbf{Q} - \mathbf{NR}^{-1}\mathbf{N}^T, \mathbf{A} - \mathbf{BR}^{-1}\mathbf{N}^T)$ δεν έχουν μη παρατηρήσιμα *modes* στο φανταστικό άξονα.

4.5 Αλγόριθμος ελέγχου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ελέγχου που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Πριν από την παρουσίασή του είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί η γενική δομή του συστήματος στο οποίο υλοποιείται ο αλγόριθμος αυτός.

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται το συνοπτικό-δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του οποίου η λειτουργία προσομοιώνεται στην εργασία αυτή. Το σύστημα αποτελείται από τον ελεγκτή (*controller*) ο οποίος ακολουθεί τη στρατηγική ελέγχου *LQR*, και το ελεγχόμενο σύστημα, ή αλλιώς τη διαδικασία υπό έλεγχο (*plant*), όπου στην περίπτωση μας είναι η εγκατάσταση του *veDYNA*, ή αλλιώς το *μη τροποποιημένο* μοντέλο (οχήματος) του *veDYNA*.

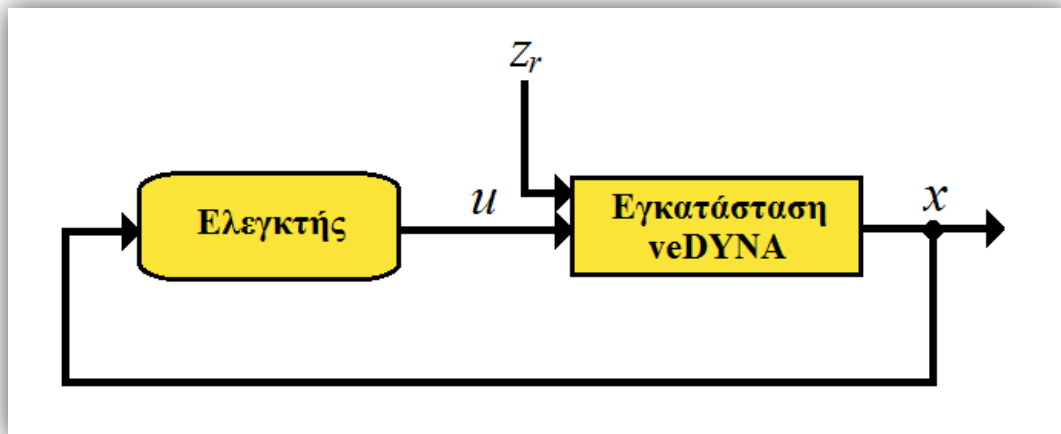
Η έξοδος του ελεγκτή είναι το σήμα ελέγχου u , το οποίο είναι και η είσοδος στην εγκατάσταση *veDYNA*. Αυτό το σήμα ελέγχου θα δούμε ότι είναι ένα διάνυσμα τεσσάρων θέσεων, το οποίο περιέχει τις τιμές των δυνάμεων των τεσσάρων αποσβεστήρων ταλαντώσεων του συστήματος ανάρτησης. Από τη στιγμή που αποτελούν έξοδο του ελεγκτή, είναι και οι τιμές οι οποίες ελέγχονται, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση κόστους που είδαμε στη σχέση (4.3).

Η άλλη είσοδος στην εγκατάσταση *veDYNA*, που είναι και η είσοδος του συστήματος, είναι η διαταραχή z_r , όπου είναι η διαταραχή του δρόμου. Το z_r με άλλα λόγια είναι κάθετη μετατόπιση του επιπέδου του εδάφους στο σημείο στο οποίο προσπίπτει ο κάθε τροχός με το έδαφος, κατά τη διάρκεια κίνησης του οχήματος. Η δια-

ταραχή αυτή είναι λοιπόν ένα διάνυσμα τεσσάρων θέσεων για τις τέσσερις κάθετες μετατοπίσεις του εδάφους στον κάθε τροχό.

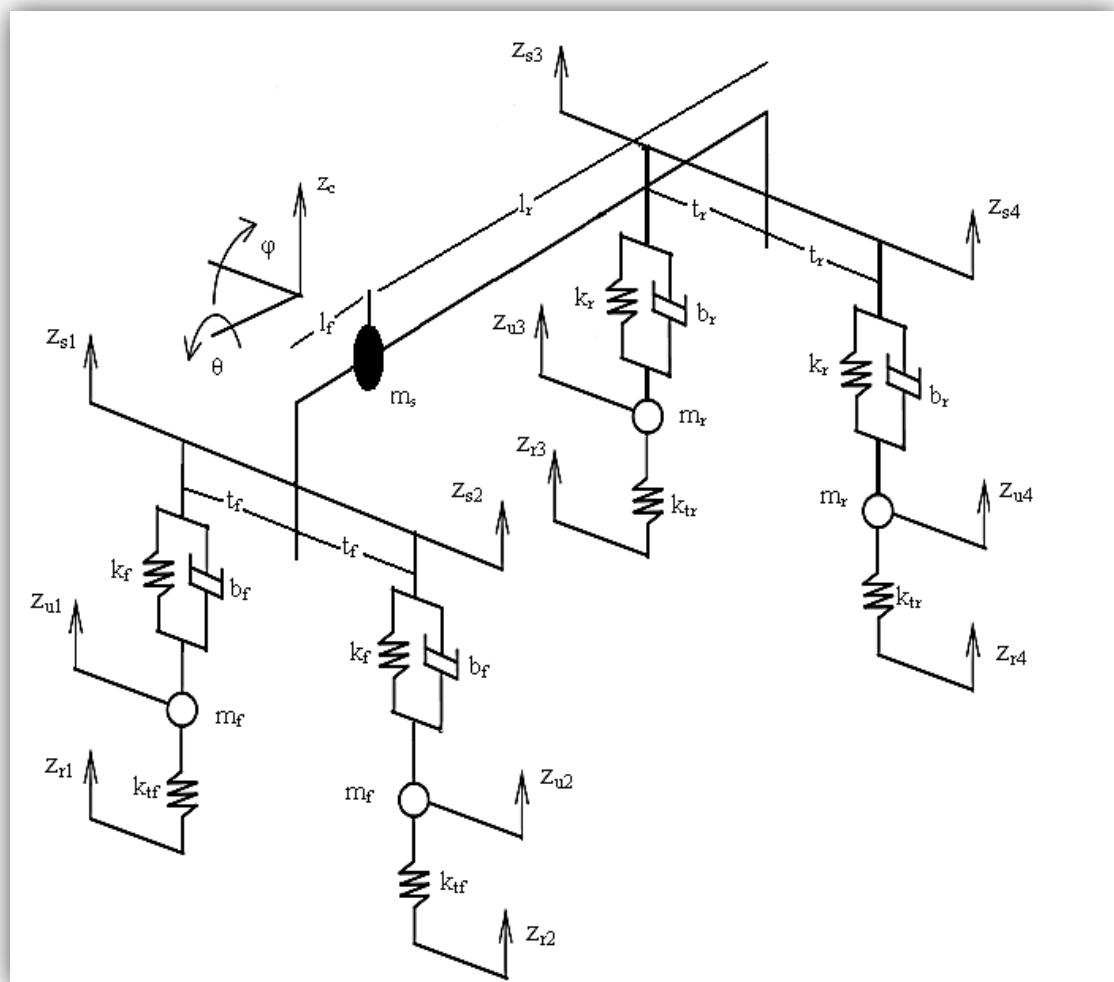
Η έξοδος της εγκατάστασης του *veDYNA* η οποία είναι και η έξοδος του συστήματος, είναι το διάνυσμα κατάστασης x , το οποίο συνδέεται με τον ελεγκτή σχηματίζοντας ανατροφοδότηση. Το διάνυσμα κατάστασης x αποτελεί λοιπόν την είσοδο στον ελεγκτή, σχηματίζοντας έτσι ένα σύστημα κλειστού βρόγχου (*closed-loop system*).

Το βασικό πρόβλημα που επιλύεται στην εργασία αυτή, με βάση την **Εικόνα 4.2**, είναι το εξής: ποιος είναι ο βέλτιστος πίνακας K ο οποίος ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους στην περίπτωση του προβλήματος *LQR*, και ο οποίος δίνει το κατάλληλο και βέλτιστο σήμα ελέγχου $u(t) = -Kx(t)$, (το οποίο ρυθμίζει την έξοδο του συστήματος $x(t)$ σύμφωνα με την ελαχιστοποίηση του κόστους αυτού), καθώς εισέρχεται στο σύστημα η διαταραχή εισόδου z_r . Αυτό το κριτήριο κόστους (του προβλήματος *LQR*) το προσαρμόζουμε, όπως θα δούμε, με τρία βασικά κριτήρια απόδοσης των αναρτήσεων, αφού το σύστημα ανάρτησης του οχήματος του *veDYNA* είναι το σύστημα το οποίο ελέγχεται στην εργασία αυτή.



Εικόνα 4.2 – Το συνοπτικό - δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του οποίου η λειτουργία προσομοιώνεται

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται το *μαθηματικό υπόδειγμα του αυτοκινήτου* με βάση το οποίο εκτελείται ο αλγόριθμος ελέγχου *LQR*. Το υπόδειγμα αυτό απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.3**. Το μαθηματικό υπόδειγμα του αυτοκινήτου που προσομοιώνουμε σε αυτή την εργασία είναι τεσσάρων τετάρτων, και ονομάζεται *πλήρες μοντέλο αυτοκινήτου* (*full car model*). Αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζει την συμπεριφορά του αυτοκινήτου στο σύνολό του, και όχι σε μέρος αυτού. Το υπόδειγμα αυτό περιλαμβάνει πέντε μέρη: το πλαίσιο-σασί και τους τέσσερις τροχούς.



Εικόνα 4.3 – Μαθηματικό υπόδειγμα πλήρους μοντέλου αυτοκινήτου 7 βαθμών ελευθερίας

Θεωρούμε ότι το πλαίσιο έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (3-DOF). Επιτρέπει κίνηση στον κατακόρυφο άξονα z του τρισδιάστατου επιπέδου στο οποίο θεωρούμε ότι κινείται το αυτοκίνητο του υποδείγματος, περιστροφή γύρω από τον άξονα x , και περιστροφή γύρω από τον άξονα y . Με την περιστροφή γύρω από τον άξονα x σχηματίζεται η γωνία θ που απεικονίζεται στο σχήμα, η οποία είναι η λεγόμενη *roll angle*, και με την περιστροφή γύρω από τον άξονα y σχηματίζεται η γωνία φ που απεικονίζεται στο σχήμα, η οποία είναι η λεγόμενη *pitch angle* (βλ. και **Εικόνα 2.5**). Η μετατόπιση στον άξονα z , όπως και η περιστροφή στον άξονα x και στον άξονα y γίνεται με αναφορά το κέντρο βάρους του αυτοκινήτου.

Κάθε ένας από τους τέσσερις τροχούς επιτρέπει κατακόρυφη κίνηση στον άξονα z ανεξάρτητη από την κατακόρυφη κίνηση του πλαισίου. Έτσι, ο κάθε τροχός προσφέρει ένα βαθμό ελευθερίας στην κίνηση του συστήματος. Συνολικά, οι τέσσερις τροχοί προσφέρουν τέσσερις βαθμούς ελευθερίας στην κίνηση του μοντέλου (4-DOF). Κατά συνέπεια, το μοντέλο αυτό έχει επτά βαθμούς ελευθερίας (7-DOF). Η μετατόπιση καθενός από τους τέσσερις τροχούς στον άξονα z γίνεται με αναφορά το κέντρο βάρους αυτών. Οι επτά βαθμοί ελευθερίας αυτού του πλήρους μοντέλου αυτοκινήτου διαμορφώνουν το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος που μελετάμε, ή αλλιώς του συστήματος της Εικόνα 4.2.

Στο σημείο αυτό σημειώνονται τα εξής:

- Η γεωμετρία του δρόμου αποτελεί την είσοδο διαταραχής (*disturbance input*) στο σύστημά μας, και χαρακτηρίζεται από τις ανωμαλίες του (λακκούβες ή σαμαράκια). Η συμπεριφορά αυτή αντιπροσωπεύεται από την κατακόρυφη μετατόπισή του στον άξονα z , η οποία μετατόπιση συμβολίζεται με z_r .
- Η συμπεριφορά καθενός από τους τέσσερις τροχούς αντιπροσωπεύεται από την κατακόρυφη μετατόπισή τους στον άξονα z , η οποία μετατόπιση συμβολίζεται με z_u .
- Η συμπεριφορά του αυτοκινήτου αντιπροσωπεύεται από τους τρεις βαθμούς ελευθερίας της κίνησης του πλαισίου, δηλαδή από την κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα z και τις περιστροφές στους άξονες x και y , οι οποίες μετατοπίσεις συμβολίζονται με z_c , θ , φ αντίστοιχα.

- Η συμπεριφορά των *αναρτήσεων* αντιπροσωπεύει την δύναμη που ασκείται στο πλαίσιο από τη διάταξη απόσβεσης της κάθε μιας από τις αναρτήσεις αυτές. Ο *ελεγκτής* καθορίζει την συμπεριφορά των αναρτήσεων.

Όσον αφορά τώρα τα βασικά σημεία της λειτουργίας του μαθηματικού υποδείγματος πλήρους μοντέλου αυτοκινήτου το οποίο χρησιμοποιούμε (και κατ' επέκταση του συστήματος της Εικόνα 4.2), έχουμε τα εξής:

- Είσοδος είναι η *γεωμετρία του δρόμου (διαταραχή)* και έξοδος η συμπεριφορά των *τροχών* και του *πλαισίου (κατάσταση)*.
- Η γεωμετρία του δρόμου καθορίζει τη συμπεριφορά των *τροχών*.
- Η συμπεριφορά των τροχών είναι αποτέλεσμα της γεωμετρίας του δρόμου, και εξαρτάται από την σταθερά ακαμψίας των ελαστικών. Η συμπεριφορά των τροχών, σε συνδυασμό με τον *ελεγκτή* της ανάρτησης, καθορίζει τη συμπεριφορά του *πλαισίου*.
- Η συμπεριφορά της *ανάρτησης* εξαρτάται από την συμπεριφορά των *τροχών* και του *ελεγκτή*.
- Η συμπεριφορά του *αυτοκινήτου (πλαισίου)* είναι αποτέλεσμα της συμπεριφοράς των *ενεργητικών αναρτήσεων*.

Έπειτα από τη διατύπωση και την παρουσίαση του βασικού προβλήματος της εργασίας αυτής, η οποία έγινε με βάση την Εικόνα 4.2, αλλά και έπειτα από την παρουσίαση του μαθηματικού υποδείγματος αυτοκινήτου στο οποίο βασίζεται ο αλγόριθμος που επιλύει το πρόβλημα αυτό, σε αυτό το σημείο μπορεί να αρχίσει η παρουσίαση των στοιχείων του αλγορίθμου αυτού.

Οι μεταβλητές και οι παράμετροι των σχέσεων του αλγορίθμου περιγράφονται στους **Πίνακας 4.1** και **Πίνακας 4.2** αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση που έγινε στο περιβάλλον του *veDYNA*, αφορά το όχημα του *veDYNA*, και δεν έγινε (δε χρειαζόταν να γίνει) από μέρους μας προσθήκη κάποιου διαφορετικού οχήματος του οποίου τη συμπεριφορά θα προσομοιώναμε. Κατά συνέπεια, οι τιμές των παραμέτρων που υπάρχουν στον **Πίνακας 4.2** αφορούν τις τιμές του οχήματος αυτού, δηλαδή τις τιμές των αντίστοιχων πεδίων που υπάρχουν στο προσθετικό *GUI* του

οχήματος, ή αλλιώς του *veDYNA Assembly GUI*, το οποίο και απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.4**.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα
z_c	Κάθετη μετατόπιση του κέντρου βάρους του πλαισίου	m
θ	Περιστροφή του πλαισίου γύρω από τον x άξονα (<i>roll angle</i>)	rad
φ	Περιστροφή του πλαισίου γύρω από τον y άξονα (<i>pitch angle</i>)	rad
z_{ui}	Κάθετη μετατόπιση του τροχού i	m
z_{si}	Κάθετη μετατόπιση του πλαισίου στη θέση i	m
z_{ri}	Κάθετη μετατόπιση του δρόμου στη θέση i (είσοδος διαταραχής)	m
u_i	Δύναμη που ασκεί η διάταξη απόσβεσης στη θέση i	N

Πίνακας 4.1 – Οι μεταβλητές των σχέσεων που περιγράφουν το μαθηματικό μοντέλο. Όπου $i=1$ μπροστινός δεξιός τροχός, $i=2$ μπροστινός αριστερός τροχός, $i=3$ πίσω δεξιός τροχός, $i=4$ πίσω αριστερός τροχός.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Μονάδα	Τιμή
m_s	Μάζα πλαισίου	kg	1134.8
m_f	Μάζα καθενός από τους μπροστινούς τροχούς	kg	37.6
m_r	Μάζα καθενός από τους πίσω τροχούς	kg	43
I_θ	Ροπή αδράνειας του πλαισίου γύρω από τον x άξονα	kg·m ²	305
I_φ	Ροπή αδράνειας του πλαισίου γύρω από τον y άξονα	kg·m ²	1520
b_f	Συντελεστής απόσβεσης μπροστινών αναρτήσεων	N·s/m	987.717
b_r	Συντελεστής απόσβεσης πίσω αναρτήσεων	N·s/m	858.568
k_f	Σταθερά ακαμψίας μπροστινών αναρτήσεων	N/m	17098.09
k_r	Σταθερά ακαμψίας πίσω αναρτήσεων	N/m	27183.53
r_f	Σταθερά ακαμψίας μπροστινής αντιστρεπτικής δοκού	Nm/deg	2609.704
r_r	Σταθερά ακαμψίας πίσω αντιστρεπτικής δοκού	Nm/deg	196.6071
k_{tf}	Σταθερά ακαμψίας μπροστινών τροχών	N/m	180000
k_{tr}	Σταθερά ακαμψίας πίσω τροχών	N/m	180000
t_f	Μισή από την απόσταση που απέχουν οι μπροστινοί τροχοί	m	0.7025
t_r	Μισή από την απόσταση που απέχουν οι πίσω τροχοί	m	0.6995
l_f	Απόσταση μπροστινών τροχών από το κέντρο βάρους του πλαισίου	m	1.275
l_r	Απόσταση πίσω τροχών από το κέντρο βάρους του πλαισίου	m	1.343

Πίνακας 4.2 – Οι παράμετροι των σχέσεων που περιγράφουν το μαθηματικό υπόδειγμα

Προχωράμε τώρα στις εξισώσεις κίνησης του υποδείγματος που εξετάζουμε, οι οποίες είναι:

$$M_s \begin{bmatrix} \ddot{z}_c \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = GB_s \left(\begin{bmatrix} \dot{z}_{u_1} \\ \dot{z}_{u_2} \\ \dot{z}_{u_3} \\ \dot{z}_{u_4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{z}_{s_1} \\ \dot{z}_{s_2} \\ \dot{z}_{s_3} \\ \dot{z}_{s_4} \end{bmatrix} \right) + GK_{sr} \left(\begin{bmatrix} z_{u_1} \\ z_{u_2} \\ z_{u_3} \\ z_{u_4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{s_1} \\ z_{s_2} \\ z_{s_3} \\ z_{s_4} \end{bmatrix} \right) + G \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$M_u \begin{bmatrix} \ddot{z}_{u_1} \\ \ddot{z}_{u_2} \\ \ddot{z}_{u_3} \\ \ddot{z}_{u_4} \end{bmatrix} = -B_s \left(\begin{bmatrix} \dot{z}_{u_1} \\ \dot{z}_{u_2} \\ \dot{z}_{u_3} \\ \dot{z}_{u_4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{z}_{s_1} \\ \dot{z}_{s_2} \\ \dot{z}_{s_3} \\ \dot{z}_{s_4} \end{bmatrix} \right) - K_{ss} \begin{bmatrix} z_{u_1} \\ z_{u_2} \\ z_{u_3} \\ z_{u_4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{s_1} \\ z_{s_2} \\ z_{s_3} \\ z_{s_4} \end{bmatrix} - K_t \left(\begin{bmatrix} z_{u_1} \\ z_{u_2} \\ z_{u_3} \\ z_{u_4} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{r_1} \\ z_{r_2} \\ z_{r_3} \\ z_{r_4} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

