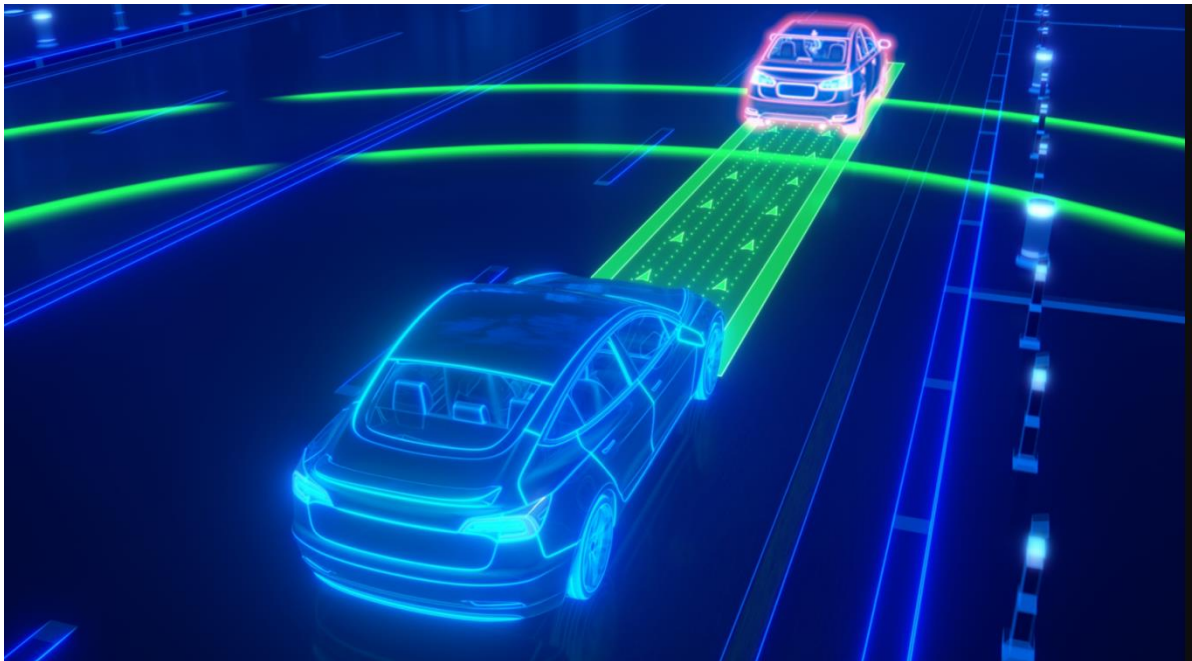




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

Χρήση προβλεπτικού ελεγκτή (NMPC) για τον έλεγχο κίνησης αυτόνομου οχήματος



ΒΑΛΕΡΙΑ-ΓΕΩΡΓΙΑ ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΠΕΤΡΟΣ ΣΤΕΦΑΝΕΑΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π., ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΥΛΟΧΕΡΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.,
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Αθήνα, Ιούνιος 2021

Βαλέρια-Γεωργία Χατζοπούλου © (2021) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Πέτρο Στεφανέα, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και για την εξαιρετική συνεργασία μας, καθώς και τον κ. Δημήτριο Κουλοχέρη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την υποστήριξή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της, αλλά και για τη βοήθειά του ως υπεύθυνος στην ομάδα PROM RACING, όπου μου δόθηκε η δυνατότητα για γνώσεις και ανεκτίμητες εμπειρίες.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Χρυσάφινο, μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τις γνώσεις που μου προσέφερε καθ' όλη την πορεία των σπουδών μου και την κ. Λαμπροπούλου, Διευθύντρια του Τομέα Μαθηματικών της σχολής μου για την πολύτιμη γνώση και την έμπνευση που μου έδωσε.

Επιπλέον ευχαριστίες στη Δρ. Κλειώ Βόσσου, για τις συμβουλές της και τις εύστοχες παρατηρήσεις της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούνιος 2021
Χατζοπούλου Βαλέρια-Γεωργία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά στις τεχνολογίες και μεθόδους για τον έλεγχο της κίνησης των αυτόνομων οχημάτων. Η τεχνολογία για τα αυτόνομα οχήματα εξελίσσεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες, παράλληλα με ένα σύνολο επιστημών και τεχνολογιών, όπως είναι οι αισθητήρες, οι αυτόνομες μετρητικές διατάξεις, και τα δίκτυα μετάδοσης δεδομένων.

Το πρόβλημα ελέγχου της κίνησής τους με γνώμονα το περιβάλλον τους, συνιστά ένα αμιγές πρόβλημα αυτομάτου ελέγχου. Ο αυτόματος έλεγχος έχει αρκετές δεκαετίες ανάπτυξης και εφαρμογών. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται εκκινούν από τα κλασικά Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου (ΣΑΕ), εκτεινόμενες στις σύγχρονες τεχνικές ελέγχου, με περιγραφή στον χώρο κατάστασης. Το πρόβλημα της κατευθυνόμενης κίνησης ενός οχήματος, απαιτεί τη δημιουργία ενός ακριβούς μαθηματικού μοντέλου των εξισώσεων του οχήματος, το οποίο καθορίζεται από ένα σύνολο σημαντικών παραμέτρων. Η επίλυση του κάνει χρήση των μοντέρνων τεχνικών ΣΑΕ με τεχνικές βελτιστοποίησης και προβλεπτικών ελεγκτών.

Οι ελεγκτές τύπου Model Predictive Control, βασίζονται σε συναρτήσεις ελαχιστοποίησης κόστους και εφαρμόζονται τόσο σε γραμμικά όσο και σε μη γραμμικά προβλήματα.

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, περιγράφεται ένα αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο στο χώρο κατάστασης για το όχημα, συνδυάζοντας ένα μη γραμμικό ελεγκτή πρόβλεψης για την κίνηση του (NMPC). Η μοντελοποίηση, καθώς και οι αναλυτικοί αριθμητικοί υπολογισμοί κάνουν χρήση του περιβάλλοντος μαθηματικής επεξεργασίας Matlab®.

Στα κεφάλαια της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζεται η απαιτούμενη πληροφορία για την τοποθέτηση και τη μαθηματική επίλυση του προβλήματος κίνησης. Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 1 γίνεται η εισαγωγή στο πρόβλημα κίνησης των οχημάτων με δυνατότητες αυτόνομης οδήγησης. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες των μετρητικών διατάξεων για τον εντοπισμό του οχήματος στο χώρο - χρόνο καθώς και οι μαθηματικές τεχνικές για την εφαρμογή του απαιτούμενου ελέγχου. Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει το αναλυτικό μοντέλο μαθηματικής περιγραφής του οχήματος, καθώς και τη μοντελοποίηση του στο μαθηματικό περιβάλλον προσομοίωσης Matlab®. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του MPC. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων από καθορισμένες τροχιές μελέτης που αφορούν την παρακολούθηση τροχιάς και την αποφυγή εμποδίων, καθώς και την αναλυτική παραγωγή των σημάτων ελέγχου του μοντέλου του οχήματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον καθορισμό των ειδικών χαρακτηριστικών του MPC - ελεγκτή που αφορά στον καθορισμό των οριζόντων δράσης (Prediction) και ελέγχου (Control). Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη μελέτη και την εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου του οχήματος με χρήση του MPC - ελεγκτή. Παρουσιάζονται τα ανοικτά ερευνητικά θέματα καθώς και η μελλοντική επίδραση της εξέλιξης των τεχνολογιών.

Αυτό που γίνεται εμφανές από τη μελέτη είναι ότι το πρόβλημα της πλοήγησης ενός οχήματος αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο αποτελεί αντικείμενο σημαντικής έρευνας σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας και των επιστημών.

Λέξεις κλειδιά:

Αυτόνομα οχήματα, πλοήγηση, δίκτυα αισθητήρων, μοντέλο οχήματος, Προβλεπτικός Ελεγκτής, MPC, μη γραμμικά συστήματα, κριτήριο κόστους, ορίζοντας ελέγχου, ορίζοντας πρόβλεψης

ABSTRACT

This Diploma Thesis concerns autonomous vehicles as well as the technologies and methods for controlling their navigation. Technology for autonomous vehicles has evolved rapidly in recent decades, along with a host of sciences and technologies, such as sensors, autonomous telemetry devices, and data transmission networks.

The vehicle guidance problem is a purely automatic control problem. Automatic control has several decades of development and applications with techniques starting from the classic control, extending to modern control techniques with mathematical descriptions in state space. The problem of vehicle navigation requires the creation of an accurate mathematical model of the vehicle equations, which is determined by a set of important parameters. Its solution makes use of modern control referred onto optimization and prediction techniques.

Model Predictive Control is based on cost minimization functions and applies to both linear and nonlinear problems. In current thesis, a detailed mathematical non-linear model in state space representation for the moving vehicle is described, combining a non-linear MPC controller for its navigation. Modeling as well as detailed arithmetic calculations make use of the Matlab ® mathematical processing environment.

Problem positioning and mathematical solution of vehicle navigation problem are presented in the chapters of thesis. In more detail, Chapter 1 presents an introduction to the problem of vehicles with autonomous driving capabilities. Chapter 2 presents the technologies of metering devices for locating the vehicle in space-time as well as the mathematical techniques for the application of the required control. Chapter 3 presents the detailed mathematical description non-linear model of the moving vehicle, as well as its modeling in the Matlab ® mathematical simulation environment. The operation of the Non-Linear MPC is also analyzed. Chapter 4 presents the simulation results from defined study trajectories concerning track tracking and obstacle avoidance, as well as the analytical output of the vehicle model control signals. Particular emphasis is placed on defining the specific characteristics of the MPC – controller that defines Prediction and Control Horizons. Finally, Chapter 5 presents the conclusions from the study and application of the control technique of vehicle navigation using an MPC - controller. Open research topics are presented as well as the future impact of technology development.

What becomes clear from this thesis is that the problem of vehicle navigation is a complex problem, which is the subject of significant research in various fields of technology and science.

Key words

Autonomous vehicles, navigation, sensor networks and telemetry measurement collection, vehicle model, MPC controller, non-linear systems, simulation process, cost function, control horizon, prediction horizon

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	- 5 -
Abstract	- 7 -
Κατάλογος Σχημάτων	- 13 -
Κατάλογος πινάκων	- 17 -
1 Εισαγωγή	- 19 -
1.1 Στόχος διπλωματικής εργασίας.....	- 19 -
1.2 Δομή.....	- 20 -
2 Αυτόνομη Οδήγηση.....	- 21 -
2.1 Επίπεδα αυτονομίας οχήματος.....	- 22 -
2.2 Συστήματα ασφαλείας που χρησιμοποιούνται στα οχήματα.....	- 24 -
2.2.1 Σύστημα Αντιμπλοκαρίσματος των Τροχών Anti Blocking System (ABS).....	- 25 -
2.2.2 Αυτόματος πιλότος (Cruise control).....	- 25 -
2.2.3 Adaptive Cruise Control (ACC)	- 25 -
2.2.4 Σύστημα Ελέγχου Πρόσφυσης Anti-slip Regulation	- 26 -
2.2.5 Brake Assist	- 26 -
2.3 Αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα οχήματα.....	- 26 -
2.3.1 Συστήματα Laser Illuminated Detection and Ranging (LIDAR)	- 26 -
2.3.2 Radar- Radio Detection and Ranging	- 27 -
2.3.3 Αισθητήρες Υπερήχων-Ultrasonic sensors	- 27 -
2.3.4 Σύστημα Εντοπισμού θέσης (Global Positioning System – GPS)	- 27 -
2.3.5 Κάμερες	- 28 -
2.4 Τεχνολογίες επικοινωνίας των αυτονομων οχημάτων	- 29 -
2.4.1 Διασυνδεση	- 29 -
2.4.2 Η τεχνολογία V2V.....	- 30 -
2.4.3 Η τεχνολογία V2I.....	- 30 -
2.4.4 Η έννοια του V2X.....	- 30 -
2.5 Εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων	- 31 -
2.5.1 Στρατιωτικές εφαρμογές.....	- 31 -
2.5.2 Γεωλογικές εφαρμογές.....	- 32 -
2.5.3 Διαστημικές εφαρμογές	- 32 -
2.5.4 Έκτακτες ανάγκες.....	- 33 -
2.5.5 Οχήματα δημοσίας κυκλοφορίας	- 33 -
2.5.6 Βιομηχανικές εφαρμογές	- 34 -
2.5.7 Εφαρμογές διανομών	- 34 -
2.6 Τεχνικές Ελέγχου Κινούμενων Οχημάτων	- 34 -
2.6.1 Έλεγχος ανοικτού βρόχου.....	- 36 -