όπου:

$$M_s = \begin{bmatrix} m_s & & & \\ & I_\theta & & \\ & & I_\varphi & \\ & & & \end{bmatrix}, \quad B_s = \begin{bmatrix} b_f & & & \\ & b_f & & \\ & & b_r & \\ & & & b_r \end{bmatrix}, \quad M_u = \begin{bmatrix} m_f & & & \\ & m_f & & \\ & & m_r & \\ & & & m_r \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$K_{ss} = \begin{bmatrix} k_f & & & \\ & k_f & & \\ & & k_r & \\ & & & k_r \end{bmatrix}, \quad K_t = \begin{bmatrix} k_{tf} & & & \\ & k_{tf} & & \\ & & k_{tr} & \\ & & & k_{tr} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -t_f & t_f & -t_r & t_r \\ -l_f & -l_f & l_r & l_r \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$K_{sr} = \begin{bmatrix} k_f + r_f / 2 & -r_f / 2 & 0 & 0 \\ -r_f / 2 & k_f + r_f / 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_r + r_r / 2 & -r_r / 2 \\ 0 & 0 & -r_r / 2 & k_r + r_r / 2 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Ισχύει, επίσης, η σχέση

$$\begin{bmatrix} z_{s_1} \\ z_{s_2} \\ z_{s_3} \\ z_{s_4} \end{bmatrix} = G^T \begin{bmatrix} z_c \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Αντικαθιστώντας την (4.16) στις (4.11) και (4.12), έχουμε:

$$M_z \ddot{z} + B_z \dot{z} + K_a z - K_b z_r = G_a u \quad (4.17)$$

όπου

$$z = \begin{bmatrix} p^T & \vdots & z_u^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^7, \quad p^T = \begin{bmatrix} z_c & \theta & \varphi \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

και

$$G_a = \begin{bmatrix} G \\ -I \end{bmatrix}, \quad K_b = \begin{bmatrix} 0 \\ K_t \end{bmatrix}, \quad K_a = \begin{bmatrix} GK_{sr}G^T & -GK_{sr} \\ -K_{ss}G^T & K_t + K_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$B_z = \begin{bmatrix} GB_sG^T & -GB_s \\ -B_sG^T & B_s \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} M_s & \\ & M_u \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Η (4.17) μπορεί να γραφτεί στο χώρο κατάστασης με την εξής μορφή:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fz_r \quad (4.21)$$

όπου

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K_a & -M^{-1}B_z \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}G_a \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}K_b \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

και

$$x = \begin{bmatrix} z_c & \theta & \varphi & z_{u_1} & z_{u_2} & z_{u_3} & z_{u_4} & \dot{z}_c & \dot{\theta} & \dot{\varphi} & \dot{z}_{u_1} & \dot{z}_{u_2} & \dot{z}_{u_3} & \dot{z}_{u_4} \end{bmatrix}^T \quad (4.23)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 \end{bmatrix}^T \quad (4.24)$$

$$z_r = \begin{bmatrix} z_{r_1} & z_{r_2} & z_{r_3} & z_{r_4} \end{bmatrix}^T \quad (4.25)$$

Το διάνυσμα x είναι το *διάνυσμα κατάστασης* του συστήματος, το u είναι το *σήμα ελέγχου*, το οποίο είναι το διάνυσμα της *προσθετικής και ελεγχόμενης* ασκούμενης δύναμης από τη διάταξη απόσβεσης στο πλαίσιο του αυτοκινήτου, και το z_r είναι το *διάνυσμα διαταραχής*.

Περνάμε τώρα σε αυτό το οποίο ελέγχουμε, το στοιχείο δηλαδή στο οποίο βρίσκεται εφαρμογή η στρατηγική ελέγχου της παρούσας εργασίας, και το οποίο είναι το σύστημα ανάρτησης του αυτοκινήτου. Παρουσιάζονται κάποια βασικά κριτήρια απόδοσης των αναρτήσεων, τα οποία προσαρμόζουμε στο κριτήριο απόδοσης του προβλήματος *LQR*. Στην ενότητα **3.3** του προηγούμενου κεφαλαίου αναφέρθηκαν κάποιες από τις συνθήκες υπό τις οποίες ένα σύστημα ανάρτησης του αυτοκινήτου εκπληρώνει το σκοπό του. Οι συνθήκες αυτές αποτελούν και κριτήρια απόδοσης των αναρτήσεων.

Το σύννηθες κριτήριο απόδοσης που ικανοποιεί η στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζουμε, και που χρησιμοποιείται στη σχεδίαση των αναρτήσεων είναι “πολυδιάστατο” και συναποτελείται από τα εξής βασικά κριτήρια:

1. *Κριτήριο ευστάθειας*: διατήρηση του αυτοκινήτου σε παράλληλη ως προς το δρόμο θέση

2. *Κριτήριο άνεσης:* ελαχιστοποίηση κατακόρυφων επιταχύνσεων εξαιτίας της γεωμετρίας του δρόμου
3. *Κριτήριο εξοικονόμησης ενέργειας:* ελαχιστοποίηση κόστους ελέγχου

Η μαθηματική περιγραφή των παραπάνω κριτηρίων έχει ως εξής:

$$1. \quad \min_u J_1 = (z_s - z_r)^T Q_1 (z_s - z_r) \quad (4.26)$$

Παρατηρείται ότι η μορφή που έχει η (4.26) απαιτεί γνώση των z_r , δηλαδή της μορφολογίας του εδάφους στο οποίο προσπίπτουν οι τροχοί, κάτι το οποίο (προς το παρόν) είναι αδύνατο με εύκολο και οικονομικό τρόπο. Έτσι, ένα τροποποιημένο κριτήριο είναι το:

$$1a. \quad \min_u J_{1a} = z_s^T Q_1 z_s \quad (4.26)$$

το οποίο, λόγω της (4.16), είναι ισοδύναμο με το:

$$1a. \quad \min_u J_{1a} = [z_c \quad \theta \quad \varphi] Q_1 [z_c \quad \theta \quad \varphi]^T \quad (4.27)$$

Σε όρους του διανύσματος κατάστασης (4.23), η (4.27) γίνεται:

$$1a. \quad \min_u J_{1a} = x^T \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & & \cdots & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & & \\ 0 & & q_{33} & 0 & \\ 0 & & & 0 & \\ & & & & \ddots & \vdots \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} x = x^T Q_{1,x} x \quad (4.28)$$

$$2. \quad \min_u J_2 = \begin{bmatrix} \ddot{z}_c & \ddot{\theta} & \ddot{\phi} \end{bmatrix} Q_2 \begin{bmatrix} \ddot{z}_c & \ddot{\theta} & \ddot{\phi} \end{bmatrix}^T \quad (4.29)$$

Και αυτό το κριτήριο όμως έχει ένα πρόβλημα, καθώς οι επιταχύνσεις \ddot{z}_c , $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ δεν είναι μέρος του διανύσματος κατάστασης (4.23). Μπορούν όμως να εκφραστούν μέσω αυτού, δια των (4.21) - (4.23). Έτσι,

$$\dot{x}_{8-10} = A_{8-10}x + B_{8-10}u \quad (4.30)$$

όπου οι δείκτες ορίζουν τις γραμμές 8-10 των αντίστοιχων μεγεθών, ενώ ο όρος της διαταραχής έχει παραλειφθεί. Αντικαθιστώντας τώρα την (4.30) στην (4.29), δίνει:

$$\begin{aligned} 2a. \quad \min_u J_2 &= (A_{8-10}x + B_{8-10}u)^T Q_2 (A_{8-10}x + B_{8-10}u) = \\ &= x^T A_{8-10}^T Q_2 A_{8-10}x + 2x^T A_{8-10}^T Q_2 B_{8-10}u + u^T B_{8-10}^T Q_2 B_{8-10}u = \\ &= x^T Q_{2,x}x + 2x^T Q_{2,xu}u + u^T Q_{2,u}u \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$3. \quad \min_u J_3 = u^T R_1 u \quad (4.32)$$

Συνδυάζοντας τις (4.28), (4.31), (4.32), έχουμε:

$$\begin{aligned} \min_u J &= \int_0^\infty \left[x^T Q_{2,x}x + 2x^T Q_{2,xu}u + u^T Q_{2,u}u + u^T R_1 u + x^T Q_{1,x}x \right] dx = \\ &= \int_0^\infty \left[x^T (Q_{2,x} + Q_{1,x})x + 2x^T Q_{2,xu}u + u^T (Q_{2,u} + R_1)u \right] dx = \\ &= \int_0^\infty \left[x^T Qx + 2x^T Nu + u^T Ru \right] dx \end{aligned} \quad (4.33)$$

Παρατηρούμε ότι καταλήξαμε στην (4.9) της ενότητας **4.4.2**, στην οποία αναλύθηκε το κομμάτι του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή, και ειδικότερα στο κομμάτι του ρυθμιστή αυτού στο MATLAB. Η λύση της (4.33) είδαμε ότι δίνεται λοιπόν απ' την

$$u^*(t) = -Kx(t) \quad (4.34)$$

όπου ο πίνακας K υπολογίζεται, όπως επίσης είδαμε, από την

$$[K, S, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R, N)$$

ενώ οι Q, R, N είναι

$$Q = A_{8-10}^T Q_2 A_{8-10} + Q_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & & \\ 0 & & 1 & 0 & \\ 0 & & & 0 & \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$R = B_{8-10}^T Q_2 B_{8-10} + R_1 \quad (4.36)$$

$$N = A_{8-10}^T Q_2 B_{8-10} \quad (4.37)$$

Άρα, ορίζοντας τους Q_1, Q_2, R_1 , αυτόματα ορίζονται οι Q, R, N . Για να επιλέξουμε τιμές για τους Q_1, Q_2, R_1 , θεωρούμε τα όρια των τιμών των μεταβλητών που εμπλέκονται, καθώς και τη σχετική βαρύτητα των τριών κριτηρίων 1, 2, 3 που είδαμε παραπάνω. Έτσι:

$$R_1 = 5 * 10^{-6} * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{200}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{200}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{200}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{200}} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$Q_{1,x} = 0,8 * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{0.2}} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{0.2}} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{0.2}} & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$Q_{2,x} = 0,2 * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Έτσι, ο βέλτιστος πίνακας K που επιστρέφει η εντολή `lqr` του MATLAB, είναι ένας πίνακας 4×14 με τιμές:

$$K = 1 * 10^4 * \begin{bmatrix} -0.4501 & 0.9418 & 0.4172 & 0.3307 & 0.1489 & 0.1271 & -0.1102 & 0.0518 & -0.0379 & -0.0554 & 0.0257 & -0.0034 & 0.0131 & -0.0129 \\ -0.4501 & -0.9418 & 0.4172 & 0.1489 & 0.3307 & -0.1102 & 0.1271 & 0.0518 & 0.0379 & -0.0554 & -0.0034 & 0.0257 & -0.0129 & 0.0131 \\ -0.6186 & 0.9846 & -0.8975 & 0.7421 & -0.7126 & 1.1934 & -0.3487 & 0.0869 & -0.0241 & 0.0949 & 0.0162 & -0.0158 & 0.0204 & -0.0014 \\ -0.6186 & -0.9846 & -0.8975 & -0.7126 & 0.7421 & -0.3487 & 1.1934 & 0.0869 & 0.0241 & 0.0949 & -0.0158 & 0.0162 & -0.0014 & 0.0204 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Αυτός ο βέλτιστος πίνακας K οδηγεί στη δημιουργία ενός βέλτιστου σήματος ελέγχου $u(t)$, το οποίο είναι ένα διάνυσμα τεσσάρων διαστάσεων (πίνακας 4×1). Το σήμα αυτό είναι αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού ενός 4×14 πίνακα και ενός διάνυσματος κατάστασης $x(t)$ δεκατεσσάρων διαστάσεων (πίνακας 14×1), με αποτέ-

λεσµα να προκύψει το σήµα $u(t)$ το οποίο περιέχει τις τέσσερις δυνάµεις που ασκούν οι τέσσερις αποσβεστήρες ταλαντώσεων της ανάρτησης στο αµάξωµα.

*Πως όμως εφαρµόζονται από µέρους µας όλα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα αυτή; Απαντάµε στο ερώτηµα αυτό αναφέροντας τα δυο βήµατα της εκτέλεσης του αλγορίθµου ελέγχου *LQR*:*

- Αρχικά, υλοποιείται *προγραμματιστικά* ο αλγόριθµος αυτός. µέσω της σύνταξης κατάλληλου *script* αρχείου (*m-file*) στο MATLAB, µε το αρχείο αυτό να επιστρέφει το βέλτιστο πίνακα K έπειτα από τον καθορισµό των τιµών των παραµέτρων του Πίνακα 4.2 αλλά και των συντελεστών βάρους των τριών κριτηρίων απόδοσης από το χρήστη.
- Στη συνέχεια, αυτός ο πίνακας χρησιµοποιείται στη *σχεδιαστική* υλοποίηση του αλγορίθµου στο µοντέλο *Simulink* της προσοµοίωσής µας, ολοκληρώνοντας έτσι την κατασκευή του αλγορίθµου *LQR*. Αυτή τη σχεδιαστική υλοποίηση γίνεται εφαρµόζοντας τη σχέση $u(t) = -Kx(t)$ στο µοντέλο αυτό. Η οντότητα *External Suspension* της **Εικόνα 4.4** που υπάρχει παρακάτω αφορά αυτό το δεύτερο και τελικό βήµα εκτέλεσης του αλγορίθµου.

4.5.1 Η σχεδιαστική υλοποίηση στο *Simulink*

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η σχεδιαστική υλοποίηση του αλγορίθµου *LQR* στο *Simulink*, το περιβάλλον µοντελοποίησης του *veDYNA*. Αυτή η σχεδιαστική υλοποίηση γίνεται εφαρµόζοντας τη σχέση $u(t) = -Kx(t)$ στην οντότητα *External Suspension*.

Στην **Εικόνα 4.4** απεικονίζεται το εσωτερικό της οντότητας *Vehicle System* στο εσωτερικό του “*vdy_mdl*” που απεικονίζεται στην **εικόνα 2.3** του 2^{ου} κεφαλαίου. Στο 2^ο κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάστηκε το περιβάλλον του *veDYNA*, παρουσιάζεται η δοµή *veDYNA Simulation Model* (*vdy_mdl*). Σε αυτό το σηµείο

τροποποιούμε ένα μέρος του εσωτερικού του *Vehicle System*, με το *Vehicle System* να είναι το σημείο στο οποίο πρέπει να παρέμβουμε προκειμένου να υλοποιήσουμε τη στρατηγική ελέγχου στο μοντέλο οχήματος του *veDYNA*, σε αντίθεση με τα άλλα δομικά στοιχεία του *vdyn_md1* στα οποία δεν παρεμβαίνουμε.

Στην Εικόνα 4.4 λοιπόν παρατηρείται ότι υπάρχουν δυο οντότητες/δομικά στοιχεία:

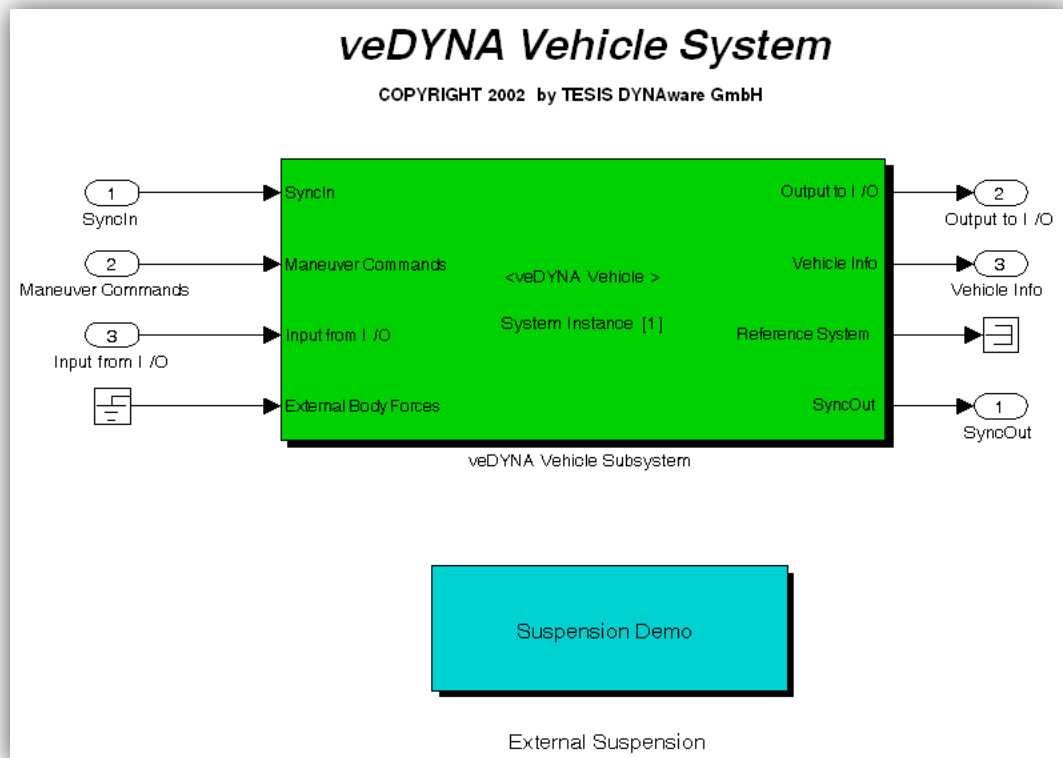
- η οντότητα *veDYNA Vehicle Subsystem* η οποία αφορά το σύστημα οχήματος του *veDYNA*, με το όχημα αυτό να διαιρείται και να δομείται σε ξεχωριστά συστήματα/στοιχεία, τα οποία είναι τα *Brake System*, *Chassis Subsystem*, *Engine Subsystem*, *Driveline Subsystem*, *Front Axle WheelSystem*, και *Rear Axle WheelSystem*. Στην οντότητα αυτή δεν παρεμβαίνουμε.
- η οντότητα *External Suspension*, η οποία αφορά το σύστημα της εξωτερικής ανάρτησης του *veDYNA*. Η οντότητα αυτή είναι η οντότητα στην οποία υλοποιούμε σχεδιαστικά τη στρατηγική ελέγχου της εργασίας αυτής. Με τον όρο *εξωτερική* εννοούμε την ανάρτηση η οποία είναι *ορισμένη από το χρήστη* και είτε *αντικαθιστά* την *εσωτερική* ανάρτηση του *veDYNA* ισχύοντας μόνο οι έξοδοι των δυνάμεων που παράγει αυτή η *user-defined* οντότητα (*switches=1*), είτε *προσθέτει* στην *εσωτερική* ανάρτηση τις δυνάμεις/εξόδους της *εξωτερικής* ανάρτησης (*switches = 0*). Στην περίπτωση που αντικαθιστάμε την *εσωτερική* ανάρτηση με την *εξωτερική* έχουμε το σύστημα της *παθητικής* ανάρτησης, ενώ στην περίπτωση στην οποία *προσθέτουμε* την *εξωτερική* στην *εσωτερική* έχουμε το σύστημα της *ενεργητικής* ανάρτησης. Στην περίπτωση μας έχουμε το σύστημα *ενεργητικής* ανάρτησης. Αυτές οι δυο περιπτώσεις υλοποιούνται αναθέτοντας την αντίστοιχη τιμή 0 ή 1 σε διακόπτες (*switches*) όπως θα δούμε παρακάτω, επομένως αυτό που έπρεπε να κάνουμε προκειμένου να καθορίσουμε το σύστημα ανάρτησής μας, ήταν να θέσουμε τις τιμές των διακοπών που μας αφορούσαν ίσες με 0.