2.6.2	Έλεγχος κλειστού βρόχου.....	- 36 -
2.6.3	Ελεγκτής proportional–integral–derivative (PID).....	- 37 -
2.6.4	Τεχνικές Βελτίστου Ελέγχου (Optimal Control).....	- 42 -
2.6.5	Προβλεπτικοί ελεγκτές (Model predictive control - MPC).....	- 43 -
2.7	Μοντέλα Οχημάτων και ελαστικων.....	- 47 -
2.7.1	Quarter car model.....	- 47 -
2.7.2	Half Car Model.....	- 48 -
2.7.3	Full Car Model.....	- 50 -
2.7.4	Μοντελοποίηση ελαστικων κατά racejka.....	- 51 -
3	Υλοποίηση προβλεπτικού ελεγκτή (MPC) σε αυτόνομο όχημα.....	- 53 -
3.1	Εξισώσεις κίνησης.....	- 53 -
3.2	Περιγραφή Κώδικα.....	- 55 -
3.2.1	Τμήμα Παραμέτρων Μοντέλου – Parameters Section.....	- 57 -
3.2.2	Τμήμα Επιλογής Τροχιάς Παρακολούθησης – Target Track.....	- 59 -
3.2.3	Τμήμα Αποφυγής Εμποδίων – Block Avoidance Section.....	- 63 -
3.2.4	Τμήμα Χρονικής Αναδρομικής Λειτουργίας του Μοντέλου	- 65 -
3.2.5	Τμήμα υλοποίησης Μη Γραμμικού Προβλεπτικού ελεγκτή (N-MPC).....	- 68 -
3.2.6	Τμήμα Υπολογισμού και Εκτίμησης Σφαλμάτων Τροχιάς – Track Error Section ..	- 69 -
3.2.7	Τμήμα Γραφικών και Αριθμητικών Απεικονίσεων Μεταβλητών.....	- 69 -
3.2.8	Προσομοίωση δυναμικής συμπεριφοράς του Οχήματος – vdyna.m.....	- 70 -
3.2.9	Συνάρτηση κόστους του MPC (cost.m).....	- 72 -
3.2.10	Η επίδραση των περιορισμών στο μοντέλο.....	- 73 -
4	Αποτελέσματα.....	- 75 -
4.1	Η επίδραση των Οριζόντων Ελέγχου και Δράσης στη λειτουργία του MPC - ελεγκτή..	- 75 -
4.2	Σενάρια Αποφυγής απόκλισης από τη λωρίδα	- 80 -
	Σενάριο #1 (Τροχιά Γραμμικών Τμημάτων):	- 82 -
	Σενάριο #2 (Τροχιά U-Turn):	- 87 -
	Σενάριο #3 (Τροχιά Fish Hook):.....	- 92 -
	Σενάριο #4 (Τροχιά τύπου S):.....	- 97 -
4.3	Σενάρια αποφυγής εμποδίων σε Τροχιά Γραμμικών Τμημάτων	- 103 -
	Σενάριο #1: (Αποφυγή Απλού Εμποδίου):	- 103 -
	Σενάριο #2: (Αποφυγή Πολλαπλών Εμποδίων- Ευθεία Τροχιά)	- 109 -
	Σενάριο #3:(Αποφυγή Πολλαπλών Εμποδίων- Τροχιά Γραμμικών τμημάτων):.....	- 115 -
5	Συμπεράσματα	- 121 -
5.1	Γενικά Συμπεράσματα.....	- 121 -

5.2	Συμπεράσματα σχετικά με τον έλεγχο διατήρησης τροχιάς.....	- 122 -
5.3	Συμπεράσματα σχετικά με την αποφυγή εμποδίων.....	- 123 -
5.4	Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα.....	- 123 -
Παραρτήμα-Κώδικας.....		- 127 -
5.4.1	A-1 Εξισώσεις Μοντέλου Οχήματος.....	- 127 -
5.5	A-2 Ελεγκτής MPC.....	- 130 -
5.6	A-3 Συνάρτηση Κόστους.....	- 140 -
Βιβλιογραφία - Αναφορές.....		- 141 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Αυτόματος μηχανισμός ανοίγματος-Κλεισίματος θυρών ναού[2]	22 -
Σχήμα 2-2: Ταξινόμηση με βάση τα επίπεδα αυτονομίας	23 -
Σχήμα 2-3: Παράγοντες αλληλεπίδρασης οχήματος - περιβάλλοντος	25 -
Σχήμα 2-4: Σύστημα LIDAR.....	26 -
Σχήμα 2-5: Χάρτης Υψηλής Ακρίβειας με δεδομένα πραγματικού χρόνου	28 -
Σχήμα 2-6: Κατανομή των τεχνολογιών και θέσεις επί του οχήματος.....	29 -
Σχήμα 2-7: Πρωτόκολλο επικοινωνίας V2X.....	31 -
Σχήμα 2-8: Στρατιωτικό όχημα αυτόνομης λειτουργίας.....	32 -
Σχήμα 2-9: Αυτόνομο διαστημικό όχημα	33 -
Σχήμα 2-10: Το αυτόνομο όχημα στην πόλη των Τρικάλων	34 -
Σχήμα 2-11: Σύστημα και αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον	35 -
Σχήμα 2-12: Σύστημα Ανοικτού Βρόχου	36 -
Σχήμα 2-13: Τυπικό σύστημα κλειστού βρόχου	37 -
Σχήμα 2-14: Εφαρμογή ενός PID ελεγκτή για τον έλεγχο ενός συστήματος (process)	38 -
Σχήμα 2-15: Χρήση ελεγκτή στον κύριο κλάδο λειτουργίας του συστήματος	38 -
Σχήμα 2-16 Απόκριση εξόδου συστήματος με χρήση P – ελεγκτή.....	40 -
Σχήμα 2-17: Απόκριση εξόδου συστήματος με χρήση PD – ελεγκτή.....	40 -
Σχήμα 2-18: Απόκριση εξόδου συστήματος με χρήση PI – ελεγκτή.....	41 -
Σχήμα 2-19: Απόκριση εξόδου συστήματος με χρήση PID – ελεγκτή.....	41 -
Σχήμα 2-20: Μοντέλο ελέγχου με χρήση Προβλέπτη – Ελεγκτή.....	44 -
Σχήμα 2-21: Εσωτερική δομή ενός MPC - ελεγκτή.....	45 -
Σχήμα 2-22: MPC – ελεγκτής και Χρονικός Ορίζοντας Πρόβλεψης.....	46 -
Σχήμα 2-23: : Μεταβολή των σημάτων ελέγχου με βάση την πρόβλεψη(https://www.researchgate.net/publication/315787201_Probleptikos_Elenchos_Mi_a_kathemerine_arche_pou_epharmozetai_ste_biomechania)	46 -
Σχήμα 2-24: Quarter Car Model	48 -
Σχήμα 2-25: Σχηματική αναπαράσταση του Front – rear μοντέλου.....	49 -
Σχήμα 2-26: Σχηματική αναπαράσταση Right – Left μοντέλου	50 -
Σχήμα 2-27: Σχηματική αναπαράσταση του Full Car Μοντέλου	51 -
Σχήμα 3-1: Modeling notation[30].....	55 -
Σχήμα 3-2: flow chart	57 -
Σχήμα 3-3: Παρουσίαση Τροχιάς Γραμμικών Τμημάτων.....	60 -
Σχήμα 3-4: Παρουσίαση Τροχιάς U-Turn.....	61 -
Σχήμα 3-5: Παρουσίαση Τροχιάς Fish Hook.....	62 -
Σχήμα 3-6: Παρουσίαση Τροχιάς Τύπου S.....	63 -
Σχήμα 3-7: Αποφυγή εμποδίων στην τροχιά Γραμμικών Τμημάτων.....	64 -