Η *εσωτερική* ανάρτηση του *veDYNA* υπάρχει στο *Chassis Subsystem* της *veDYNA vehicle* οντότητας (η ανάρτηση δηλαδή ανήκει στο πλαίσιο-“σασί” του οχή-

ματος) στο εσωτερικό του *veDYNA Vehicle Subsystem*. (Αξίζει να σημειωθεί ότι το εσωτερικό του *Chassis Subsystem* και των άλλων δομικών στοιχείων της *veDYNA vehicle* οντότητας δεν είναι ορατά στο χρήστη και δε μπορούν να τροποποιηθούν με βάση το *license* της *light* έκδοσης που είναι στην κατοχή μας.) Επομένως, εσωτερική είναι η αρχική ανάρτηση του *veDYNA* η οποία δεν τροποποιείται άμεσα μέσω του *Chassis Subsystem* (τουλάχιστον με το *license* που έχουμε), και στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να την τροποποιήσει, το επιτυγχάνει μέσω της εξωτερικής ανάρτησης και την οντότητα *External Suspension*, η οποία είτε αντικαθιστά την εσωτερική, είτε προστίθεται στην εσωτερική.

Εξάλλου, τα παραπάνω επεκτείνονται και πέρα από το σύστημα ανάρτησης, για διάφορα συστήματα που επιθυμεί να ορίσει ο χρήστης, αφού μια προφανής εφαρμογή του περιβάλλοντος *Simulink* είναι η πρόσθεση εξωτερικών υποσυστημάτων στο μοντέλο οχήματος του *veDYNA*. Αυτά τα υποσυστήματα λοιπόν μπορούν να περιγράφουν:

- Συγκεκριμένα *components* του μοντέλου ορισμένα από το χρήστη, τα οποία παράγουν δυνάμεις (όπως στην περίπτωσή μας το στοιχείο *External Suspension* παράγει τις προσθετικές δυνάμεις των διατάξεων απόσβεσης), ροπές, μετατοπίσεις, οι οποίες περνάνε στο αρχικό μοντέλο οχήματος του *veDYNA* (για παράδειγμα το στοιχείο του μοντέλου που αφορά το σύστημα της μηχανής, των τροχών, το *steering system*, κ.ά., και το σύστημα της ανάρτησης όπως στην περίπτωσή μας)
- Ενεργητικά στοιχεία και ελεγκτές (όπως *anti-roll* συστήματα, *controlled locking torques*, *TCU*, κ.ά., και ενεργητικές διατάξεις απόσβεσης – *active dampers*, όπως στην περίπτωσή μας, οι οποίες και ορίζουν ένα σύστημα ενεργητικής ανάρτησης)



Εικόνα 4.4 – Το εσωτερικό της οντότητας *Vehicle System* στο εσωτερικό του “vdy_mdl” που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.3

Στην **Εικόνα 4.5** απεικονίζεται η δομή της οντότητας *External Suspension*. Η οντότητα αυτή αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- *Suspension States*, μέσω του οποίου διαβάζονται οι μεταβλητές του *veDYNA* που μας ενδιαφέρουν
- *Suspension*, μέσω του οποίου εφαρμόζεται η σχέση $u(t) = -Kx(t)$
- *Suspension Control*, μέσω του οποίου εγγράφονται στο *veDYNA Vehicle Subsystem* οι τιμές των ελεγχόμενων δυνάμεων των τεσσάρων αποσβεστήρων ταλαντώσεων

Και οι τρεις αυτές οντότητες αλληλεπιδρούν με το ίδιο στοιχείο: με το μοντέλο οχήματος του *veDYNA*. Οι οντότητες *Suspension States* και *Suspension Control* αποτελούν την επικοινωνία των *user-defined components* που βρίσκονται στην οντότητα *Suspension*, με το μοντέλο *Simulink* του *veDYNA*. Η επικοινωνία αυτή γίνεται μέ-

σω των οντοτήτων *ReadToWorkspace* και *WriteToWorkspace* που υπάρχουν στο εσωτερικό των οντοτήτων *Suspension States* και *Suspension Control* αντίστοιχα, με την επικοινωνία αυτή να έχει τη μορφή μεταφοράς δεδομένων.

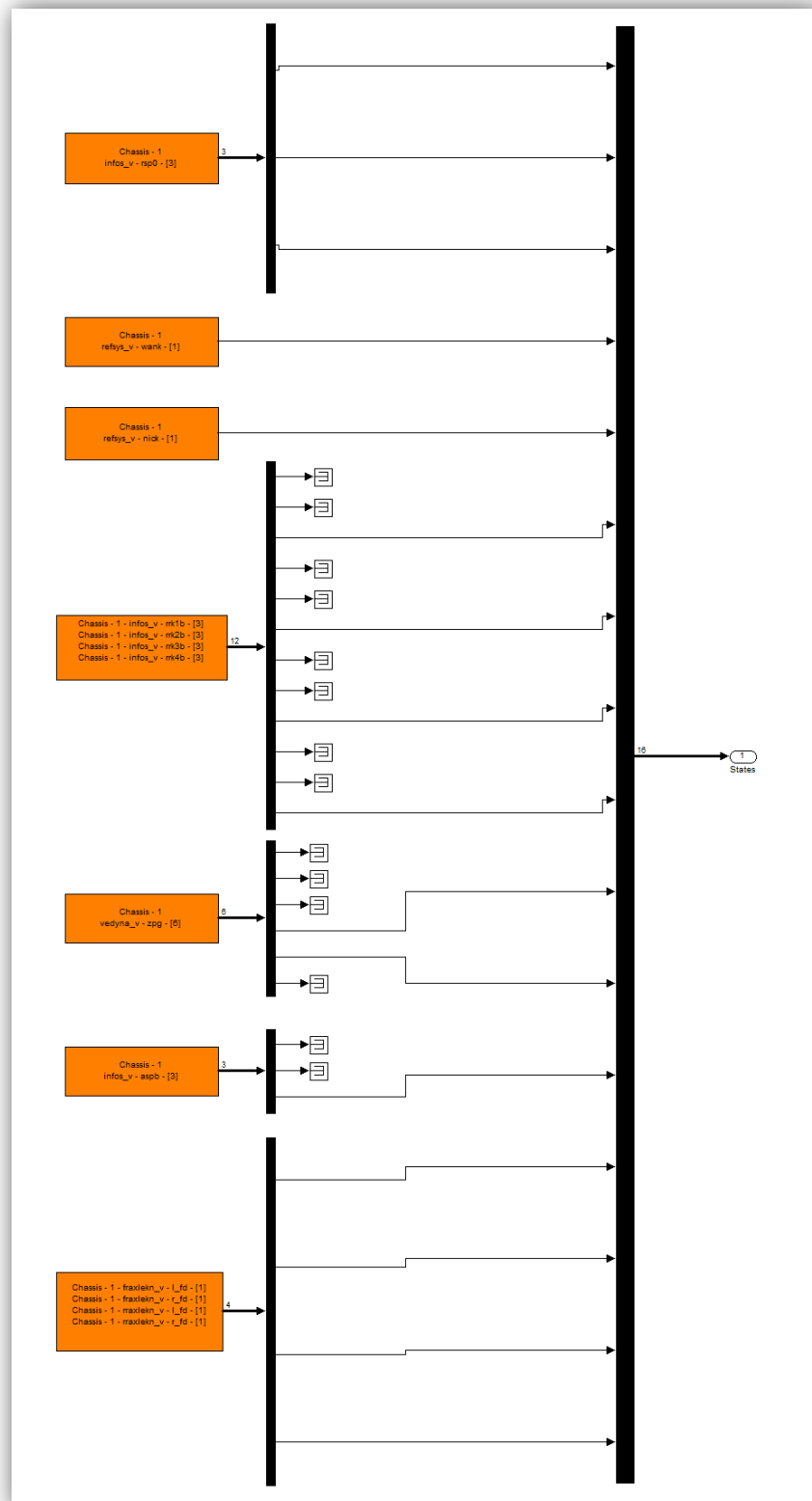
Οι τρέχουσες τιμές των μεταβλητών του *veDYNA* ανακτώνται από τις οντότητες *ReadFromWorkspace* του *Suspension States* και αποτελούν εισόδους για το *component* του χρήστη που βρίσκεται στο *Suspension*. Οι έξοδοι του *component* αυτού γράφονται σε μεταβλητές συγκεκριμένων δομών μεταβλητών του *veDYNA* χρησιμοποιώντας τα *WriteToWorkspace* μπλοκ, και μεταφέρονται έτσι στο μοντέλο του *veDYNA*.



Εικόνα 4.5 – Η δομή του *External Suspension*

4.5.1.1 Οι οντότητες *Suspension States* και *Suspension Control*

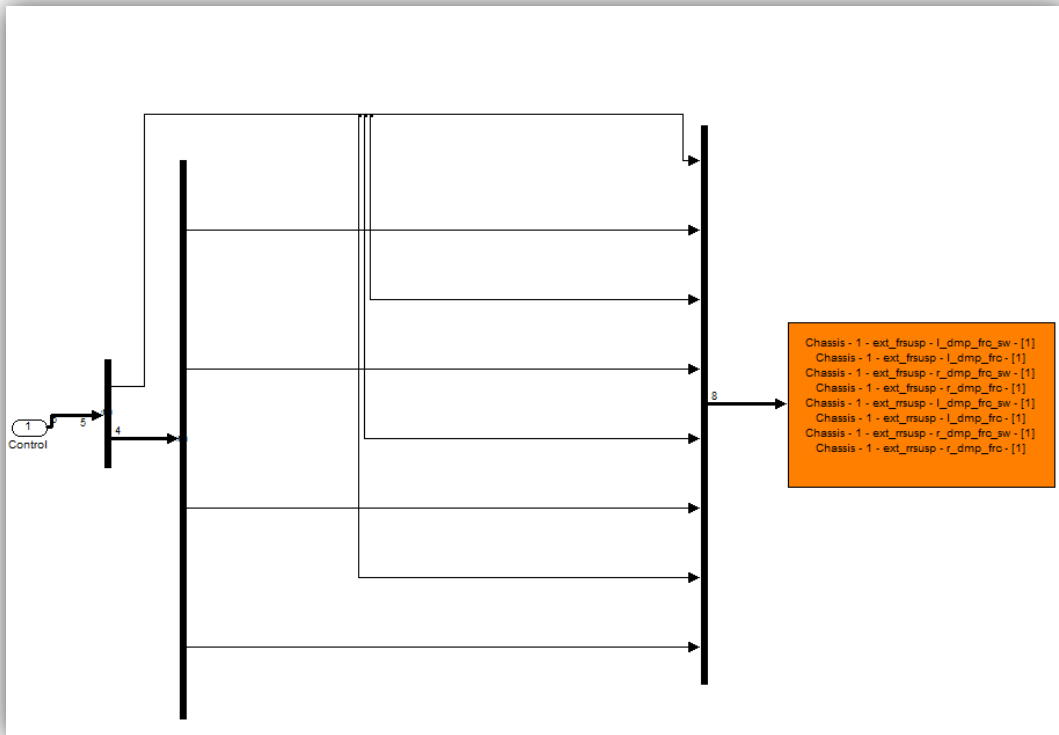
Η οντότητα *Suspension States* εκτελεί το ρόλο που θα είχαν ο αισθητήρες οι οποίοι θα ανίχνευαν τη μεταβολή των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν στο μετέπειτα προχωρημένο στάδιο της ενσωμάτωσης του αντίστοιχου συστήματος στο αυτοκίνητο. Στην **Εικόνα 4.6** συλλέγουμε όλη την πληροφορία που χρειαζόμαστε σε αυτή τη βαθμίδα, η οποία, όπως είδαμε και από την **Εικόνα 4.2**, δεν είναι άλλη από το διάγραμμα κατάστασης x στην (4.23). Επιπλέον, συλλέγουμε την πληροφορία που χρειαζόμαστε για κάποια μεγέθη των τριών κριτηρίων απόδοσης και για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.6 – Η οντότητα Suspension States

Στην **Εικόνα 4.7** απεικονίζεται η βαθμίδα *Suspension Control*. Στη βαθμίδα αυτή οι έξοδοι του *user-defined component* που βρίσκεται στην οντότητα *Suspension* γράφονται σε μεταβλητές των δομών μεταβλητών του *veDYNA*, οι οποίες είναι οι *ext_frsusp* και *ext_rrsusp*, και αφορούν τις μεταβλητές των στοιχείων των μπροστινών αναρτήσεων και πίσω αναρτήσεων αντίστοιχα. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι δυνάμεις των αποσβεστήρων ταλαντώσεων *l_dmp_fc*, *r_dmp_fc* (η έξοδος *u* του ελεγκτή της Εικόνα 4.2) που βρίσκονται στις δομές *ext_frsusp* και *ext_rrsusp*. Μέσω των *WriteToWorkspace* μπλοκ καθορίζουμε τις δομές και τις μεταβλητές αυτές, οι οποίες μεταβλητές μεταφέρονται κατ' αυτό τον τρόπο στο μοντέλο του *veDYNA*.

Εκτός από τις παραπάνω τέσσερις μεταβλητές έχουμε άλλα τέσσερα στοιχεία, τα οποία είναι οι διακόπτες *l_dmp_fc_sw*, *r_dmp_fc_sw* των δομών *ext_frsusp* και *ext_rrsusp*. Έχουμε δηλαδή τέσσερις διακόπτες για την καθεμία δύναμη του διανύσματος $u(t)$, όπου εάν η τιμή τους είναι ίση με 1, τότε οι έξοδοι *u* αντικαθιστούν τις δυνάμεις της εσωτερικής ανάρτησης του *veDYNA*, ισχύοντας έτσι μόνο οι έξοδοι των δυνάμεων που παράγει η *user-defined* οντότητα *Suspension*. Στην αντίθετη περίπτωση που η τιμή των διακοπών είναι 0, τότε προσθέτουν στην εσωτερική ανάρτηση τις δυνάμεις/εξόδους της *user-defined* οντότητας *Suspension*, ή αλλιώς, της εξωτερικής ανάρτησης. Στην περίπτωση που αντικαθιστάμε την εσωτερική ανάρτηση με την εξωτερική έχουμε το σύστημα της παθητικής ανάρτησης, ενώ στην περίπτωση στην οποία προσθέτουμε την εξωτερική στην εσωτερική έχουμε το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης. Στην περιπτώσή μας έχουμε το σύστημα ενεργητικής ανάρτησης, στην οποία, όπως είδαμε στο 3^ο κεφάλαιο, προστίθεται επιπλέον ελεγχόμενη δύναμη του αποσβεστήρα ταλαντώσεων μέσω ενός ενεργοποιητή. Αυτό σημαίνει ότι οι $l_dmp_fc_sw = 0$ & $r_dmp_fc_sw = 0$ των δομών *ext_frsusp* και *ext_rrsusp*, και ότι το ρόλο του ενεργοποιητή στο ενσωματωμένο στο αυτοκίνητο σύστημα ενεργητικής ανάρτησης αναλαμβάνουν αυτοί οι διακόπτες στο δικό μας μοντέλο προσομοίωσης, όταν είναι ίσοι με 0. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ έχουμε τέσσερις διαφορετικούς διακόπτες για την κάθε διάταξη απόσβεσης, εμείς τους ενοποιούμε ουσιαστικά σε έναν, αφού η πρώτη έξοδος του αριστερού *demux* στην εικόνα έχει πάρει την τιμή 0 ή 1, η οποία ανατίθεται και στα τέσσερα *switches*.

Εικόνα 4.7 – Η οντότητα *Suspension Control*

4.5.1.2 Η οντότητα *Suspension*

Στην

Εικόνα 4.8 έχουμε το εσωτερικό της βαθμίδας που παρεμβάλλεται μεταξύ των *Suspension States* και *Suspension Control*. Η βαθμίδα αυτή είναι η οντότητα *Suspension* και αποτελεί το *user-defined component* στο οποίο υλοποιείται σχεδιαστικά και ολοκληρώνεται ο αλγόριθμος ελέγχου *LQR* έπειτα από την εύρεση του βέλτιστου πίνακα \mathbf{K} . Αυτή η ολοκλήρωση του αλγορίθμου πραγματοποιείται εφαρμόζοντας τη σχέση $u(t) = -\mathbf{K}x(t)$. Η οντότητα *Suspension States* τροφοδοτεί με τα κατάλληλα σήματα αυτή την οντότητα για την εφαρμογή της σχέσης αυτής, τα οποία είναι οι μεταβλητές του διανύσματος κατάστασης x της (4.23). Επίσης, η *Suspension*

sion States τροφοδοτεί την *Suspension* με τα κατάλληλα σήματα που απαιτούνται για τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης που θα δούμε στην ενότητα 4.6.

Τα βασικά blocks σε αυτή την οντότητα είναι τα εξής:

- Τα blocks *Mux/Demux*. Ένα μπλοκ *Mux* ενώνει τα σήματα εισόδου του σε ένα διάνυσμα, ενώ ένα μπλοκ *Demux* χωρίζει το μοναδικό σήμα εισόδου του σε επί μέρους σήματα. Τα βασικά *Mux* στην Εικόνα 4.8 είναι δυο, και είναι αυτά με το κίτρινο χρώμα. Το ένα (αυτό που βρίσκεται στο κέντρο της εικόνας) σχηματίζει το διάνυσμα κατάστασης x το οποίο είναι η είσοδος του block *Gain* για τον πολλαπλασιασμό του με τον πίνακα K . Το άλλο *Mux* με το κίτρινο χρώμα συγκεντρώνει όλα τα απαραίτητα σήματα για τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία στέλνονται έπειτα σε ένα *.mat* αρχείο.
- Τα δυο blocks *Gain*. Είναι τα blocks με το γκρι χρώμα στην Εικόνα 4.8. Ένα block *Gain* πολλαπλασιάζει την είσοδο η οποία μπορεί να έχει τη μορφή βαθμωτού μεγέθους, διανύσματος ή πίνακα, με ένα σταθερό βαθμωτό μέγεθος/διάνυσμα/πίνακα που έχει ορίσει ο χρήστης. Στην περίπτωση μας, και στα δυο αυτά blocks η είσοδος έχει τη μορφή διανύσματος ενώ το κέρδος έχει τη μορφή πίνακα. Το ένα *Gain* εκτελεί τον πολλαπλασιασμό $u(t) = -Kx(t)$, το οποίο έχει τη ρύθμιση *Matrix(K*u)* (*u vector*), μέσω της οποίας η είσοδος θεωρείται ως διάνυσμα μεγέθους 14 (το μέγεθος είναι ίσο με τον αριθμό στηλών του πίνακα που καθορίζει ως κέρδος ο χρήστης), και η έξοδος θεωρείται ως διάνυσμα μεγέθους 4 (το μέγεθος είναι ίσο με τον αριθμό γραμμών του πίνακα που καθορίζει ως κέρδος ο χρήστης). Σε αυτό το *Gain* θέτουμε σαν κέρδος την παράμετρο `IMDL.EXTSUSP.Gain.v`, η οποία δηλώνεται στη διαδικασία χρήστη (*User Procedure*), στην οποία παράμετρο δίνεται η τιμή $K1 = -K$. Η έξοδος του *Gain* αυτού περνάει στη συνέχεια στο *Suspension Control*, στέλνοντας κατ' αυτό τον τρόπο τις δικές μας ελεγχόμενες δυνάμεις των αποσβεστήρων ταλαντώσεων στο μοντέλο οχήματος του *veDYNA*. Το άλλο *Gain* έχει και αυτό τη ρύθμιση *Matrix(K*u)* (*u vector*), και

εφαρμόζει τον πολλαπλασιασμό πίνακα-διανύσματος της σχέσης (4.16), στην οποία ορίζεται το διάνυσμα z_s . Σε αυτό το *Gain* δηλαδή θέτουμε σαν κέρδος την παράμετρο `lmdl.extsusp.g_transpose.v`, η οποία δηλώνεται στη διαδικασία χρήστη (*User Procedure*), στην οποία παράμετρο δίνεται η τιμή $G1 = G^T$, με το G^T να είναι ο ανάστροφος πίνακας που είδαμε στη σχέση (4.16). Περισσότερα στοιχεία για τη διαδικασία αυτή παρουσιάζονται στην υποενότητα **2.5.2.1** του 2ου κεφαλαίου.