Σχήμα 3-8: Ενημέρωση προόδου εκτέλεσης κατά την προσομοίωση.....	- 67 -
Σχήμα 3-9: Παράθυρο Αποτελεσμάτων εκτέλεσης σεναρίου	- 69 -
Σχήμα 4-33: Κοινό διάγραμμα τροχιάς Γραμμικών Τμημάτων και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=40$)	- 76 -
Σχήμα 4-34: Κοινό διάγραμμα τροχιάς U-Turn και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=40$).....	- 76 -
Σχήμα 4-35: Κοινό διάγραμμα τροχιάς fish hook και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=40$).....	- 77 -
Σχήμα 4-36: Κοινό διάγραμμα τροχιάς τύπου S και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=40$).....	- 77 -
Σχημα 4-37: Κοινό διάγραμμα τροχιάς Γραμμικών Τμημάτων και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=24$)	- 78 -
Σχήμα 4-38: Κοινό διάγραμμα τροχιάς U-Turn και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=24$).....	- 79 -
Σχήμα 4-39: Κοινό διάγραμμα τροχιάς fish hook και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=24$).....	- 79 -
Σχήμα 4-40: Κοινό διάγραμμα τροχιάς τύπου S και πραγματικής τροχιάς οχήματος για τις νέες τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και πρόβλεψης ($H_c=20$ και $H_p=24$).....	- 80 -
Σχήμα 4-1: Τροχιά γραμμικών τμημάτων	- 82 -
Σχήμα 4-2: Κοινό διάγραμμα τροχιάς Γραμμικών Τμημάτων και τροχιάς οχήματος.....	- 83 -
Σχήμα 4-3: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα	- 83 -
Σχήμα 4-4: Σήμα Είσοδου u_1 – steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	- 84 -
Σχήμα 4-5: Σήμα Είσοδου u_1 – steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	- 85 -
Σχήμα 4-6: Σήμα εισόδου u_3 – AccelerationForce συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης-	85
-	
Σχήμα 4-7: Ταχύτητα V_x του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	- 86 -
Σχήμα 4-8: Ταχύτητα V_y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	- 87 -
Σχήμα 4-9: Τροχιά U-Turn.....	- 88 -
Σχήμα 4-10: Κοινό διάγραμμα τροχιάς U-Turn και τροχιάς του οχήματος.....	- 88 -
Σχήμα 4-11: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα	- 89 -
Σχήμα 4-12: Σήμα εισόδου u_1 – steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	- 89 -
Σχήμα 4-13: Σήμα εισόδου u_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης..	- 90 -
Σχήμα 4-14: Σήμα εισόδου u_3 – Acceleration Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης....	- 91 -
Σχήμα 4-15: Ταχύτητα V_x οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	- 91 -
Σχήμα 4-16: Ταχύτητα V_y οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	- 92 -
Σχήμα 4-17: Τροχιά Fish Hook.....	- 93 -
Σχήμα 4-18: Διάγραμμα τροχιάς Fish Hook και τροχιάς του οχήματος	- 93 -
Σχήμα 4-19: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα	- 94 -
Σχήμα 4-20: Σήμα εισόδου u_1 – steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	- 94 -
Σχήμα 4-21: Σήμα εισόδου u_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης..	- 95 -

Σχήμα 4-22: Σήμα εισόδου u_3 – AccelerationForce συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	96 -
Σχήμα 4-23: Ταχύτητα V_x του οχήματος, συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	96 -
Σχήμα 4-24: Ταχύτητα V_y του οχήματος, συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	97 -
Σχήμα 4-25: Τροχιά τύπου S.....	98 -
Σχήμα 4-26: Κοινό διάγραμμα τροχιάς τύπου S και τροχιάς οχήματος.....	98 -
Σχήμα 4-27: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα.....	99 -
Σχήμα 4-28: Σήμα εισόδου u_1 – steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	100 -
Σχήμα 4-29: Σήμα εισόδου u_2 – BreakingForce συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης -	100 -
Σχήμα 4-30: Σήμα εισόδου u_3 – AccelerationForce συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	101 -
Σχήμα 4-31: Ταχύτητα V_x οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	102 -
Σχήμα 4-32: Ταχύτητα V_y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	102 -
Σχήμα 4-41: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα...	105 -
Σχήμα 4-42: Σήμα εισόδου U_1 – steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	106 -
Σχήμα 4-43: Σήμα εισόδου U_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης-	106 -
-	
Σχήμα 4-44: Σήμα εισόδου U_3 – Acceleration Force συναρτήσει της.....	107 -
Σχήμα 4-45: Ταχύτητα V_x του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	108 -
Σχήμα 4-46: Ταχύτητα V_y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης	108 -
Σχήμα 4-47: Προτεινόμενη τροχιά για την αποφυγή πολλαπλών εμποδίων	109 -
Σχήμα 4-48: Αρχική τροχιά– Τροχιά κίνησης του οχήματος	110 -
Σχήμα 4-49: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα...	110 -
Σχήμα 4-50: Σήμα εισόδου U_1 – Steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	111 -
Σχήμα 4-51: Σήμα εισόδου U_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης-	112 -
-	
Σχήμα 4-52: Σήμα εισόδου U_3 – Acceleration Force συναρτήσει της.....	113 -
Σχήμα 4-53: Ταχύτητα V_x του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	114 -
Σχήμα 4-54: Ταχύτητα V_y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης	114 -
4-55: Προτεινόμενη τροχιά για την αποφυγή πολλαπλών εμποδίων	115 -
4-56: Αρχική τροχιά– Τροχιά κίνησης του οχήματος	116 -
4-57: Σφάλμα τροχιάς συναρτήσει του διανυόμενου διαστήματος από το όχημα.....	116 -
4-58: Σήμα εισόδου U_1 – Steering συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	117 -
4-59: Σήμα εισόδου U_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης.....	118 -
4-60: Σήμα εισόδου U_3 – Acceleration Force συναρτήσει της	118 -
4-61: Ταχύτητα V_x του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης	119 -
4-62: Ταχύτητα V_y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης.....	120 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Επίδραση των κερδών του PID ελεγκτή σε μεταβατικά χαρακτηριστικά και το μόνιμο σφάλμα των σημάτων εξόδου ενός συστήματος	- 40 -
Πίνακας 3-1: Παρουσίαση των παραμέτρων του μοντέλου οχήματος	- 58 -
Πίνακας 3-2: Παράμετροι του μοντέλου οχήματος[30].....	- 71 -
Πίνακας 3-3: Περιορισμοί (Constraints) στη λειτουργία του φυσικού μοντέλου οχήματος για τη βελτιστοποίηση[30].....	- 74 -
Πίνακας 4-1: Παράμετροι Καθορισμού για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων για το συνολικό μοντέλο Οχήματος – MPC ελεγκτή.....	- 81 -
Πίνακας 5-1: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Απόστασης για κάθε τύπο Τροχιάς.....	- 122 -