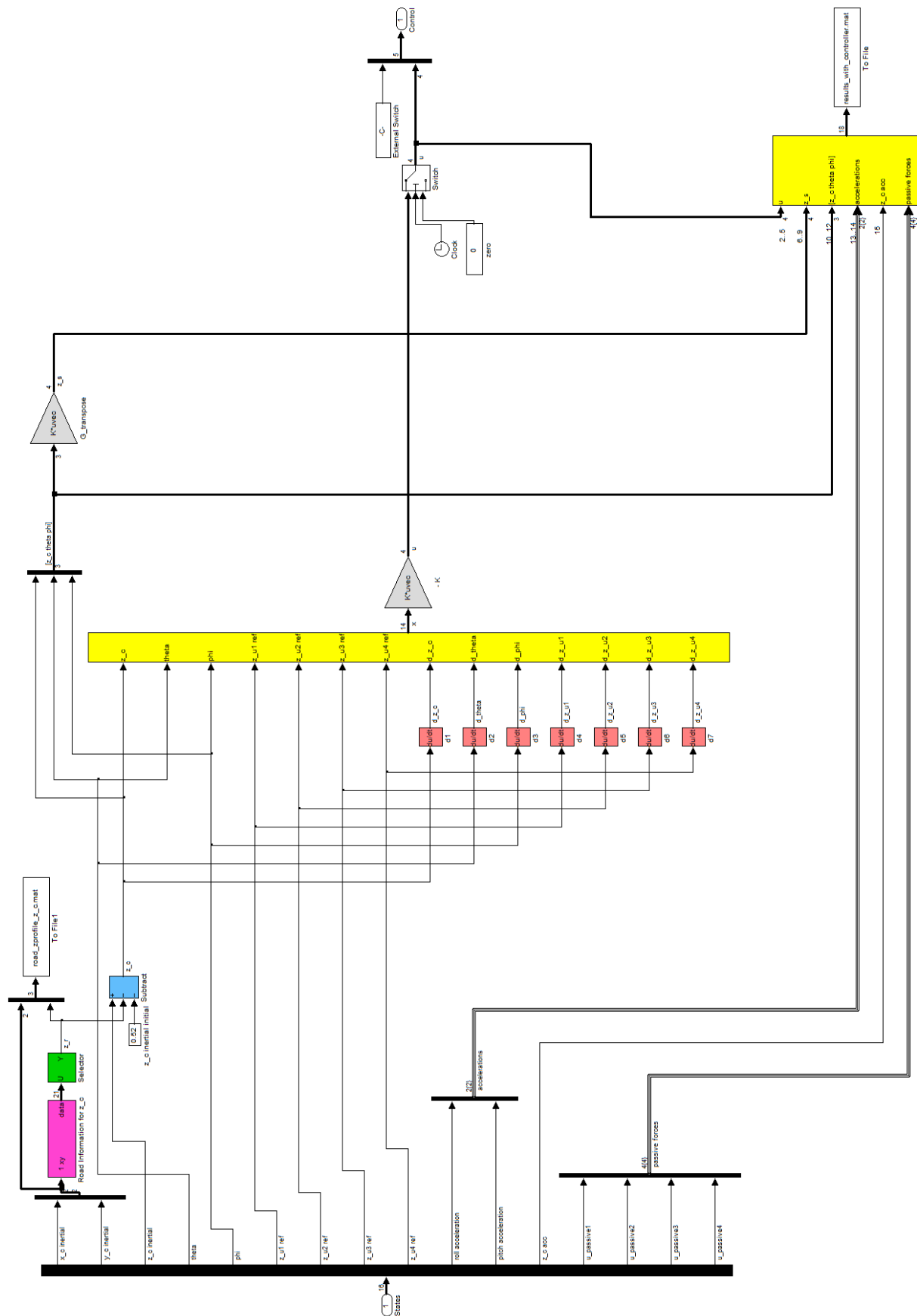
- Τα επτά blocks *Derivative*, τα οποία έχουν σαν έξοδο τη χρονική παράγωγο της εισόδου τους. Τα blocks αυτά υπολογίζουν τις επτά χρονικές παραγώγους του διανύσματος κατάστασης x στην (4.23).

Οι υπόλοιπες δυο λειτουργίες της οντότητας *Suspension* είναι οι εξής:

- Υπολογισμός του ύψους του δρόμου στα σημεία (x_c, y_c) , τα οποία είναι οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του αυτοκινήτου στο *inertial* σύστημα, μέσω της οντότητας *Road Information* του *veDYNA*. Στην κάθετη μετατόπιση του κέντρου βάρους του αυτοκινήτου z_c στο *inertial* σύστημα αφαιρείται αυτό το ύψος του δρόμου, και το αρχικό z_c του αυτοκινήτου για $t = 0$, το οποίο είναι το αρχικό ύψος του κέντρου βάρους του αυτοκινήτου στο *inertial* σύστημα. Το αποτέλεσμα αυτής της αφαίρεσης είναι το μέγεθος z_c του διανύσματος κατάστασης x , το οποίο είναι και η πρώτη είσοδος του *Mux* που συγκεντρώνει τα στοιχεία του διανύσματος κατάστασης (ο οποίος είναι σε κίτρινο χρώμα στο κέντρο της Εικόνα 4.8).
- Εφαρμογή συνθήκης μέσω της κατασκευής ενός διακόπτη. Η συνθήκη αυτή εφαρμόζεται μέσω του block *Switch* (η δεύτερη είσοδος του *Mux* του οποίου η έξοδος εισέρχεται στο *Suspension Control*), η οποία αναφέρει ότι για κάποια συγκεκριμένα κλάσματα του δευτερολέπτου μετά την έναρξη της προσομοίωσης, το διάνυσμα u που αποτελεί την έξοδο του *Suspension* τίθεται ίσο με μηδέν, και ο διακόπτης περνάει την τιμή μηδέν στις αντίστοιχες με-

ταβλητές του *Suspension Control*. Στην άλλη περίπτωση που έχουν περάσει αυτά τα κλάσματα του δευτερολέπτου, περνάει στις αντίστοιχες μεταβλητές του *Suspension Control* το διάνυσμα u . Ο λόγος που πραγματοποιείται αυτή η συνθήκη, είναι διότι κατά τη διάρκεια στην οποία θέτουμε το u ίσο με μηδέν, εάν δεν παρέμβουμε κατ' αυτό τον τρόπο οι τιμές του διανύσματος είναι αρκετά μεγάλες ξεφεύγοντας απ' τα αποδεκτά όρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρέπει να περάσει κάποιος ελάχιστος χρόνος προκειμένου ο έλεγχος να εφαρμοστεί.

Τέλος, σημειώνεται ότι η πρώτη είσοδος του *Mux* του οποίου η έξοδος εισέρχεται στο *Suspension Control* είναι ένα block *Constant* με την ονομασία *External Switch*, το οποίο παράγει έμμεσα τη σταθερή τιμή 0 ή 1, η οποία οδηγείται στην τιμή των *switch* στο *Suspension Control*. Στο block αυτό έχουμε αναθέσει τη σταθερά `1MDL.EXTSUSP.onoff.v` η οποία δηλώνεται στον κώδικα διαδικασίας χρήστη (*User Procedure*). Η σταθερά αυτή παίρνει την τιμή 0 ή 1 ανάλογα με την τιμή του *switch1* του κώδικα διαδικασίας. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που έχουμε 0 προσομοιώνουμε τη συμπεριφορά του οχήματος *veDYNA* το οποίο έχει ένα σύστημα ενεργητικής ανάρτησης, ενώ στην περίπτωση που έχουμε 1 προσομοιώνουμε τη συμπεριφορά του οχήματος *veDYNA* το οποίο έχει ένα σύστημα ημιενεργητικής ανάρτησης. Στην περίπτωση που έχουμε 0 προστίθεται στην παθητική ανάρτηση του *veDYNA* η ελεγχόμενη δύναμη των αποσβεστήρων ταλαντώσεων (όπου σε ένα ενσωματωμένο στο αυτοκίνητο σύστημα ανάρτησης την πρόσθεση αυτή θα την εξασφάλιζε ένας ενεργοποιητής). Στην περίπτωση που έχουμε 1, η εξωτερική ανάρτηση του χρήστη αντικαθιστά την εσωτερική ανάρτηση του *veDYNA*.



Εικόνα 4.8 – Η οντότητα Suspension με τη σχεδιαστική υλοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου

4.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή προβάλλονται τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης στο περιβάλλον του *veDYNA*, τόσο του αρχικού μοντέλου οχήματός του με την παθητική του ανάρτηση, όσο και του δικού μας μοντέλου με τη σχεδιαστική υλοποίηση του αλγορίθμου *LQR* που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 4.5.1.

Όλα τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων αυτών έχουν δυο κοινά. Το ένα κοινό σε όλα αυτά τα διαγράμματα είναι ο οριζόντιος άξονας, ο οποίος είναι ο άξονας του χρόνου προσομοίωσης σε *sec*. Το άλλο κοινό στα διαγράμματα αυτά είναι ότι σε κάθε ένα από αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα των δυο προσομοιώσεων του αρχικού και του δικού μας μοντέλου, για την ευκολότερη σύγκρισή τους. Η **μπλε γραμμή** αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς του *αρχικού* μοντέλου οχήματος του *veDYNA*, ενώ η **κόκκινη γραμμή** αφορά την προσομοίωση του δικού μας *τροποποιημένου* μοντέλου οχήματος του *veDYNA*, στο οποίο ελέγχονται οι δυνάμεις των αποσβεστήρων ταλαντώσεων του συστήματος ενεργητικής ανάρτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μια πολύ μικρή χρονική μετατόπιση, γύρω στα 0,03 *sec*, μεταξύ των γραμμών αυτών στο κάθε διάγραμμα.

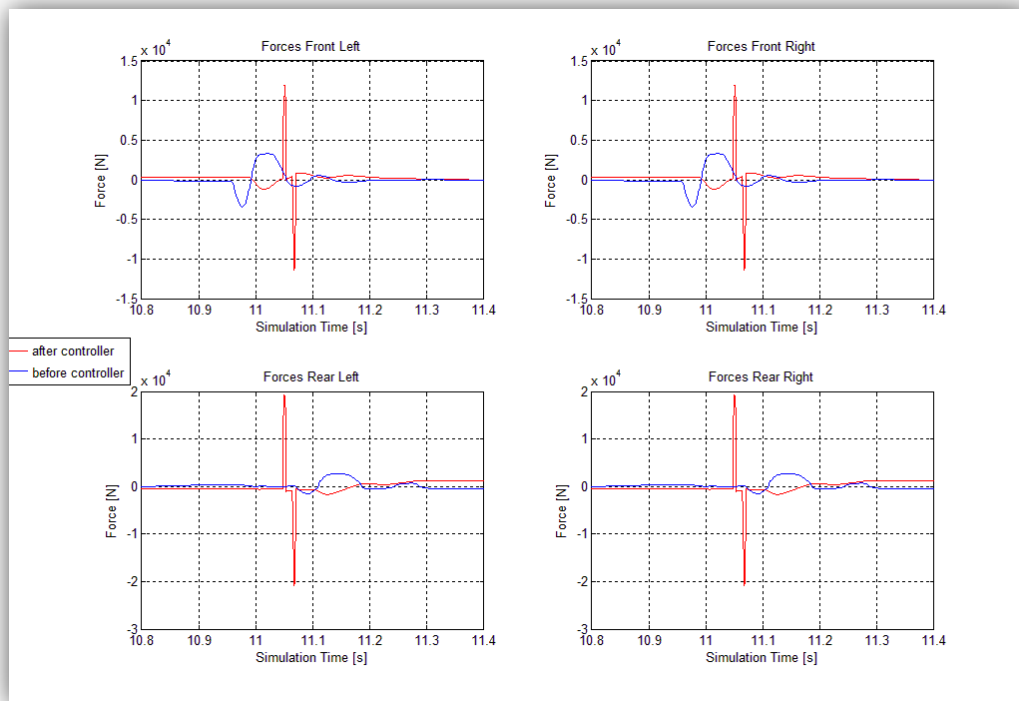
Οι προσομοιώσεις που γίνονται είναι δυο ειδών και αφορούν τη συμπεριφορά του οχήματος σε δυο διαφορετικούς δρόμους. Στον ένα δρόμο έχουμε μια ευθεία στην οποία έχει τοποθετηθεί ένα σαμαράκι, όπως είδαμε στις αντίστοιχες ρυθμίσεις του *veDYNA* που περιγράφηκαν στην υποενότητα 2.5.2.2 και οι οποίες προβλήθηκαν στην **Εικόνα 2.11**. Στον άλλο δρόμο έχουμε μια προκαθορισμένη πίστα, όπως είδαμε στις αντίστοιχες ρυθμίσεις του *veDYNA* που περιγράφηκαν στην υποενότητα 2.5.2.1 και οι οποίες προβλήθηκαν στην **Εικόνα 2.10**.

Η *βασική προσομοίωση* της οποίας τα αποτελέσματα μελετάμε είναι αυτή με το *σαμαράκι*, διότι στην προσομοίωση αυτή φαίνονται καλύτερα οι συγκρίσεις που γίνονται, απ' τη στιγμή που ο χρόνος προσομοίωσης στην ευθεία με το σαμαράκι είναι πολύ λιγότερος απ' το χρόνο προσομοίωσης στην πίστα. Εξάλλου, η γωνία *roll* του οχήματος είναι σχεδόν μηδενική στην περίπτωση του σαμαριού (αφού η γωνία αυτή παίρνει μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση που το όχημα αλλάζει διεύθυνση),

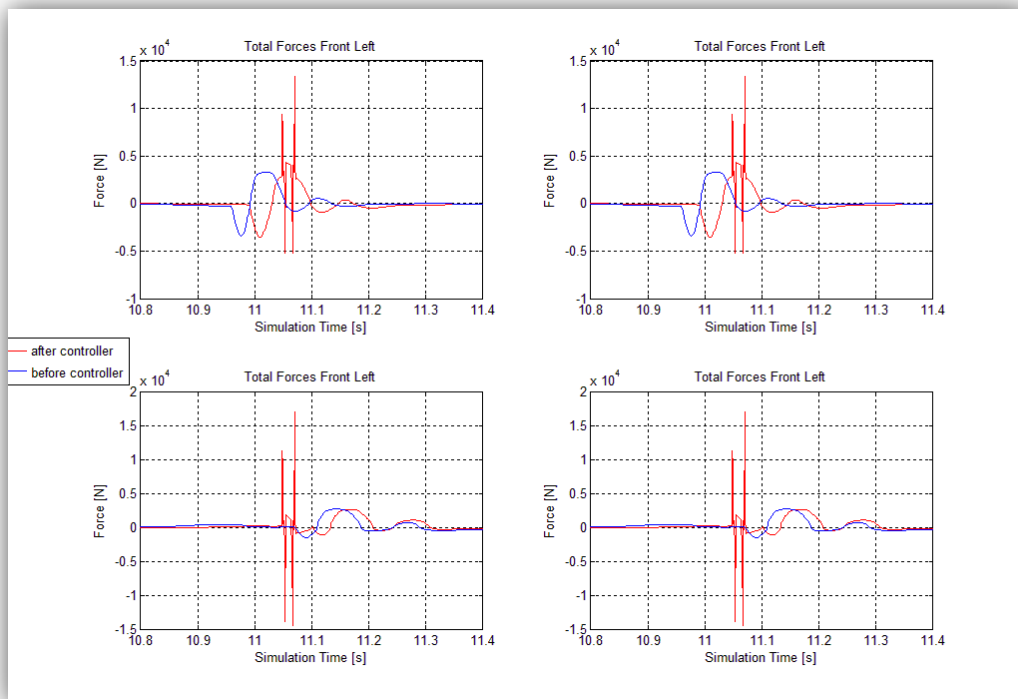
και γι' αυτό το λόγο εμφανίζουμε τα αποτελέσματα της γωνίας *roll* και της επιτάχυνσής της στις εικόνες **Εικόνα 4.16** και **Εικόνα 4.17** αντίστοιχα, στις οποίες βλέπουμε τα αποτελέσματα της γωνίας αυτής στην προσομοίωση με την πίστα.

Τα μεγέθη τα οποία προβάλλουμε στα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας είναι αυτά των τριών κριτηρίων απόδοσης που είδαμε στην ενότητα **4.5**, τα οποία μεγέθη είναι τα εξής:

- τα τέσσερα u στους τέσσερις τροχούς στην **Εικόνα 4.9** (οι ελεγχόμενες *επιπρόσθετες* δυνάμεις που ασκούν οι διατάξεις απόσβεσης στο αμάξωμα. Με τον όρο “επιπρόσθετες” εννοούμε ότι οι δυνάμεις αυτές προστίθενται στις δυνάμεις της αρχικής/παθητικής ανάρτησης του *veDYNA*),
- οι *συνολικές* ασκούμενες δυνάμεις των *dampers* στην **Εικόνα 4.10** (οι οποίες είναι το άθροισμα των u δυνάμεων και των δυνάμεων της παθητικής απόσβεσης),
- το z_c στην **Εικόνα 4.11** (η κάθετη μετατόπιση του κέντρου βάρους του οχήματος),
- οι γωνίες θ (γωνία *roll*) και φ (γωνία *pitch*) του οχήματος στην **Εικόνα 4.12**,
- το z_s στην **Εικόνα 4.13** (το διάνυσμα της σχέσης (4.16)), και
- το \ddot{z}_c στην **Εικόνα 4.14**, και τα $\ddot{\theta}$, $\ddot{\varphi}$ στην **Εικόνα 4.15** (οι επιταχύνσεις των αντίστοιχων μεγεθών)

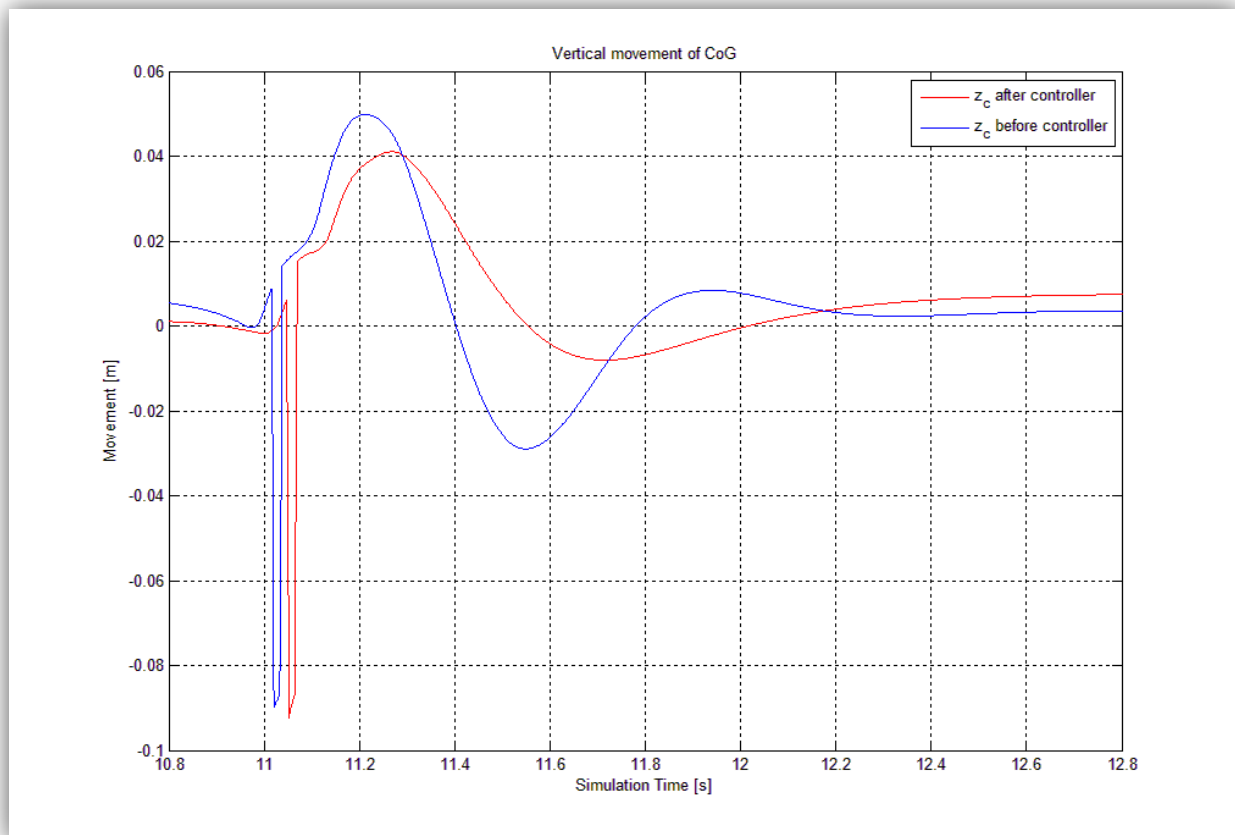


Εικόνα 4.9 – Ο έλεγχος u των δυνάμεων των τεσσάρων διατάξεων απόσβεσης



Εικόνα 4.10 – Η συνολική ασκούμενη δύναμη των διατάξεων απόσβεσης

Στην **Εικόνα 4.9** παρατηρείται ότι τα u (λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη χρονική μετατόπιση της μια γραμμής σε σχέση με την άλλη που αναφέρθηκε προηγουμένως), αντιτίθενται της φοράς του μέγιστου και του ελάχιστου των αντίστοιχων δυνάμεων της παθητικής απόσβεσης. Έτσι, επεκτείνεται το εύρος των δυνάμεων αυτών στην περίπτωση της ενεργητικής ανάρτησής μας, όπως αναλύθηκε στην **Εικόνα 3.7** του 3^{ου} κεφαλαίου των αναρτήσεων. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της εικόνας αυτής, εκμεταλλευόμαστε αυτή την “ευελιξία” στο εύρος δυνάμεων απόσβεσης της ενεργητικής ανάρτησης, με τις δυνάμεις αυτές να ανήκουν στο 2^ο και 4^ο τεταρτημόριο, οι οποίες αντιτίθενται στη φορά των δυνάμεων της παθητικής απόσβεσης.



Εικόνα 4.11 – Η κάθετη μετατόπιση z_c του κέντρου βάρους του αυτοκινήτου

Το διάγραμμα στην **Εικόνα 4.11** ήταν ο “οδηγός” για εμάς κατά τη διάρκεια της επιλογής των κατάλληλων βαρών των πινάκων $Q1$, $Q2$, $R1$ των κριτηρίων απόδοσης όταν η επιλογή αυτή γινόταν βάσει της μεθόδου δοκιμής-σφάλματος.

Από τη χρονική στιγμή των 11,07 sec. και έπειτα, και τα δυο οχήματα έχουν περάσει το σμαράκι, με αποτέλεσμα αυτή η διαταραχή του δρόμου να αρχίζει να διαταράσσει την κατάσταση ηρεμίας του οχήματος.

Σε αυτό το χρονικό διάστημα παρατηρούμε ότι:

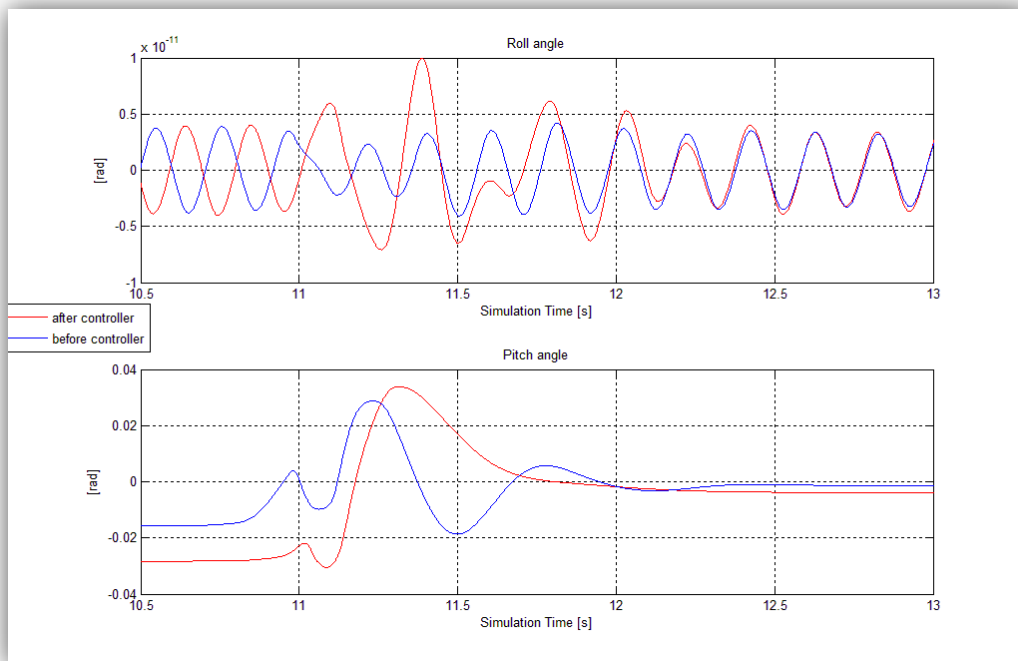
- τα μέγιστα των δυο γραμμών διαφέρουν περίπου κατά 1 cm, ενώ τα ελάχιστα στο ίδιο αυτό χρονικό διάστημα διαφέρουν σημαντικά κατά 2 cm, με τη δική μας ανάρτηση να είναι φυσικά επικρατέστερη, από τη στιγμή που αυτή διατηρεί το μέγεθος z_c πιο “κοντά” στο μηδέν.

- το τοπικό μέγιστο της παθητικής απόσβεσης στο χρονικό διάστημα 11,8 - 12 sec. έχει εξαλειφτεί τελείως στην περίπτωση της δικής μας ανάρτησης, αφού η δική μας ανάρτηση με την ενεργητική απόσβεση παρουσιάζει μόνο ένα (τοπικό) μέγιστο.

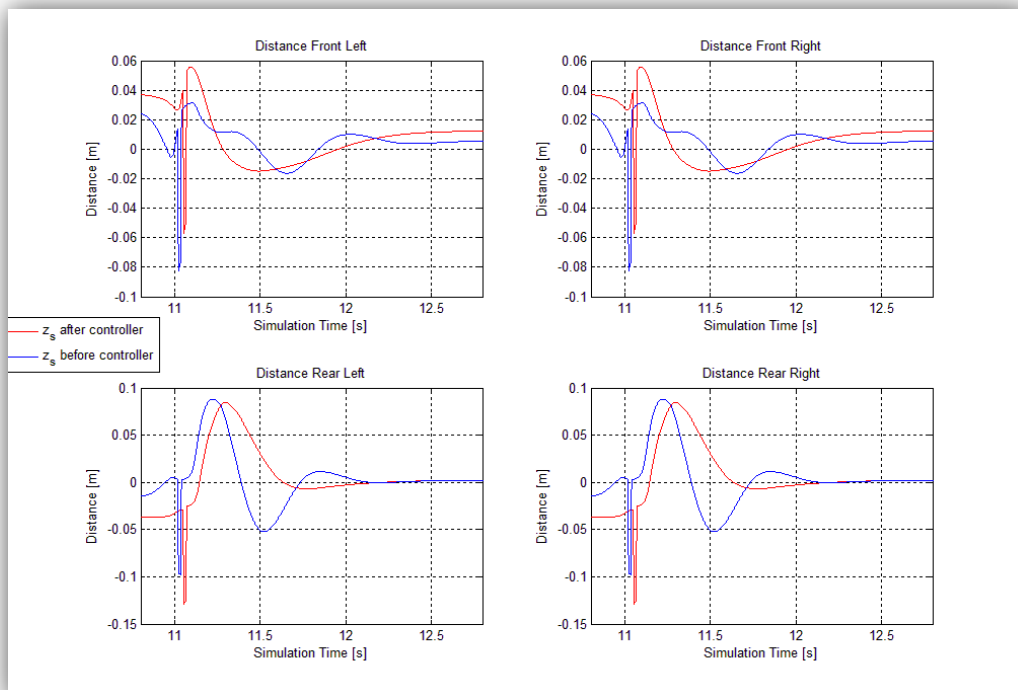
Παρατηρούμε λοιπόν ότι η δική μας ανάρτηση μεταβάλλει με μεγαλύτερη ομαλότητα την κάθετη μετατόπιση του κέντρου μάζας του οχήματος, εξασφαλίζοντας έτσι τη μεγαλύτερη *ευστάθειά* του.

Αυτή η ομαλότητα ισχύει και για τα άλλα μεγέθη του κριτηρίου *ευστάθειας*, που είναι οι γωνίες *pitch* και *roll*, και κατ' επέκταση ισχύει και για το z_s , όπως φαίνεται από τα παρακάτω γραφικά αποτελέσματα. Έτσι, αυτή η *ευστάθεια* δεν αφορά μόνο το κέντρο μάζας του οχήματος, αλλά επεκτείνεται και στις γωνίες περιστροφής του κέντρου μάζας σε σχέση με τους *lateral* και *longitudinal* άξονες αντίστοιχα. Έχουμε ορίσει ένα διάνυσμα z_s το οποίο μεταβιβάζει τη μεταβολή των z_c , θ , φ στους τέσσερις τροχούς, εκφράζοντας το διάνυσμα αυτό, όπως έχουμε αναφέρει, την κάθετη μετατόπιση του πλαισίου στην κάθε θέση του τροχού.

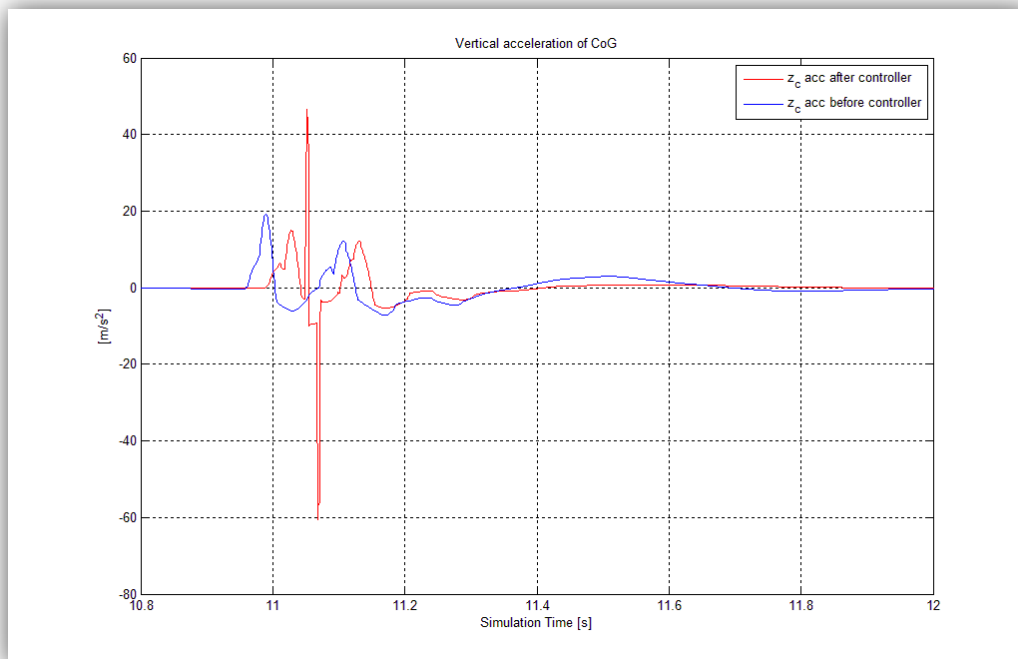
Υπενθυμίζεται ότι η γωνία *roll*, λόγω του ότι το όχημα οδηγείται σε ευθεία είναι πολύ κοντά στο μηδέν, το προσομοιώνουμε καθώς οδηγείται και σε πίστα, με τα αποτελέσματα της γωνίας αυτής στην πίστα να προβάλλονται στις δυο τελευταίες εικόνες.



Εικόνα 4.12 – Οι γωνίες θ / roll (πάνω) και φ / pitch (κάτω) του αυτοκινήτου

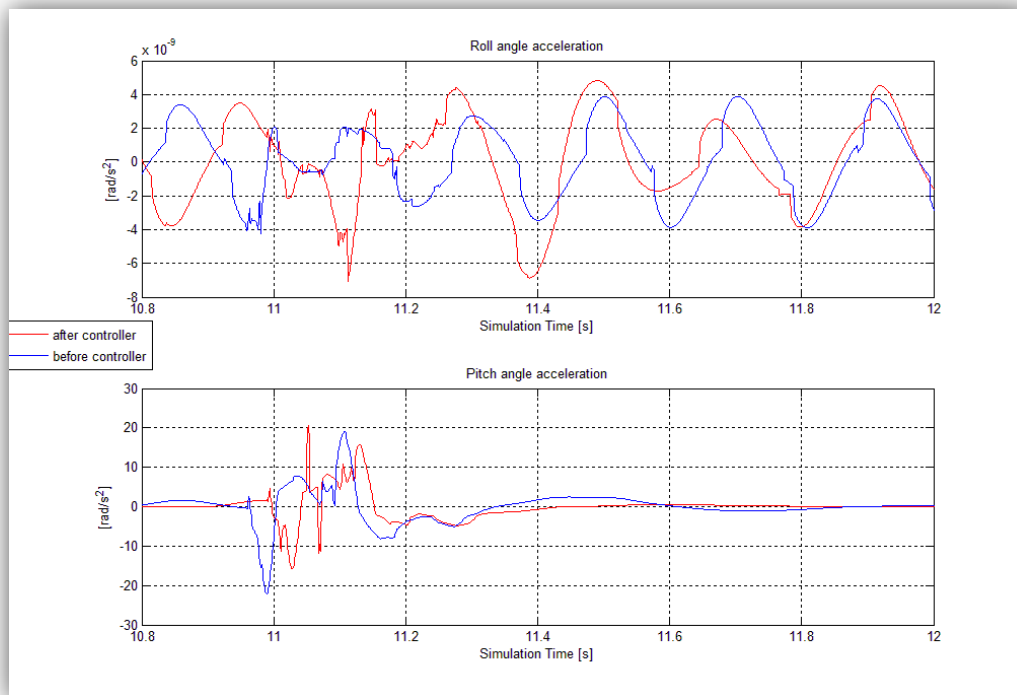


Εικόνα 4.13 – Το διάνυσμα z_s



Εικόνα 4.14 – Η επιτάχυνση της κάθετης μετατόπισης του κέντρου βάρους του αυτοκινήτου (\ddot{z}_c)

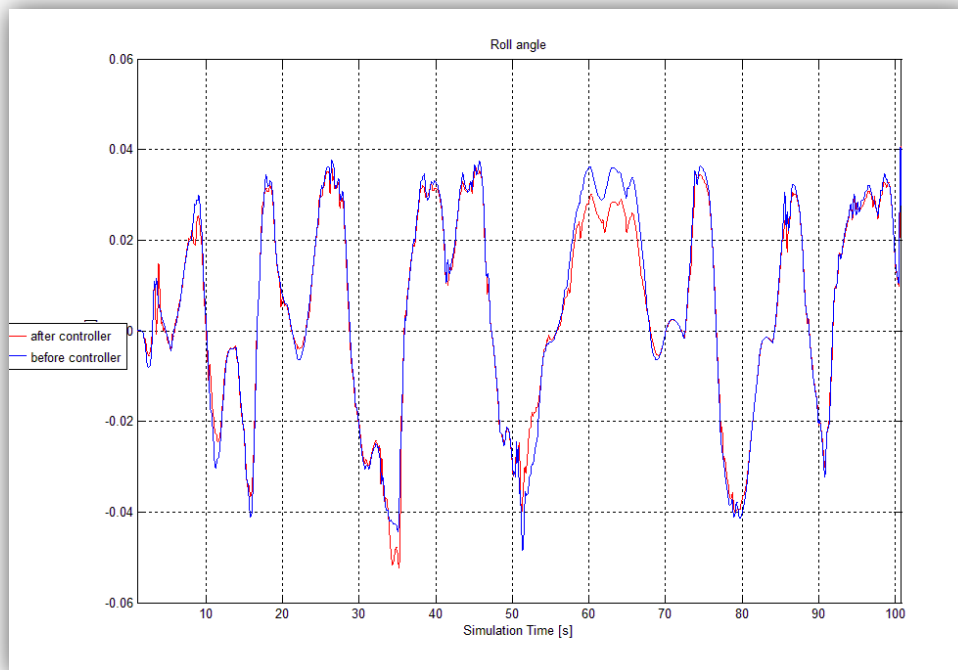
Το αποτέλεσμα του μεγέθους \ddot{z}_c της παραπάνω εικόνας ίσως δεν είναι τόσο καλό για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σημειώνεται όμως ότι η διάρκεια των επιταχύνσεων που ξεφεύγουν σε σχέση με την παθητική απόσβεση είναι μόνο περίπου 0,02 sec. Εξάλλου, τα τρία κριτήρια απόδοσης χαρακτηρίζονται από πίνακες που εισχωρούν στον αλγόριθμο *LQR*, οι οποίοι πίνακες έχουν βάρη που το άθροισμα των βαρών τους είναι ίσο με 1. Επομένως, εάν αυξήσουμε το βάρος σε ένα κριτήριο, αναγκαστικά θα μειωθεί το βάρος στα άλλα κριτήρια.