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια πρώτη εικόνα της παρούσας Διπλωματικής. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται το πρόβλημα του ελέγχου των κινούμενων οχημάτων, καθώς αποτελεί σημείο αναφοράς για την εξέλιξη της Εργασίας αυτής. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο στόχος και η δομή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Στις μέρες μας, όπου η χρήση των αυτοκινήτων στις μεγαλουπόλεις είναι εκτεταμένη, καθημερινά εμφανίζονται προβλήματα, όπως ατυχήματα, παρακώλυση της κυκλοφορίας και αυξημένη ρύπανση. Τα τροχαία ατυχήματα κάθε χρόνο αποβαίνουν μοιραία για πολλούς πολίτες. Συγκεκριμένα στην Ευρώπη, βάση στατιστικών, 22.800 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους μέσα στο 2019 και τραυματίστηκαν 120.000[57]. Επίσης, το οικονομικό κόστος των τροχαίων είναι ένα πρόβλημα για την πολιτεία, το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί. Για την μείωση αυτών των προβλημάτων, ως λύση προτείνονται τα αυτόνομα οχήματα. Παγκοσμίως γίνονται έρευνες προκειμένου να εξελιχθούν οχήματα ικανά να κινούνται χωρίς την συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα. Η έκρηξη των τεχνολογιών που σχετίζονται με την αλματώδη εξέλιξη της πληροφορικής και της ρομποτικής, έχει δώσει την ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων χερσαίων, εναέριων, θαλάσσιων, υποβρυχίων καθώς και διαστημικών. Τα οχήματα αυτά διαθέτουν τεχνολογία η οποία τους επιτρέπει να κινούνται χωρίς οδηγό, οπότε και χωρίς την πιθανότητα ανθρώπινου σφάλματος. Βασικός εξοπλισμός των οχημάτων αυτών είναι ένα σύνολο αισθητήρων, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την κατανόηση του περιβάλλοντος γύρω από το όχημα κάθε στιγμή, με σκοπό την πλοήγησή αυτού με ελάχιστη ή ακόμα και χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Τα τελευταία χρόνια τα αυτόνομα οχήματα έχουν αρχίσει να κερδίζουν έδαφος στις αγορές, λόγω της διευκόλυνσης που προσφέρουν στους οδηγούς, αλλά και λόγω της μεγαλύτερης ασφάλειας που παρέχουν, καθώς το 98% των τροχαίων ατυχημάτων οφείλεται σε ανθρώπινο σφάλμα. Τα παραπάνω βέβαια θα επιτευχθούν στον μέγιστο δυνατό βαθμό εφόσον δεν υπάρχουν αστοχίες στο λογισμικό των αυτόνομων οχημάτων.

Για την επίτευξη της αυτόνομης λειτουργίας, ένα αυτόνομο όχημα θα πρέπει να μπορεί να κινείται, να αντιλαμβάνεται το περιβάλλοντα χώρο και να προσαρμόζει την κίνηση του σε αυτό. Προκειμένου να κινηθεί ένα αυτόνομο όχημα με ασφάλεια, θα πρέπει να μπορεί να λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες από το περιβάλλον του, να τις επεξεργάζεται κατάλληλα και να αλληλεπιδρά με αυτό, ενώ παράλληλα, θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και χωρίς να θέτει τον εαυτό του ή το περιβάλλον του σε κίνδυνο.

1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η μελέτη και ανάπτυξη τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την ορθή λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων είναι καίριας σημασίας. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η υλοποίηση ενός προβλεπτικού ελεγκτή (Model Predictive Control-MPC) σε περιβάλλον Matlab, ο οποίος ελέγχει τη γωνία στροφής του τιμονιού και τις δυνάμεις πέδησης και επιτάχυνσης, με στόχο την διατήρηση της πορείας του οχήματος εντός

λωρίδας και την αποφυγή εμποδίων. Ο προβλεπτικός ελεγκτής, για την πραγματοποίηση των προβλέψεων αξιοποιεί ένα μη-γραμμικό μοντέλο κίνησης του οχήματος. Οι γραμμικότητες αυτές εντοπίζονται σε γινόμενα των μεταβλητών, εκθετικά και δυνάμεις αυτών, όπως θα αναφερθεί και στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Η διαδικασία περιλαμβάνει την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, όπου κάθε χρονική στιγμή ελαχιστοποιείται μια συνάρτηση κόστους, παράγοντας τα επιθυμητά σήματα για τον επιτυχή έλεγχο του οχήματος.

1.2 ΔΟΜΗ

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο, που αποτελεί την εισαγωγή, παρουσιάζεται το πλαίσιο, ο στόχος και η δομή της Διπλωματικής Εργασίας.

Το δεύτερο Κεφάλαιο περιλαμβάνει στοιχεία για τα αυτόνομα οχήματα και τις τεχνολογίες που αξιοποιούνται από αυτά. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται προκειμένου ένα αυτόνομο όχημα να γνωρίζει την θέση του και το περιβάλλον του. Επιπροσθέτως, αναλύονται οι συνηθέστερες μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα οχήματα. Οι μέθοδοι που αναφέρονται είναι PID ελεγκτές, MPC ελεγκτές και το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου. Τέλος, αναφέρονται τα υπάρχοντα μοντέλα οχημάτων που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κίνηση ενός οχήματος.

Στο τρίτο Κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση του προβλεπτικού ελεγκτή και περιγράφεται ο ελεγκτής που υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab®.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Διπλωματικής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω κεφάλαιο χωρίζεται με δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα ο ελεγκτής εφαρμόστηκε σε τέσσερα σενάρια διατήρησης επιθυμητής τροχιάς και στο δεύτερο τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων αποφυγής απλού και πολλαπλών εμποδίων από το όχημα. Επίσης, παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του ελεγκτή.

Στο πέμπτο και τελευταίο Κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από σενάρια που εξετάστηκαν, αλλά και γενικότερα συμπεράσματα, καθώς και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΟΔΗΓΗΣΗ