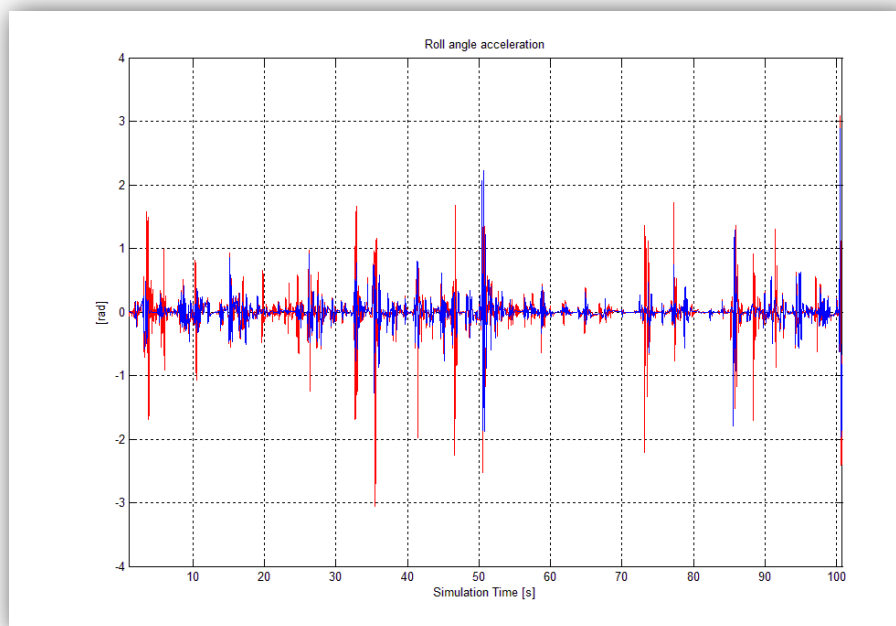
Εικόνα 4.15 – Οι επιταχύνσεις των γωνιών *roll* (πάνω) και *pitch* (κάτω) του αυτοκινήτου

Σε αντίθεση με το \ddot{z}_c , έχουμε καλύτερο αποτέλεσμα στην επιτάχυνση της γωνίας *pitch* της δικής μας ανάρτησης, αφού στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης η επιτάχυνση του μεγέθους αυτού στη δική μας ανάρτηση είναι μικρότερη, και μάλιστα σε διαφορά που φτάνει έως και τα 7 rad/s^2 , που ισοδυναμεί σε περίπου 400 deg/s^2 , έχοντας έτσι σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη άνεση των επιβατών.

Οι παρακάτω τελευταίες δυο εικόνες δείχνουν τις γωνίες *roll* του οχήματος στην πίστα, πριν και μετά τον ελεγκτή, όπως επίσης και τις επιταχύνσεις των γωνιών αυτών, που στην ουσία διαφέρουν ελάχιστα, όμως το σίγουρο είναι ότι έχουμε μεγαλύτερη ευστάθεια και ίσως μεγαλύτερη άνεση (άνεση λόγω της μικρότερης επιτάχυνσης της γωνίας *pitch*) χωρίς να επιβαρύνεται η γωνία *roll* (και η επιτάχυνσή της) της δικής μας ανάρτησης.



Εικόνα 4.16 – Η γωνία θ / roll του αυτοκινήτου σαν αποτέλεσμα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του σε προκαθορισμένη πίστα



Εικόνα 4.17 – Η επιτάχυνση της γωνίας θ / roll του αυτοκινήτου σαν αποτέλεσμα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του σε προκαθορισμένη πίστα

Κεφάλαιο 5 – Σύνοψη, συμπεράσματα, προοπτικές τροποποίησης και εξέλιξης

5.1 Συμπεράσματα

Έπειτα από την τελευταία ενότητα του προηγούμενου κεφαλαίου με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είμαστε σε θέση να εξάγουμε τα συμπεράσματα που απορρέουν απ’ τα αποτελέσματα αυτά σε μεγαλύτερο βαθμό ανάλυσης σε σχέση με την ενότητα 4.6.

Όπως είδαμε, τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας είναι καλύτερα σε σχέση με την αρχική/παθητική ανάρτηση του *veDYNA*. Οι τροποποιήσεις που κάναμε στο αρχικό μοντέλο οχήματος μετέτρεψαν την ανάρτηση αυτή από μη ελεγχόμενη σε ελεγχόμενη, οπότε θα μπορούσαμε να πούμε ότι θεωρούνταν εκ των προτέρων δεδομένο το γεγονός ότι η απόδοση αυτής της τροποποιημένης ανάρτησης θα βελτιωνόταν κατά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης του ελεγκτή.

Οι αρχικές μας προσδοκίες σχετικά με τη βελτίωση της απόδοσης της ανάρτησης και κατ’ επέκταση της συμπεριφοράς του αυτοκινήτου φυσικά επαληθεύτηκαν, βάσει των γραφικών αποτελεσμάτων που είδαμε. Είδαμε ότι η δική μας ανάρτηση μεταβάλλει με αρκετά μεγαλύτερη *ομαλότητα* την κάθετη μετατόπιση του κέντρου μάζας του οχήματος, ενός μεγέθους με σημαντικό συντελεστή βαρύτητας στην ευστάθεια του αυτοκινήτου, αφού μιλάμε για το κέντρο μάζας του. Αυτή η ομαλότητα στη μεταβολή αυτού του μεγέθους εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη *ευστάθειά* του, κοινώς τα “κρατήματά” του κατά τη διάρκεια των διαταραχών που ασκούνται στο όχημα από το έδαφος. Αυτή του η ευστάθεια διατηρεί πολύ περισσότερο τη θέση του αμαξώματος σε παράλληλη ως προς το δρόμο θέση σε σχέση με την παθητική ανάρτηση του αρχικού μοντέλου οχήματος του *veDYNA*.

Η ομαλότητα αυτή ισχύει όπως είδαμε και για τα άλλα μεγέθη του κριτηρίου ευστάθειας, τα οποία είναι οι γωνίες *pitch* και *roll*, όπου αυτά τα μεγέθη διαμορφώνουν στη συνέχεια το z_s . Έχουμε ορίσει το διάνυσμα z_s το οποίο μεταβιβάζει τη μεταβολή των z_c , θ , φ στους τέσσερις τροχούς, εκφράζοντας το διάνυσμα αυτό, όπως έχουμε αναφέρει, την κάθετη μετατόπιση του πλαισίου στην κάθε θέση του τροχού. Η ενεργητική μας ανάρτηση προσδίδει λοιπόν μεγαλύτερη ευστάθεια τόσο στην κάθετη μετατόπιση του κέντρου μάζας του οχήματος, όσο και στις κάθετες μετατοπίσεις του αμαξώματος στα τέσσερα σημεία πάνω απ' τους τροχούς.

Όλα τα παραπάνω σημαίνουν ότι ικανοποιείται σε μεγάλο βαθμό το πρώτο κριτήριο βελτιστοποίησης του αλγορίθμου ελέγχου, ή αλλιώς το πρώτο κριτήριο απόδοσης των αναρτήσεων, το οποίο είναι το κριτήριο ευστάθειας.

Είδαμε επίσης ότι βελτιώνουμε την ανάρτηση με βάση δεύτερο κριτήριο απόδοσης, το οποίο είναι το κριτήριο *άνεσης*, στο οποίο συγκεντρώνονται οι επιταχύνσεις των μεγεθών z_c , θ , φ . Σε αυτά τα γραφικά αποτελέσματα η επιτάχυνση της γωνίας *pitch* είναι μικρότερη, δεν επιβαρύνεται η γωνία *roll* η οποία στην ουσία είναι η ίδια, εμφανίζοντας μια μικρή απόκλιση σε σχέση με τις επιθυμητές τιμές η επιτάχυνση του z_c , αλλά μόνο για 0,02 sec. του χρόνου προσομοίωσης. Μαζί με την ευστάθεια λοιπόν ενισχύεται σε κάποιο βαθμό και η άνεση των επιβατών.

Είδαμε ότι το κυριότερο μειονέκτημα των παθητικών αναρτήσεων είναι ότι η μόνη ελευθερία στη μοντελοποίηση και το σχεδιασμό αυτών των συμβατικών αναρτήσεων υπάρχει στην επιλογή των δυο παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των συστημάτων αυτών, οι οποίες είναι η ακαμψία του ελατηρίου και ο βαθμός απόσβεσης του αποσβεστήρα. Αφενός αυτή η κατασκευή μπορεί να γίνει απλή, αλλά αφετέρου αυτή η ανάρτηση του οχήματος δεν θα αποδώσει με το βέλτιστο τρόπο σαν απόκριση στις εισόδους του παθητικού συστήματος. Σε ένα ιδανικό σύστημα ανάρτησης, η ανάρτηση θα πρέπει να είναι μαλακή για την οδηγική άνεση, ενώ θα πρέπει παράλληλα να είναι σκληρή για την ευστάθεια του οχήματος. Στο παθητικό σύστημα ανάρτησης δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, και γενικότερα η παθητική ανάρτηση δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις κάποιων περιπτώσεων οδήγησης.

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι οι ενεργητικές αναρτήσεις διορθώνουν με σιγουριά όλα τα μειονεκτήματα της απόδοσης των παθητικών αναρτήσεων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, κάτι που όπως είδαμε το πετύχαμε και εμείς στην εργασία αυτή.

Ακόμα, οι ενεργητικές αναρτήσεις μπορούν σε κάποιες περιπτώσεις να βελτιώσουν την απόδοση των ημιενεργητικών αναρτήσεων, κάτι το οποίο συνέβη και στην περίπτωση μας, αφού (με δεδομένη τη συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή) τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην περίπτωση της ημιενεργητικής ανάρτησης δεν ήταν τόσο επιθυμητά. Θεωρητικά, η ενεργητικές αναρτήσεις είναι ο ιδανικός τρόπος βελτιστοποίησης της οδικής συμπεριφοράς οποιουδήποτε οχήματος.

Πρέπει όμως, στο σημείο αυτό, να πάμε και στην άλλη όψη του νομίσματος. Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μόνο σε έναν ιδανικό κόσμο δε θα μπορούσαν να έχουν κάποιο τίμημα. Αυτή η βέλτιστη απόδοση των ενεργητικών αναρτήσεων είναι επόμενο να έχει ένα σημαντικό κόστος. Μειονεκτήματα των ενεργητικών αναρτήσεων αποτελούν η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, και επομένως το μεγάλο κόστος του. Από τη στιγμή που απαιτείται η τοποθέτηση μιας ισχυρής και ακριβής μονάδας παροχής ισχύος, το σύστημα αυτό αποτελεί μια πολύπλοκη και ακριβή λύση, η οποία πρακτικά είναι αδύνατον να εφαρμοστεί παρά σε κάποια ειδικά οχήματα παραγωγής ή αγωνιστικές κατασκευές. Μέχρι στιγμής ενεργητικές αναρτήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί σε σπορ αυτοκίνητα και σε ακριβά μοντέλα αυτοκινήτων. Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτούν και καταναλώνουν τα συστήματα αυτά είναι αρκετά μεγάλη.

Όμως, δεν αποτελούσε στόχο μας να σχεδιάσουμε ένα ελεγχόμενο σύστημα ανάρτησης στα αρχικά στάδια του *Model-Based Design* το οποίο, με την ολοκλήρωση του διαδικασίας του *Model-Based Design*, να είναι εύκολο πρακτικά να εισέλθει στον πραγματικό κόσμο του αυτοκινήτου. Στόχος μας ήταν να αναπτύξουμε μια εφαρμογή από την οποία αποδεικνύεται για άλλη μια φορά ότι η εγκατάσταση ενός ελεγκτή σε ένα βιομηχανικό σύστημα, σε εφαρμογές διαφόρων επιστημών κλάδων, σε ένα προϊόν τεχνολογίας κ.λπ. μπορεί να βελτιώσει αρκετά την απόδοση του συστήματος με το οποίο συνδέεται ο ελεγκτής, όπως επίσης και να συμβάλει στην ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος αυτού για τον άνθρωπο, το περιβάλλον, κ.λπ.,

αν σκεφτούμε την πληθώρα συστημάτων που θα μπορούσε να εγκατασταθεί ο ελεγκτής που χρησιμοποιήσαμε.

Εξάλλου, η εφαρμογή της εργασίας αυτής σε ένα επαγγελματικό περιβάλλον λογισμικού όπως το *veDYNA*, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιείται όχι μόνο από αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες ανά τον κόσμο, αλλά και από τμήματα ανάπτυξης των κατασκευαστών πρωτότυπου εξοπλισμού (*Original Equipment Manufacturers – OEM*) αυτοκινήτων, ανοίγει αρκετούς δρόμους για περαιτέρω επέκταση των δυνατοτήτων της εργασίας αυτής πάνω στο περιβάλλον αυτό, όπως επίσης και για παρόμοιες εφαρμογές σε αυτό το περιβάλλον. Οι προοπτικές εξέλιξης της εργασίας αυτής παρουσιάζονται στην ενότητα **5.2**.

5.2 Προοπτικές τροποποίησης και εξέλιξης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι προοπτικές τροποποίησης και εξέλιξης της εργασίας αυτής.

Αρχικά, όσον αφορά το μηχανικό που επιθυμεί να κατασκευάσει μία/πολλές στρατηγική/ές ελέγχου που αφορούν ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα ανάρτησης, είναι προφανές ότι ο μηχανικός αυτός μπορεί να εξετάσει και να συγκρίνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του τροποποιημένου -από τον ίδιο- μοντέλου *veDYNA_ext_susp*. Αυτές οι προσομοιώσεις μπορούν να αφορούν μία/πολλές στρατηγική/ές ελέγχου σε αυτή την αρχική φάση του *Model-Based Design*, δηλαδή στη φάση της *Model-in-the Loop* προσομοίωσης που εκτελέσαμε εμείς, έτσι ώστε να μπορέσει να καταλήξει στο ποια τεχνική ελέγχου τον ικανοποιεί περισσότερο. Αυτές οι προσομοιώσεις μπορούν να αφορούν επίσης τη συμπεριφορά του αυτοκινήτου (με το μοντέλο ανάρτησης που έχει σχεδιάσει και με την τεχνική ελέγχου υπό την οποία προσομοιώνεται) σε οποιοδήποτε δρόμο επιθυμεί ο χρήστης. Απ' τη στιγμή που έχει κατασκευάσει τους αλγορίθμους ελέγχου που τον ενδιαφέρουν, μπορεί εύκολα και γρήγορα να κρίνει, με τα αξιόπιστα αποτελέσματα αυτού του επαγγελματικού περιβάλλοντος το οποίο ειδικεύεται στη δυναμική των οχημάτων, εάν μπορεί να προχω-

ρήσει στα επόμενα στάδια του *Model-Based Design* με βάση το μοντέλο που έχει κατασκευάσει, ή απλά να εξάγει συμπεράσματα για τη στρατηγική/ές ελέγχου που χρησιμοποίησε, όπως έγινε στην περίπτωση μας.

Με την εγκατάσταση του *veDYNA* παρέχονται στο χρήστη (με το δικό μας *license* της *light* έκδοσης) όχι μόνο το μοντέλο που αφορά την εξωτερική ανάρτηση, αλλά και άλλα επτά μοντέλα έτοιμα να τροποποιηθούν από αυτόν σύμφωνα με τις ανάγκες του, συνοδευόμενο το κάθε ένα από τη δική του *User Procedure*. Οι προοπτικές εξέλιξης της εργασίας αυτής σε τέσσερα από τα επτά αυτά μοντέλα παρουσιάζονται στις παρακάτω υποενότητες, περιγράφοντας και προτείνοντας συνοπτικά τι μπορεί να κάνει ο χρήστης στα μοντέλα αυτά.

5.2.1 *veDYNA_ext_aero*

Το μοντέλο *veDYNA_ext_aero* περιλαμβάνει την οντότητα *External Aerodynamics* η οποία περιέχει το σύστημα της αεροδυναμικής του οχήματος. Δυο αεροδυναμικές πτέρυγες υπάρχουν στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του οχήματος. Το σύστημα αυτό έχει σαν εισόδους την ταχύτητα του οχήματος και την κάθετη απόσταση της μπροστινής και της πίσω πτέρυγας από το δρόμο, όπου οι αποστάσεις αυτές υπολογίζονται μέσω των αισθητήρων της αντίστοιχης βιβλιοθήκης του *veDYNA*. Έξοδοι του υποσυστήματος αυτού είναι οι δυνάμεις *drag forces* και *lift forces*, οι οποίες μπορούν να ελέγχονται μέσω της στρατηγικής ελέγχου *LQR* που αναπτύξαμε, καθιστώντας έτσι τις αεροδυναμικές πτέρυγες ενεργητικές (*Actively Controlled Aerodynamic Wings*). Αυτές οι ενεργητικές πτέρυγες παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια στο όχημα καθώς οδηγείται με υψηλές ταχύτητες, διότι μέσω της στρατηγικής ελέγχου ελέγχονται οι αρνητικές *lift forces (downforces)*, κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη πρόσφυση του αυτοκινήτου στο έδαφος, και άρα βελτίωση των δυνατοτήτων χειρισμού του οχήματος σε υψηλές ταχύτητες. Αντίστοιχη εφαρμογή υπάρχει στη δημοσίευση “*Design of an Actively Controlled Aerodynamic Wing to Increase High-Speed Vehicle Safety – Yuping He, SAE Technical Paper 2013*”.

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ενεργητικά συστήματα οχημάτων, ένα τέτοιο ενεργητικό σύστημα με ελεγχόμενες δυνάμεις αεροδυναμικής (*aerodynamic forces*) δεν έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή στην ανάπτυξη ενεργητικών συστημάτων αυτοκινήτων, και θα μπορούσε να αποτελεί μια καινοτόμα έρευνα στον τομέα ελέγχου της αεροδυναμικής των οχημάτων. Εξάλλου, αυτές οι αεροδυναμικές πτέρυγες που αναφέρθηκαν προηγουμένως υπάρχουν στα οχήματα της *Formula 1*, επομένως κάτι τέτοιο θα αποτελούσε και έρευνα σχετικά με τον έλεγχο της αεροδυναμικής αυτών των αγωνιστικών οχημάτων.

5.2.2 *veDYNA_ext_brake*

Το μοντέλο *veDYNA_ext_brake* περιλαμβάνει την οντότητα *External Brake System* η οποία περιέχει το σύστημα πέδησης του οχήματος. Σε αυτό το σύστημα εισέρχονται οι πιέσεις των κυλίνδρων των φρένων που ασκούνται στα δισκόφρενα, όπου οι πιέσεις αυτές καθορίζονται από τη θέση του πεντάλ των φρένων, δηλαδή από τον οδηγό. Αυτές οι πιέσεις εισέρχονται από το υποσύστημα *Brake Hydraulics* και καταλήγουν στα μπλοκ των δισκόφρενων, απ' όπου υπολογίζεται η ροπή πέδησης (*braking torque*). Είτε μέσω της στρατηγικής *LQR* που χρησιμοποιήσαμε, είτε μέσα από μια πληθώρα εφαρμογών του αυτομάτου ελέγχου που δεν περιλαμβάνουν τη στρατηγική *LQR*, μπορούμε να παρέμβουμε στη δύναμη που ασκούν οι κύλινδροι αυτοί προσθέτοντας επιπλέον δύναμη (όπως κάναμε εμείς όταν εφαρμόσαμε *switch1=0*), άρα και ροπή, έχοντας έτσι ένα σύστημα ελέγχου ενεργητικής πέδησης (*Active Braking Control System*).