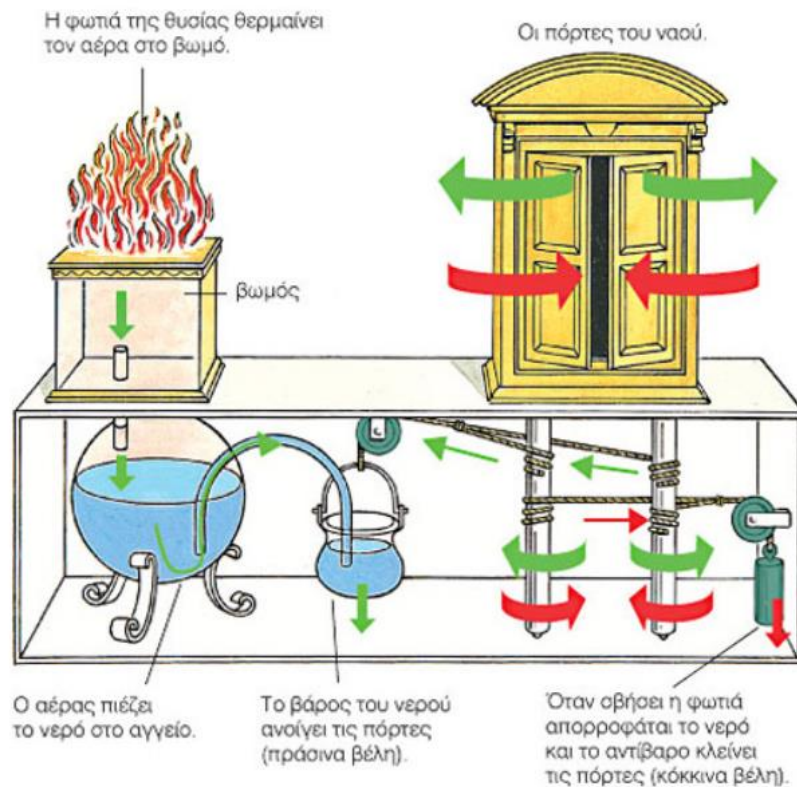
Ως αυτόνομο χαρακτηρίζεται ένα όχημα που έχει την ικανότητα να ανιχνεύει και να αντιλαμβάνεται το γνωστό και άγνωστο εξωτερικό περιβάλλον του και να πλοηγείται με ελάχιστη ή χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση[1]. Τα αυτόνομα οχήματα διαθέτοντας προηγμένες τεχνολογίες, προσαρμόζουν τις κινήσεις τους και επιλέγουν τις βέλτιστες διαδρομές, εντοπίζοντας εγκαίρως σταθερά αλλά και κινούμενα εμπόδια. Στα πλήρως αυτόνομα οχήματα οι άνθρωποι είναι απλώς επιβάτες και μπορούν, μόνο, να επιλέξουν τον προορισμό τους ή να ζητήσουν από το όχημα να σταματήσει.

Για τον ορισμό της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί όροι όπως «automated cars» και «self-driving cars». Η National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) του Υπουργείου Μεταφορών των Ηνωμένων Πολιτειών υιοθετεί τον όρο «automated vehicles» (U.S. Department of Transportation, 2016). Σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιείται ο όρος αυτόνομα οχήματα (autonomous vehicles), ο οποίος είναι ενδεδειγμένος στην επιστημονική και μη βιβλιογραφία.

Τα αυτόνομα οχήματα διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα με τον χώρο δραστηριοποίησής τους, σε αυτόνομα οχήματα:

- εδάφους (Autonomous Ground Vehicles ή AGVs),
- νερού (Autonomous Water/Underwater Vehicles ή AWV/AUV) και
- αέρα (Autonomous Aerial Vehicles ή AAVs).

Τα αυτόνομα οχήματα επέβαλλαν την παρουσία τους τα τελευταία χρόνια, αν και η πρώτη φιλόδοξη απόπειρα χρονολογείται πολύ νωρίτερα. Η σύλληψη της ιδέας του αυτοματισμού εισήχθη από τα αρχαία κιόλας χρόνια. Οι αρχαίοι Έλληνες οραματίστηκαν πρώτοι την Αυτονομία. Ο Όμηρος κάνει αναφορά για μεταλλικά λεβέτια, τα οποία μετακινούνταν αυτοκινούμενα ανάμεσα στους θεούς. Γνωστός είναι ο μύθος του Τάλω λόγω των εξαιρετικών αυτόνομων επιδόσεων του, μιας κατασκευής του Ηφαίστου. Ο Ήρωνας ο Αλεξανδρεύς τον 1^ο αιώνα π.Χ. κατασκεύασε το πρώτο αυτόνομο τρίκυκλο όχημα. Στη θεωρία του αυτοματισμού συνεισέφερε με το σύγγραμμα «Αυτοματοποιητική». Ένα από τα γνωστά συστήματα αυτομάτου ελέγχου είναι ο μηχανισμός που επινόησε ο Ήρωνας ο Αλεξανδρινός για το αυτόματο άνοιγμα των θυρών ενός αρχαίου ναού (Σχήμα 2-1). [2]



ΣΧΗΜΑ 2-1: ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ-ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ ΘΥΡΩΝ ΝΑΟΥ[2]

Από το 1920 παρουσιάζονται οι πρώτες αναφορές στην αυτοματοποίηση των οχημάτων, με προσπάθειες για τη δημιουργία αυτοκινήτων που ελέγχονται με τηλεχειρισμό, οι οποίες οδήγησαν στη διάθεση σημερινών μοντέλων αυτόνομων οχημάτων[3]. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 πρωτοεμφανίζονται τα αυτόνομα οχήματα με το Navlab του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon[4], το ALV (1984), το ρομποτικό βαν της Mercedes-Benz, το Prometheus Project και το Bundeswehr του Πανεπιστημίου του Μονάχου (1986)[5]. Στο εξής αυτοκινητοβιομηχανίες και ερευνητικά κέντρα, αλλά και κολοσσοί τεχνολογικών εταιρειών, επενδύουν και εργάζονται συστηματικά για την επίτευξη αυτόνομης αυτοκίνησης, όπως: η Mercedes-Benz, η General Motors, η Continental Automotive Systems, η Bosch, η Nissan, η Toyota, η Audi, η Volvo, η Google και η Tesla Motors. Σήμερα, διεξάγεται έρευνα και κατασκευάζονται μοντέλα οχημάτων με πολλές αυτονομίες, με σκοπό την εξέλιξη και καθιέρωση τους στους δρόμους. [6-12]

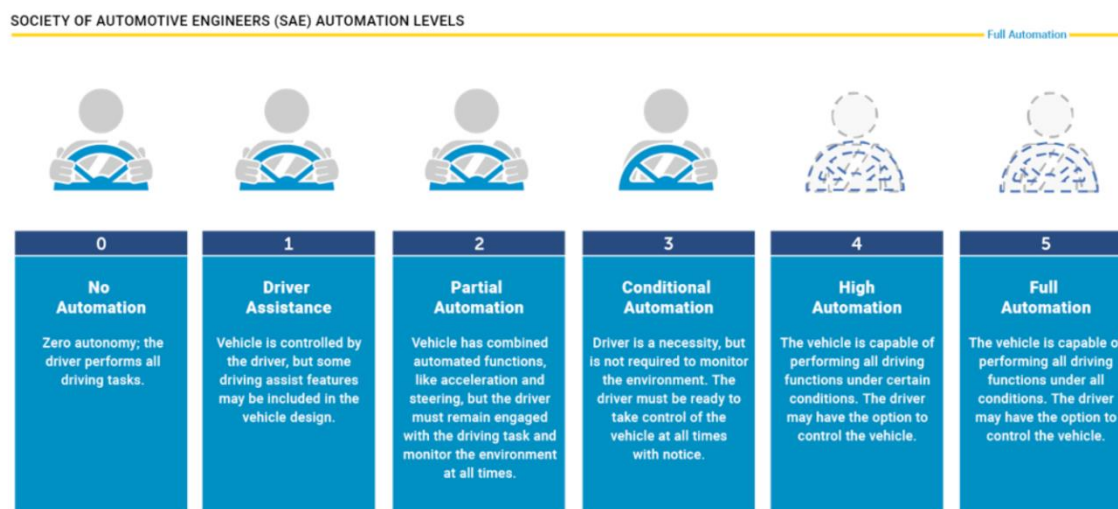
2.1 ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Οι αυτονομίες που μπορούν να παρέχουν τα οχήματα έχουν καταταχθεί σε 6 επίπεδα, σύμφωνα με την Εθνική Διοίκηση Κυκλοφοριακής Ασφάλειας Αυτοκινητοδρόμων της Αμερικής [National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)][13], όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2.