Μια μορφή ενός τέτοιου ενεργητικού συστήματος πέδησης είναι το σύστημα *Brake Assist*, στο οποίο υπολογίζεται η ταχύτητα του οχήματος και η δύναμη που ασκούν τα φρένα στους τροχούς, για να καθορίσουν πότε ο οδηγός επιχειρεί μια στάση εκτάκτου ανάγκης. Εάν έχει καθοριστεί, τότε το σύστημα εφαρμόζει μια σταδιακή επιπρόσθετη πίεση/δύναμη των φρένων στην περίπτωση που τα πεντάλ των φρέ-

νων δεν έχουν πατηθεί αρκετά, μέχρι το *Antilock Braking System (ABS)* να αναλάβει δράση και να εμποδίσει το μπλοκάρισμα των τροχών.

Την τελευταία δεκαετία έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι και προσεγγίσεις στο κομμάτι του αυτόματου ελέγχου πέδησης (*Automatic Braking Control*), τις οποίες ο χρήστης μπορεί να δοκιμάσει στο *veDYNA*. Τα ενεργητικά συστήματα πέδησης είναι τα “έξυπνα” συστήματα ελέγχου τα οποία ασκούν μέσω επενεργητών (*actuators*) επιπρόσθετη δύναμη στα φρένα όταν αυτά κρίνουν ότι χρειάζεται. Έχει αποδειχτεί ότι τα συστήματα *Active Braking Control* μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις ακινητοποίησης κατά 45% σε δοκιμές προσομοιωτών μέσω των κανόνων ελέγχου των συστημάτων αυτών που αφορούν την επιβράδυνση των τροχών, αλλά και ειδικά στην περίπτωση του συστήματος αντιμπλοκαρίσματος τροχών – *ABS (Antilock Braking System)*, να περιορίσουν την πλαγιολίσθηση (*skidding*) και την ολίσθηση στο διαμήκη άξονα. Το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος τροχών είναι ένα ηλεκτρονικό και μηχανικό σύστημα ελέγχου της κίνησης των τροχών κατά τη διαδικασία φρεναρίσματος ενός οχήματος, και έχει προσφέρει σημαντική συμβολή στην ενίσχυση της ενεργητικής ασφάλειας τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό το κομμάτι του ελέγχου της ολίσθησης (*slip control*) μέσω ενός συστήματος *ABS* είναι ιδιαίτερα ελκυστικό, μιας και μπορεί να επεκταθεί από ένα τέτοιο σύστημα σε εφαρμογές *ESC (Electronic Stability Control)*. Αντίστοιχη δημοσίευση που αφορά την εφαρμογή αυτή είναι η “*Wheel Slip Control in ABS Brakes using Gain Scheduled Constrained LQR – Idar Petersen, Tor A. Johansen, Jens Kalkkuhl and Jens Lüdemann*”.

Έτσι, όπως εμείς ασχοληθήκαμε με την κάθετη μετατόπιση του κέντρου βάρους του οχήματος και των τροχών, μέσω του *veDYNA* μπορεί ο χρήστης να βελτιώσει την οριζόντια μετατόπιση του κέντρου βάρους και των τροχών, μέσω του *LQR* αλλά και άλλων βέβαια στρατηγικών ελέγχου στο μοντέλο *veDYNA_ext_brake*, και μάλιστα σε προσομοιώσεις που γίνονται σε διαφορετικό έδαφος η καθεμία, με διαφορετικό συντελεστή τριβής μεταξύ του εδάφους και των τροχών.

5.2.3 *veDYNA_ext_cvt*

Στο μοντέλο αυτό υπάρχει η οντότητα *External CVT Controller*, στην οποία υπάρχει μια απλή εφαρμογή του *CVT – Continuously Variable Transmission*, η οποία περιλαμβάνει έναν αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει το *transmission ratio* σαν συνάρτηση της ταχύτητας του οχήματος, η οποία περιορίζεται από το *maximum* και *minimum transmission ratio*. Ο χρήστης μπορεί με την τεχνική ελέγχου του *LQR*, αλλά και άλλων βέβαια στρατηγικών, να ελέγξει τη λειτουργία του *CVT*. Αντίστοιχη δημοσίευση που αφορά την εφαρμογή αυτή είναι η “*Comparison Of PID, Pole Placement and LQR Controllers For Speed Ratio Control of Continuously Variable Transmission (CVT) – Sameh Bdran, Prof.Ma Shuyuan, Samo Saifullah, Dr.Huang Jie – Mechatronic Center of Mechanical Engineering Beijing Institute of Technology*”.

5.2.4 *veDYNA_ext_eng*

Οι περισσότερες καινούργιες μηχανές εσωτερικής καύσης βασίζονται σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου του κινητήρα, οι οποίες ρυθμίζουν τη διαδικασία της καύσης έτσι ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα του κινητήρα, και να μειωθεί η εκπομπή καυσαερίων. Οι μονάδες αυτές ελέγχουν μια σειρά από ενεργοποιητές (*actuators*) που δρουν πάνω στις μηχανές εσωτερικής καύσης προκειμένου να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη απόδοση των μηχανών αυτών.

Το μοντέλο *veDYNA_ext_eng* περιέχει την οντότητα *External Engine* η οποία αφορά τον κινητήρα του οχήματος και υπολογίζει τη ροπή του κινητήρα σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής του και τη γωνία που σχηματίζει το πεντάλ επιτάχυνσης σε σχέση με την αρχική του θέση. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να παρέμβει σε αυτό το μοντέλο διαμορφώνοντας ένα σύστημα ελέγχου της μηχανής που θα βελτιστοποιεί την απόδοσή της. Αντίστοιχη δημοσίευση με την εφαρμογή αυτή είναι η

“*LQR Control for Speed and Torque of Internal Combustion Engines – Jose David Lopez, Jairo Jose Espinosa, John Ramiro Agudelo – 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011*”.

5.3 Σύνοψη

Στο σημείο αυτό είμαστε σε θέση να συνοψίσουμε όλα τα βασικά και σημαντικά σημεία της γραπτής αναφοράς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τη διευκόλυνση του αναγνώστη. Αυτή η σύνοψη είναι ευκολότερο να γίνει με τη μορφή απαντήσεων στις σημαντικότερες ερωτήσεις που θα μπορούσαν να γίνουν από κάποιον σχετικά με την εργασία αυτή και την επίτευξη του σκοπού της.

Ποιος είναι ο επιστημονικός χώρος στον οποίο εντάσσεται η υλοποίηση της εργασίας αυτής;

Ο γενικότερος επιστημονικός χώρος στον οποίο εντάσσεται η υλοποίηση της εργασίας αυτής είναι η *Θεωρία Ελέγχου* (*Control Theory*). Η Θεωρία Ελέγχου είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος της Μηχανικής και των Μαθηματικών, ο οποίος ασχολείται με τη συμπεριφορά των δυναμικών συστημάτων. Ο *Αυτόματος Έλεγχος* (*Automatic Control*) είναι η εφαρμογή της Θεωρίας Ελέγχου για τη ρύθμιση κάποιων διαδικασιών χωρίς την άμεση παρέμβαση του ανθρώπου.

Ο ειδικότερος επιστημονικός χώρος στον οποίο εντάσσεται η υλοποίηση της εργασίας αυτής είναι ο *Βέλτιστος Έλεγχος* (*Optimal Control*), μία σύγχρονη (και όχι κλασσική) μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων ελέγχου. Ο βέλτιστος έλεγχος ασχολείται με το πρόβλημα της εύρεσης ενός κανόνα ελέγχου για ένα δεδομένο δυναμικό σύστημα, στο οποίο ικανοποιείται κάποιο κριτήριο βελτιστοποίησης. Ένα πρόβλημα ελέγχου περιλαμβάνει μια συνάρτηση κόστους, η οποία είναι συνάρτηση των μεταβλητών κατάστασης και των μεταβλητών ελέγχου ενός συστήματος. Ο βέλτιστος έλεγχος λοιπόν είναι ένα σύνολο από διαφορικές εξισώσεις, με τις εξισώσεις αυτές να

περιγράφουν τις μεταβλητές ελέγχου οι οποίες ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους του προβλήματος ελέγχου.

Ποια στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιούμε;

Η στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιούμε είναι η στρατηγική του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή (*Linear Quadratic regulator – LQR*), η οποία αποτελεί ένα ειδικό πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου. Το πρόβλημα *LQR* τίθεται ως εξής: Να βρεθεί το σήμα ελέγχου $u(t)$ που να ελαχιστοποιεί την τετραγωνική συνάρτηση κόστους συνεχούς χρόνου της σχέσης (4.3) η οποία αφορά ένα γραμμικό, χρονικά αμετάβλητο σύστημα, που περιγράφεται στο χώρο κατάστασης από την εξίσωση (4.4). Η φυσική σημασία της ελαχιστοποίησης αυτής είναι να περιορίσει την κατάσταση του συστήματος κοντά στο μηδέν, έχοντας συγχρόνως ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

Ποιο είναι το επιστημονικό ερώτημα το οποίο καλείται να απαντήσει η εργασία αυτή;

Το βασικό πρόβλημα που καλείται να απαντήσει η εργασία αυτή, με βάση την Εικόνα 4.2 στη σελ. 127, είναι το εξής: ποιος είναι ο βέλτιστος πίνακας K ο οποίος ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους στην περίπτωση του προβλήματος *LQR*, και ο οποίος δίνει το κατάλληλο και βέλτιστο σήμα ελέγχου $u(t) = -Kx(t)$, (το οποίο ρυθμίζει την έξοδο του συστήματος $x(t)$ σύμφωνα με την ελαχιστοποίηση του κόστους αυτού), καθώς εισέρχεται στο σύστημα η διαταραχή εισόδου z_r .

Που βρίσκει εφαρμογή (γενικότερα αλλά και ειδικότερα) αυτή η στρατηγική ελέγχου και ποια είναι τα κριτήρια απόδοσης της στρατηγικής αυτής;

Αυτή η στρατηγική ελέγχου εφαρμόζεται στο σύστημα ανάρτησης ενός υπολογιστικού μοντέλου οχήματος. Έτσι, βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην κατακόρυφη δυναμική του οχήματος (*vertical vehicle dynamics*), επηρεάζοντας σε κάποιο βαθμό την πλευρική δυναμική και τη διαμήκη δυναμική του οχήματος (*lateral* και *longitudinal vehicle dynamics* αντίστοιχα). Γενικά λοιπόν βρίσκει εφαρμογή στη δυναμική των οχημάτων (*vehicle dynamics*).

Συγκεκριμένα, η στρατηγική ελέγχου βρίσκει και εφαρμόζει *έμμεσα*, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αυτού του υπολογιστικού μοντέλου, το βέλτιστο συντελεστή απόσβεσης c της δύναμης του αποσβεστήρα ταλαντώσεων με μέτρο $F_d = c(\dot{z}_s - \dot{z}_u)$, η οποία δύναμη απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.4** στη σελ. 90. Αυτή η στρατηγική ελέγχου βρίσκει και εφαρμόζει *άμεσα* τη ρυθμισμένη και βέλτιστη αυτή δύναμη F_d που ασκεί ο αποσβεστήρας στο αμάξωμα. Το σύστημα ανάρτησης στο οποίο ελέγχουμε αυτή τη δύναμη είναι ένα σύστημα *ενεργητικής* ανάρτησης.

Στην απάντηση της πρώτης ερώτησης αναφέρθηκε ότι ο βέλτιστος έλεγχος ασχολείται με το πρόβλημα της εύρεσης ενός κανόνα ελέγχου για ένα δεδομένο δυναμικό σύστημα, στο οποίο ικανοποιείται κάποιο κριτήριο βελτιστοποίησης. Έτσι, προσαρμόζουμε τα βασικά κριτήρια απόδοσης των αναρτήσεων στα κριτήρια βελτιστοποίησης της στρατηγικής ελέγχου, τα οποία είναι: το κριτήριο *ευστάθειας* (διατήρηση του αυτοκινήτου σε παράλληλη ως προς το δρόμο θέση), το κριτήριο *άνεσης* (ελαχιστοποίηση κατακόρυφων επιταχύνσεων εξαιτίας της γεωμετρίας του δρόμου), και το κριτήριο *εξοικονόμησης ενέργειας* (ελαχιστοποίηση κόστους ελέγχου). Αυτά είναι λοιπόν τα βασικά κριτήρια απόδοσης των αναρτήσεων, μέσω των οποίων καταλήγουμε στις μαθηματικές σχέσεις που αποτελούν τα κριτήρια βελτιστοποίησης της στρατηγικής ελέγχου, τα οποία βρίσκονται στην ενότητα **4.5**.

Που βασίστηκε η τεχνική ελέγχου της εργασίας αυτής;

Η τεχνική ελέγχου της εργασίας αυτής υλοποιήθηκε με βάση το μαθηματικό μοντέλο αυτοκινήτου επτά βαθμών ελευθερίας (7-DOF) που απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.3** της σελ. 128. Θεωρούμε ότι το πλαίσιο έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (3-DOF). Επιτρέπει κίνηση στον κατακόρυφο άξονα z του τρισδιάστατου επιπέδου στο οποίο θεωρούμε ότι κινείται το αυτοκίνητο του υποδείγματος, περιστροφή γύρω από τον άξονα x , και περιστροφή γύρω από τον άξονα y . Κάθε ένας από τους τέσσερις τροχούς επιτρέπει κατακόρυφη κίνηση στον άξονα z ανεξάρτητη από την κατακόρυφη κίνηση του πλαισίου. Έτσι, ο κάθε τροχός προσφέρει ένα βαθμό ελευθερίας στην κίνηση του συστήματος. Συνολικά, οι τέσσερις τροχοί προσφέρουν τέσσερις βαθμούς ελευθερίας στην κίνηση του μοντέλου (4-DOF). Κατά συνέπεια, το μοντέλο αυτό έχει επτά βαθμούς ελευθερίας (7-DOF).

Πως κατασκευάστηκε ο αλγόριθμος ελέγχου LQR στην εργασία αυτή;

Ο αλγόριθμος ελέγχου LQR κατασκευάζεται προγραμματιστικά και σχεδιαστικά:

Το προγραμματιστικό κομμάτι του αλγορίθμου βρίσκεται στο παράρτημα Α.2 στο οποίο υπάρχει ο κώδικας του αλγορίθμου αυτού. Ο κώδικας αυτός επιστρέφει το βέλτιστο K του προβλήματος LQR, ο υπολογισμός του οποίου βασίζεται στο μαθηματικό υπόδειγμα αυτοκινήτου που αναφέρθηκε παραπάνω.

Το σχεδιαστικό κομμάτι του αλγορίθμου παρουσιάζεται στην ενότητα 4.5.1 στο οποίο εφαρμόζεται η σχέση $u(t) = -Kx(t)$.

Σε ποια περιβάλλοντα εφαρμόζονται όλα τα παραπάνω;

Η εργασία αυτή υλοποιείται στο περιβάλλον *veDYNA*, ένα περιβάλλον το οποίο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες της οδήγησης ενός οχήματος. Πρόκειται για ένα περιβάλλον το οποίο είναι ιδανικό για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς και των δυναμικών συστημάτων όλων των ειδών των τροχοφόρων οχημάτων σε πραγματικό ή μη-πραγματικό χρόνο. Το μοντέλο οχήματος του *veDYNA* είναι ένα μοντέλο *Simulink*. Το *Simulink* είναι ένα περιβάλλον κατασκευής *block diagrams* τα οποία αφορούν τη ροή δεδομένων απλών αλλά και πολυσύνθετων δυναμικών συστημάτων. Το *veDYNA* επίσης συνδέεται άμεσα και συνυπάρχει με το MATLAB, αφού μέσω του MATLAB υλοποιούνται και εκτελούνται οι λειτουργίες και οι συναρτήσεις του *veDYNA*.

Ποιες είναι οι απαραίτητες ρυθμίσεις που κάναμε στο περιβάλλον αυτό και σε ποια χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος αυτού χρειάστηκε να παρέμβουμε προκειμένου να πετύχουμε το σκοπό μας;

Οι απαραίτητες ρυθμίσεις του *veDYNA* που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας αυτής απεικονίζονται στις εικόνες **Εικόνα 2.10** και **Εικόνα 2.11** στις σελ. 72 και 73 αντίστοιχα, και αφορούν δυο διαφορετικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του οχήματος καθώς οδηγείται στην πρώτη περίπτωση σε προκαθορισμένη πίστα, και στη δεύτερη περίπτωση σε ευθεία με σαμαράκι. Η βασική προσομοίωση της εργασίας

αυτής, της οποίας δηλαδή τα αποτελέσματα μελετάμε, είναι η προσομοίωση σε ευθεία με σαμαράκι.

Για να πετύχουμε το σκοπό μας χρειάστηκε να παρέμβουμε στο αρχικό μοντέλο οχήματος του *veDYNA*, προκειμένου να σχεδιάσουμε τον αλγόριθμο ελέγχου στο εσωτερικό της οντότητας *External Suspension*. Αυτό το δομικό στοιχείο απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.4**, και συνδέεται με το αρχικό μοντέλο οχήματος *veDYNA Vehicle Subsystem*. Συγκεκριμένα, τροποποιήσαμε το εσωτερικό της οντότητας *External Suspension* του μοντέλου *veDYNA_extern_susp*.