Τα επίπεδα αυτά διαμορφώνονται ως εξής:

Επίπεδο 0: Στο επίπεδο αυτό δεν παρέχεται καμία αυτονομία, καθώς ο οδηγός εκτελεί όλες τις απαιτούμενες ενέργειες προκειμένου να κινηθεί το όχημα. Ο οδηγός του οχήματος το ελέγχει πλήρως.

Επίπεδο 1: Στο επίπεδο αυτό απαντάται η υποβοηθούμενη οδήγηση. Υπάρχουν συγκεκριμένες βοήθειες προς τον οδηγό που παρέχονται από το όχημα όπως έλεγχος πορείας του οχήματος (cruise control), το οποίο ελέγχει την ταχύτητα επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας, ακόμη και αναλαμβάνοντας το φρενάρισμα συνήθως σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Ο οδηγός έχει μόνος του τον έλεγχο της οδήγησης, αφού είναι υποχρεωμένος να έχει πάντα τα χέρια του στο τιμόνι και τα πόδια του στα πεντάλ, καθώς και να προσέχει την κυκλοφορία καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού, όπως θα έκανε και στο επίπεδο 0.



ΣΧΗΜΑ 2-2: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ

Επίπεδο 2: Στο επίπεδο αυτό (επίπεδο μερικής αυτοματοποίησης), υπάρχει ημιαυτόνομη οδήγηση. Αυτό σημαίνει ότι τα οχήματα αυτά μπορούν να κινούνται σε ευθεία και να στρίβουν, καθώς και να μένουν στη λωρίδα τους, «διαβάζοντας» τη διαγράμμιση του δρόμου. Οι οδηγοί είναι απαραίτητο να ελέγχουν ανά πάσα στιγμή τις συνθήκες κυκλοφορίας στον δρόμο και να είναι σε θέση να αναλάβουν ξανά τον έλεγχο του οχήματος εάν αυτό χρειαστεί. Σε ορισμένες κυκλοφοριακές συνθήκες (όπως για παράδειγμα οδήγηση σε εθνική οδό) μπορούν να αποδεσμευθούν από την οδήγηση και να αφήσουν τα χέρια από το τιμόνι, αλλά με την προσοχή τους πάντα στον δρόμο.

Επίπεδο 3: Στο Επίπεδο 3 το όχημα παρουσιάζει υψηλή αυτονομία, καθώς τα λειτουργικά συστήματα ελέγχουν την προσπέραση, επιταχύνουν και φρενάρουν το όχημα. Ο οδηγός είναι απαραίτητο να βρίσκεται πίσω από το τιμόνι και στη θέση του οδηγού, αλλά πλέον δεν είναι απαραίτητο να παρακολουθεί το περιβάλλον.

Επίπεδο 4: Από το επίπεδο 4 και πάνω, τα οχήματα δύνανται να επικοινωνούν μεταξύ τους, αλλά και με το περιβάλλον, ανταλλάσσοντας πληροφορίες απαραίτητες για την ασφαλή πλοήγησή τους. Στο επίπεδο αυτό απαντάται υψηλή αυτοματοποίηση, καθώς το όχημα έχει περισσότερες δυνατότητες διαχείρισης ακόμη και σύνθετων καταστάσεων. Το όχημα, δηλαδή, έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει τις περισσότερες οδηγικές λειτουργίες αντί για τον οδηγό, αφού η κυκλοφορία ελέγχεται αυτόματα. Ο οδηγός δεν χρειάζεται να

έχει στραμμένη την προσοχή του στον δρόμο, μπορεί όμως να έχει έλεγχο κάποιων λειτουργιών όταν θελήσει.

Επίπεδο 5: Στο Επίπεδο 5, που είναι και το τελευταίο επίπεδο υπάρχει αυτοματοποίηση όλων των λειτουργιών του οχήματος κατορθώνοντας να κινείται άνευ ανθρώπινης παρουσίας. Ο οδηγός, εάν υπάρχει, δεν μπορεί να επέμβει στην οδήγηση του οχήματος. Τα οχήματα με αυτοματοποίηση του επιπέδου αυτού μεταφέρουν απλώς τους επιβάτες, ή ακόμη και προϊόντα, ανεξάρτητα από την συμμετοχή του ανθρωπίνου παράγοντα.

Οχήματα με αυτοματοποίηση μέχρι και επιπέδου 3 υπάρχουν, χρησιμοποιούνται σήμερα και κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος. Τα οχήματα επιπέδων 4 και 5 είναι η πρόκληση-στόχος των εταιριών αυτοκίνησης για ευρεία κυκλοφορία στο άμεσο μέλλον.

Παρακάτω παρατίθενται τα συστήματα που χρησιμοποιούνται προκειμένου να πλοηγηθεί ένα τέτοιο όχημα με ασφάλεια.

2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Η αυτονομία του οχήματος συνίσταται στη δυνατότητα των συστημάτων να αξιολογούν τις πληροφορίες του περιβάλλοντός του και να λαμβάνουν άμεσα τις αποτελεσματικότερες αποφάσεις εκτέλεσης χειρισμών. Στην αυτόνομη οδήγηση, ο στόχος είναι η κίνηση του οχήματος να διεξάγεται σύμφωνα με τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας, με εξασφαλισμένη την ασφάλεια του οχήματος και των επιβατών, αλλά και των διερχόμενων οχημάτων και των πεζών. Έτσι, το αυτόνομο όχημα εξετάζει το περιβάλλον, αναλύοντας όλα τα στοιχεία που συλλέγουν τα συστήματα και οι αισθητήρες του, διαβιβάζοντας εντολές στα συστήματα πλοήγησης. Οι εντολές αυτές, γίνονται αντιληπτές και ολοκληρώνονται ταχύτατα, τόσο από τα συστήματα πορείας, όσο και πέδησης του οχήματος. Το προηγμένο δίκτυο αισθητηρίων διατάξεων του αυτόνομου οχήματος είναι και αυτό που του επιτρέπει να αντιλαμβάνεται και να μεταδίδει τα δεδομένα του περιβάλλοντος, και η μονάδα ελέγχου του οχήματος τα επεξεργάζεται. Οι εταιρείες παραγωγής αυτόνομων οχημάτων ακολουθούν ένα σύνολο καθορισμένων απαιτήσεων που να ανταποκρίνονται στο σύστημα αυτονομίας και ως εκ τούτου, ένα προσδιορισμένο τύπο δεδομένων τα οποία θα πρέπει να λαμβάνει από το εξωτερικό περιβάλλον του οχήματος που προέρχονται από συγκεκριμένους τύπους:

- Από το ίδιο το όχημα, όπως είναι η γεωγραφική του θέση, κ.α.
- Από τον δρόμο, όπως το πλάτος του, κ.ά.
- Από τα εμπόδια του περιβάλλοντος, όπως είναι τυχαία εμπόδια κ.ά.
- Από το περιβάλλον, όπως σήματα της τροχαίας, κ.ά.