Παράρτημα Α

A.1 Κώδικας διαδικασίας χρήστη (*User Procedure*)

```
function [ ] = my_suspension_ramp_procedure

% This m-file assigns 'my_vedyna_extern_susp.mdl' model's parameters values
% and runs all the suitable settings for our external suspension.
%
% The vehicle is accelerated to 80 km/h and then is driven over a 0.1m high
% ramp.
%
% -----
% -----
% Procedure:
% 1. Select 'demo_external' from the 'Simulation Project'
% 2. Select the Simulink model named 'my_vedyna_extern_susp.mdl'
% 3. Edit 'my_suspension_ramp_procedure' from the 'User Procedure':
%    - Set 'switch1': 1 = external suspension forces are used ONLY,
%                      replacing internal suspension forces
%                      0 = internal + external suspension forces
% 4. Click 'Execute User Procedure' and analyse plots
% 5. Change parameters if it's required
% -----
% -----

run('C:\Program Files (x86)\DYNAwareR3.3.5\work.current\test_a_.m');

load('K1.mat')
load('G1.mat')

%***** parameters *****

switch1 = 0;           % switch1 = 0 : External + Internal suspension

% make parameters available for Simulink
try
    lmdl = evalin('base','MDL');           % Read MDL structure (if it
    exists) from base WS (workspace) into local WS as lmdl
catch
    lmdl = [];                             % If MDL does not exist in base
    WS, create empty lmdl in local WS
end;

lmdl.EXTSUSP.Comment = 'Parameters of Simulink Model';

% active suspension on-off switch
lmdl.EXTSUSP.onoff.Comment = 'switch model between only external
(switch1 = 1) and external plus internal suspension (switch1 = 0)';
lmdl.EXTSUSP.onoff.vUnit = '[-]';
lmdl.EXTSUSP.onoff.v = switch1;

lmdl.EXTSUSP.Gain.Comment = 'the gain (-K) of our controller';
lmdl.EXTSUSP.Gain.v = K1;

lmdl.EXTSUSP.G_transpose.Comment = 'the transpose of G';
lmdl.EXTSUSP.G_transpose.v = G1;
```

```

assignin('base','MDL',lmdl); % Write MDL structure in base WS,
from lmdl in local WS

%***** end of parameters *****

%***** suitable settings *****

% apply simulation maneuver

% load maneuver settings: longitudinal, lateral, boundaries (constraints)
% vm_load is used to load parameters such that they can be modified
[long_dat, long_err] = vm_load('auto_speed','man','long');
[lat_dat, lat_err] = vm_load('straight_line','man','lat');
[const_dat, const_err] = vm_load('startls','man','constr');

% check if loading maneuver settings failed
if (long_err || lat_err || const_err),
    dm_set_infolog_message(mfilename, 300, 300, [dm_get_prefixerror,'loading
maneuver settings failed']);
    return;
end;

% apply maneuver settings: longitudinal, lateral, boundaries (constraints)
man_err = vm_apply( {long_dat, lat_dat, const_dat} , 'man');

% apply basic driver
driver_err = vm_apply_bdriver('skilled racy',80.0000);

% apply standard road
road_err = vm_apply('muesplit','road','standard',1);

% generate vrml road representation for animation
vm_handle_settings('road.vrml',1);

% apply trace settings
trace_err = up_trace(0,14,'my_trace_file');

% check if applying data failed
if (man_err || driver_err || road_err || trace_err),
    dm_set_infolog_message(mfilename, 300, 300, [dm_get_prefixerror,'apply
failed']);
    return;
end;

% err = vm_runsim(0,14);
err = vm_runsim(0,30);

% check, if simulation failed
if err,
    dm_set_infolog_message(mfilename, 300, 300, [dm_get_prefixerror,'running
simulation failed']);
    return;
end;

% get simulation results
res= vm_results;

% check, if simulation results are available
if isempty(res),
    dm_set_infolog_message(mfilename, 300, 300, [dm_get_prefixerror,'no
results']);
    return;
end;

```

```

end;

%***** now do the plotting *****

run('C:\Program Files (x86)\DYNAwareR3.3.5\work.current\plots_ramp.m');

```

A.2 Αλγόριθμος *LQR*

```

%   Directory of algorithm: DYNAwareR3.3.5\work.current\test_a_.m

%   Control veDYNA vehicle's suspension
%   via LQR controller.
%
%   A. Pouliezios
%   v2.0, 2013

%   veDYNA Vehicle's Parameters:

%*****
%   sprung masss (kg)
%   ms = 1134.8;
%   front unsprung mass (kg)
%   mf = 37.6;
%   rear unsprung mass (kg)
%   mr = 43;
%   front damping coefficient (Ns/m)
%   bf = 1290;
%   bf = 987.717;
%   rear damping coefficient (Ns/m)
%   br = 1620;
%   br = 858.568;
%   front spring coefficient (N/m)
%   kf = 17098.09;
%   rear spring coefficient (N/m)
%   kr = 27183.53;
%   front antiroll bar stiffness (Nm/deg)
%   rf = 2609.704;
%   rf = 19200;
%   rear antiroll bar stiffness (Nm/deg)
%   rr = 196.6071;
%   rr = 9600;
%   tire stiffness coefficient (N/m)
%   kt = 180000;
%   rolling momemnt of inertia of car body (kg m^2)
%   Ith = 305;
%   pitching momemnt of inertia of car body (kg m^2)
%   Iph = 1520;
%   distance of car centre of gravity from front axle (m)
%   lf = 1.275;
%   distance of car centre of gravity from rear axle (m)
%   lr = 1.343;
%   half width of car body (m)
%   tr = 0.6995;
%   tf = 0.7025;
%*****

%   Adapted from Park & Kim, DVSC for active suspensions based on a full car
model

```

```

% LQR design

M_s = diag([ms, Ith, Iph]);
[rM_s, cM_s] = size(M_s);
M_u = diag([mf, mf, mr, mr]);
[rM_u, cM_u] = size(M_u);
B_s = diag([bf, bf, br, br]);
K_ss = diag([kf, kf, kr, kr]);
K_t = diag([kt, kt, kt, kt]);
[rK_t, cK_t] = size(K_t);

K_sr = [kf+rf/2    -rf/2    0    0;
        -rf/2    kf+rf/2    0    0;
         0         0    kr+rr/2  -rr/2;
         0         0    -rr/2   kr+rr/2];

G = [ 1    1    1    1;
      -tf   tf  -tr   tr;
      -lf  -lf   lr   lr];
[rG, cG] = size(G);

G1 = G';

M = [      M_s      zeros(rM_s, cM_u);
      zeros(rM_u, cM_s)      M_u];
[rM, cM] = size(M);
invM = inv(M);

Bz = [G*B_s*G'   -G*B_s;
      -B_s*G'     B_s];
[rBz, cBz] = size(Bz);

Ka = [ G*K_sr*G'   -G*K_sr;
      -K_ss*G'     K_t+K_ss];
[rKa, cKa] = size(Ka);

Kb = [zeros(7-rK_t, cK_t);
      K_t];
[rKb, cKb] = size(Kb);

Ga = [   G;
      -eye(cG)];
[rGa, cGa] = size(Ga);

A = [zeros(cBz, cKa)   eye(cBz);
      -invM*Ka         -invM*Bz];

% A = [zeros(cBz, cKa)   eye(cBz);
%      -invM*Ka         zeros(cBz, cKa)];

B = [zeros(14-rM, cGa);
      invM*Ga];

F = [zeros(14-rM, cKb);
      invM*Kb];

% Q2: [z c θ φ] accelerations

Q2 = zeros(3, 3);

w_q2 = 0.2;
q2_sc = 1/sqrt(6);

Q2(1,1) = w_q2*(q2_sc);
Q2(2,2) = w_q2*(q2_sc);

```

```

    Q2(3,3) = w_q2*(q2_sc);

%   R1: u

%   w_r1 = 0.00001;
    w_r1 = 0.000005;
    R1 = w_r1*(1/sqrt(200))*eye(4);

%   Q1: [z c  $\theta$   $\phi$ ]

    Q1 = zeros(14, 14);

    w_q1 = 1-w_q2-w_r1;
    q1_sc = 1/sqrt(0.2);

    Q1(1,1) = w_q1*(q1_sc);
    Q1(2,2) = w_q1*(q1_sc);
    Q1(3,3) = w_q1*(q1_sc);

    Q = A(8:10, :)'*Q2*A(8:10, :) + Q1;
    R = B(8:10, :)'*Q2*B(8:10, :) + R1;
    N = A(8:10, :)'*Q2*B(8:10, :);

    K = lqr(A, B, Q, R, N);

    K1 = -K;

    save K1.mat K1;
    save G1.mat G1;

    disp('***** K1 saved *****');

```

A.3 Plotting script

```

%   Directory of script: DYNAwareR3.3.5\work.current\plots_ramp.m

%load('road_zprofile_z_c.mat');
load('results_with_controller.mat');
load('results_without_controller.mat');

% x = road_z(2, :);
% y = road_z(3, :);
% z = road_z(4, :);

time = var(1,:);
time1 = var_old(1,:);

u1 = var(2, :);
u2 = var(3, :);
u3 = var(4, :);
u4 = var(5, :);

z_s1 = var(6, :);
z_s2 = var(7, :);
z_s3 = var(8, :);
z_s4 = var(9, :);

z_c = var(10, :);

```

```

theta = var(11, :);
phi = var(12, :);

acc_theta = var(13, :);
acc_phi = var(14, :);

acc_z_c = var(15, :);

u_passive1 = var(16, :);
u_passive2 = var(17, :);
u_passive3 = var(18, :);
u_passive4 = var(19, :);

u1_old = var_old(2, :);
u2_old = var_old(3, :);
u3_old = var_old(4, :);
u4_old = var_old(5, :);

z_s1_old = var_old(6, :);
z_s2_old = var_old(7, :);
z_s3_old = var_old(8, :);
z_s4_old = var_old(9, :);

z_c_old = var_old(10, :);
theta_old = var_old(11, :);
phi_old = var_old(12, :);

acc_theta_old = var_old(13, :);
acc_phi_old = var_old(14, :);

acc_z_c_old = var_old(15, :);

total_damper_force1 = u1+u_passive1;
total_damper_force2 = u2+u_passive2;
total_damper_force3 = u3+u_passive3;
total_damper_force4 = u4+u_passive4;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','u','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition',[
0 0 1 1]);

subplot(4,1,1); plot(time,u1,'r',time1,u1_old,'b');
hL = legend('after controller','before controller');
newPosition = [0.02 0.46 0.05 0.07];
set(hL,'Position', newPosition);
grid on;
title('Forces Front Left');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
% xlim([4.5 11.8]);
zoom on;

subplot(4,1,2); plot(time,u2,'r',time1,u2_old,'b');
grid on;
title('Forces Front Right');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
zoom on;

subplot(4,1,3); plot(time,u3,'r',time1,u3_old,'b');
grid on;
title('Forces Rear Left');

```

```

ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
zoom on;

subplot(4,1,4); plot(time,u4,'r',time1,u4_old,'b');
grid on;
title('Forces Rear Right');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
zoom on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','total damper
forces','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);

subplot(4,1,1); plot(time,total_damper_force1,'r',time1,u1_old,'b');
hL = legend('after controller','before controller');
newPosition = [0.02 0.46 0.05 0.07];
set(hL,'Position', newPosition);
grid on;
title('Total Forces Front Left');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
% xlim([4.5 11.8]);
zoom on;

subplot(4,1,2); plot(time,total_damper_force2,'r',time1,u2_old,'b');
grid on;
title('Total Forces Front Left');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
zoom on;

subplot(4,1,3); plot(time,total_damper_force3,'r',time1,u3_old,'b');
grid on;
title('Total Forces Front Left');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
zoom on;

subplot(4,1,4); plot(time,total_damper_force4,'r',time1,u3_old,'b');
grid on;
title('Total Forces Front Left');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Force [N]');
xlim([10.8 11.4]);
zoom on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','z_s','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition'
,[0 0 1 1]);

subplot(2,2,1); plot(time,z_s1,'r',time1,z_s1_old,'b');
hL = legend('z_s after controller','z_s before controller');
newPosition = [0.03 0.48 0.07 0.07];
set(hL,'Position', newPosition);
grid on;
title('Distance Front Left');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Distance [m]');

```

```

xlim([10.8 12.8]);
% xlim([4.5 14]);
zoom on;

subplot(2,2,2), plot(time,z_s2,'r',time1,z_s2_old,'b');
grid on;
title('Distance Front Right');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Distance [m]');
xlim([10.8 12.8]);
% xlim([4.5 14]);

zoom on;

subplot(2,2,3), plot(time,z_s3,'r',time1,z_s3_old,'b');
grid on;
title('Distance Rear Left');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Distance [m]');
xlim([10.8 12.8]);
% xlim([4.5 14]);

zoom on;

subplot(2,2,4), plot(time,z_s4,'r',time1,z_s4_old,'b');
grid on;
title('Distance Rear Right');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Distance [m]');
xlim([10.8 12.8]);
% xlim([4.5 14]);

zoom on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','z_c
(time)','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);

plot(time,z_c,'r',time,z_c_old,'b');
legend('z_c after controller','z_c before controller');
grid on;
title('Vertical movement of CoG');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('Movement [m]');
xlim([10.8 12.8]);
% xlim([1 12.8]);
zoom on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','theta,
phi','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);

subplot(2,1,1), plot(time,theta,'r',time1,theta_old,'b');
hL = legend('after controller','before controller');
newPosition = [0.03 0.48 0.07 0.07];
set(hL,'Position', newPosition);
grid on;
title('Roll angle');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('[rad]');

```



```

xlim([10.5 13]);
zoom on;

subplot(2,1,2), plot(time,phi,'r',time1,phi_old,'b');
grid on;
title('Pitch angle');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('[rad]');
xlim([10.5 13]);
% xlim([4.5 14]);
zoom on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','z_c
acceleration','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition',[0 0
1 1]);

plot(time,acc_z_c,'r',time1,acc_z_c_old,'b');
legend('z_c acc after controller','z_c acc before controller');
grid on;
title('Vertical acceleration of CoG');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('[m/s^2]');
xlim([10.8 12]);
zoom on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure('name','theta, phi
accelerations','NumberTitle','off','units','normalized','outerposition',[0 0
1 1]);

subplot(2,1,1), plot(time,acc_theta,'r',time1,acc_theta_old,'b');
hL = legend('after controller','before controller');
newPosition = [0.03 0.48 0.07 0.07];
set(hL,'Position', newPosition);
grid on;
title('Roll angle acceleration');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('[rad/s^2]');
xlim([10.8 12]);
zoom on;

subplot(2,1,2), plot(time,acc_phi,'r',time1,acc_phi_old,'b');
grid on;
title('Pitch angle acceleration');
xlabel('Simulation Time [s]');
ylabel('[rad/s^2]');
xlim([10.8 12]);
zoom on;

```

Βιβλιογραφία

- 1) Rajesh Rajamani, “*Vehicle Dynamics and Control, Mechanical Engineering Series*”, Springer Editions ©2006
- 2) Dr. Li Li & Dr. Fei-Yue Wang, “*Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles*”, Springer Editions ©2007
- 3) Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammers, Gheorghe Ghita, Marius Giuclea, “*Semi-active Suspension Control – Improved Vehicle Ride and Road Friendliness*”, Springer Editions ©2008
- 4) Reza N. Jazar, “*Vehicle Dynamics – Theory and Application*”, 2nd edition, Springer Editions ©2014
- 5) Thomas D. Gillespie, “*Fundamentals of Vehicle Dynamics*”, Society of Automotive Engineers, Inc.
- 6) Θωμάς Γ. Χόνδρος, Σημειώσεις για το μάθημα “*Δυναμική Ανάλυση Οχημάτων*”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων, Πάτρα 2007
- 7) veDYNA® 3.10 “*User Manual*”, TESIS DYNAware ©2010
- 8) veDYNA® 3.10 “*Simulink Manual*”, TESIS DYNAware ©2010
- 9) veDYNA® 3.10 “*Example Book*”, TESIS DYNAware ©2010
- 10) veDYNA® 3.10 “*Model Overview*”, TESIS DYNAware ©2010
- 11) veDYNA® 3.10 “*Light Data Requirements*”, TESIS DYNAware ©2010
- 12) veDYNA® 3.10 “*Maneuver Manual*”, TESIS DYNAware ©2010
- 13) veDYNA® 3.10 “*Road Manual*”, TESIS DYNAware ©2010
- 14) Α. Πουλιέζος, Σημειώσεις μαθήματος “*Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου II – Συστήματα πολλών εισόδων πολλών εξόδων*”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μ.Π.Δ., Έκδοση 2.0 Σεπτέμβριος 2008
- 15) Α. Πουλιέζος, Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος “*Βέλτιστος Έλεγχος*”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μ.Π.Δ., Έκδοση 2.0 Απρίλιος 2013
- 16) Π. Ν. Παρασκευόπουλος, “*Βέλτιστος Έλεγχος, Φίλτρο Kalman, Στοχαστικός Έλεγχος*”, Εκδόσεις Π. Ν. Παρασκευόπουλος, Αθήνα 2004
- 17) Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, “*Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*”, 11^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα ©2009

- 18) Α. Πέτρου, Διπλωματική Εργασία “*Η χρήση του περιβάλλοντος «εν δυνάμει πραγματικότητας» στη διδασκαλία και έρευνα συστημάτων ελέγχου*”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Η.Μ.Μ.Υ., Οκτώβριος 2009
- 19) Μάνος Ρουμελιώτης, “*Μοντελοποίηση και Προσομοίωση*”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πρόγραμμα Σπουδών Πληροφορικής, Θεματική Ενότητα Γραμμικού Προγραμματισμού και Προσομοίωσης, Τόμος Α', Πάτρα 2001
- 20) Jong H. Park, Young S. Kim, “*Decentralized Variable Structure Control for Active Suspensions based on a Full-Car Model*”, International Conference on Control Applications, September 1998
- 21) Ben Creed, Nalaka Kahawatte, Scott Varnhagen, “*Design of an LQR Control Strategy for Implementation on a Vehicular Active Suspension System*”, University of California, Davis, 2010
- 22) L.V.V. Gopala Rao, S. Narayanan, “*Sky-hook Control of Non-Linear Quarter Car Model Traversing Rough Road Matching Performance of LQR Control*”, Department of Mechanical Engineering, Machine Design Section, Indian Institute of Technology, India, 2008
- 23) T. Yoshimura, K. Nakaminami, M. Kurimoto, J. Hino, “*Active suspension of passenger cars using linear and fuzzy-logic controls*”, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokushima, Japan, 1998
- 24) Yahaya Md. Sam, “*Robust Control of Active Suspension System for a Quarter Car Model*”, Department of Control and Instrumentation Engineering Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, December 2006
- 25) Kevin Craig, “*Automotive Suspension Systems*”, Motivation for the study of Mechanical System, Physical and Mathematical Modeling, Mechanical Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute
- 26) Grzegorz Tora, “*The Active Suspension of a Cab in a Heavy Machine*”, Institute of Machine Design, Faculty of Mechanical Engineering, Cracow University of Technology, Cracow, Poland
- 27) R. Vijayagopal, N. Shidore, S. Halbach, L. Michaels, A. Rousseau, “*Automated Model Based Design Process to Evaluate Advanced Component Technologies*”, Argonne National Laboratory, Copyright © 2010 SAE International

Ιστοσελίδες

- 1) http://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_dynamics
- 2) [http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamics_\(mechanics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamics_(mechanics))
- 3) http://en.wikipedia.org/wiki/Classical_mechanics
- 4) http://en.wikipedia.org/wiki/Model-based_design
- 5) [http://en.wikipedia.org/wiki/Plant_\(control_theory\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Plant_(control_theory))
- 6) http://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_simulation
- 7) <http://en.wikipedia.org/wiki/Simulink>
- 8) http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_simulation
- 9) http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_model
- 10) <http://en.wikipedia.org/wiki/Simulation>
- 11) http://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory
- 12) <http://en.wikipedia.org/wiki/Actuator>
- 13) http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_control
- 14) http://en.wikipedia.org/wiki/State_space_representation
- 15) http://en.wikipedia.org/wiki/Optimal_control
- 16) http://en.wikipedia.org/wiki/Linear-quadratic_regulator
- 17) <http://www.mathworks.com/help/control/ref/lqr.html>
- 18) http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/base-and-function-workspaces.html
- 19) http://en.wikipedia.org/wiki/Hardware-in-the-loop_simulation
- 20) http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_control_unit
- 21) http://en.wikipedia.org/wiki/Automotive_electronics
- 22) http://www.eeweb.com/blog/tom_lee/why-cant-johnny-design-part-3-doing-the-math
- 23) http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CF%81%CF%84%CE%B7%CF%83%CE%B7_%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%AE%CF%84%CE%BF%CF%85
- 24) http://en.wikipedia.org/wiki/Active_suspension
- 25) <http://iceal.wikidot.com/energitikes-anartiseis>

- 26) <http://www.edmunds.com/car-technology/suspension-iii-active-suspension-systems.html>
- 27) http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/active_suspension.html
- 28) [http://en.wikipedia.org/wiki/Passivity_\(engineering\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Passivity_(engineering))
- 29) <http://en.wikipedia.org/wiki/Damping>
- 30) http://en.wikipedia.org/wiki/Shock_absorber
- 31) <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>
- 32) http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_handling
- 33) <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CF%8D%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B7>
- 34) <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%B4%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%B7>
- 35) http://www.autonomie.net/references/model_based_design_defs_24.html
- 36) <http://www.thesis-dynaware.com/en/products/vedyna.html>