ΣΧΗΜΑ 2-3: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Οι πληροφορίες συσχετίζονται δημιουργώντας τον δυναμικό χάρτη του οχήματος(Σχήμα 2-3). Ο δυναμικός αυτός χάρτης μετασχηματίζεται σε συνάρτηση με τον χρόνο, έχει την ικανότητα να ενημερώνει ταυτοχρόνως τα άλλα οχήματα αποσκοπώντας στη ρύθμιση των κινήσεών τους [4]. Οι συνολικές πληροφορίες απευθύνονται στα κυκλώματα σχεδιασμού των κινήσεων που ορίζουν την πορεία που πρέπει να ακολουθήσει το όχημα. Στη συνέχεια, τα σχέδια αυτά θα αποσταλούν σε μορφή οδηγιών στα τελικά κυκλώματα λήψης αποφάσεων και έκδοσης εντολών χειρισμών προς τα όργανα ελέγχου πορείας του αυτόνομου οχήματος. Συγχρόνως, διασφαλίζεται η ακεραιότητα του οχήματος, των επιβατών, των κινουμένων οχημάτων ή πεζών.

Στα επόμενα χρόνια αναμένεται όλα τα οχήματα να έχουν δυνατότητα αυτόνομης οδήγησης. Κάποια συστήματα αυτονομίας που έχουν τα οχήματα των αρχικών επιπέδων και αποτελούν των ακρογωνιαίο λίθο για την εγκαθίδρυση περεταίρω αυτονομιών στα οχήματα. Τα βασικότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα είναι:

2.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΜΠΛΟΚΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ANTI BLOCKING SYSTEM (ABS)

Όταν παρουσιαστεί κίνδυνος, η τάση του οδηγού να πατήσει έντονα το πεντάλ του φρένου, αποτελεί συχνό φαινόμενο. Έτσι όμως, προκαλείται μπλοκάρισμα των τροχών, με αποτέλεσμα το όχημα να χάνει πρόσφυση. Σε αυτή την περίπτωση, επεμβαίνει το σύστημα ABS, εξασφαλίζοντας, τη διατήρηση της σταθερότητας και της ομαλής πορείας του κατά το φρενάρισμα στην ευθεία ή ακόμα και επάνω σε στροφή.

2.2.2 ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΠΙΛΟΤΟΣ (CRUISE CONTROL)

Είναι ένα σύστημα σχετικό με την επιτάχυνση του οχήματος, το οποίο διατίθεται στα περισσότερα οχήματα και έχει τη δυνατότητα να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του οχήματος, σε τιμή την οποία καθορίζει ο οδηγός.

2.2.3 ADAPTIVE CRUISE CONTROL (ACC)

Το ACC, αποτελεί την μετεξέλιξη του Cruise control, και είναι ένα έξυπνό σύστημα ελέγχου που προσαρμόζει την ταχύτητα του οχήματος ανάλογα με την ταχύτητα του προπορευόμενου που κινείται ώστε να διατηρείται μια απόσταση ασφαλείας του ενός αυτοκινήτου από το άλλο. Όταν επιβραδύνει την ταχύτητα το προπορευόμενο όχημα, το όχημα κινείται με μικρότερη ταχύτητα, αντίθετα όταν το προπορευόμενο όχημα επιταχύνει, το σύστημα αυξάνει την ταχύτητα, έως ότου αποκτήσει την πρόεπουσα απόσταση ασφαλείας. Επιπροσθέτως το ACC μπορεί να υποστηρίξει τον οδηγό με το απαραίτητο φρενάρισμα όταν επιβάλλεται.

2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ ANTI-SLIP REGULATION

Το σύστημα ελέγχου πρόσφυσης, αποτρέπει την απώλεια της πρόσφυσης των τροχών στον δρόμο, όταν επιταχύνει ο οδηγός πέρα από το όριο επιτρέπει η ποιότητα του οδοστρώματος. Αυτό επιτυγχάνεται, μειώνοντας την επιτάχυνση, μέχρι τα ελαστικά να αποκτήσουν ξανά πρόσφυση με το οδόστρωμα.

2.2.5 BRAKE ASSIST

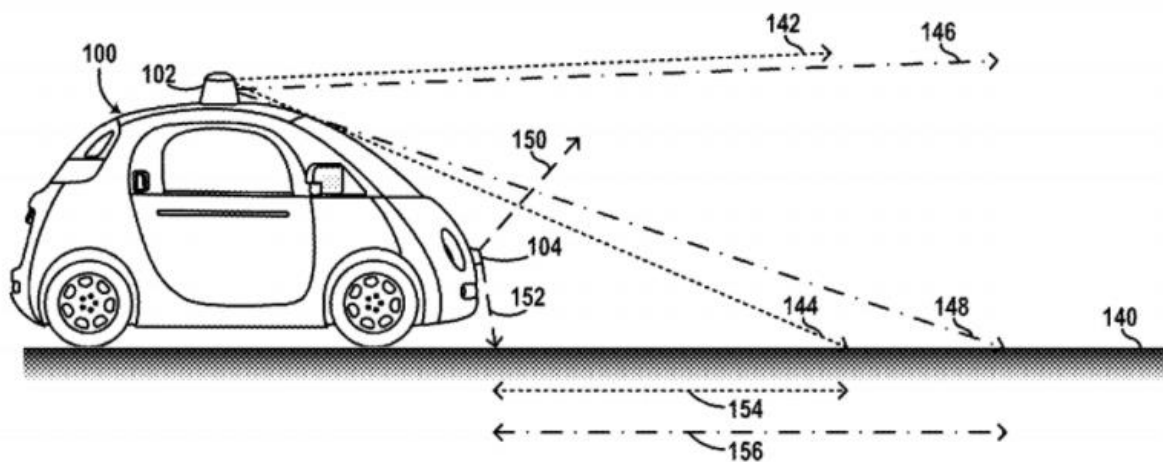
Η τεχνολογία αυτού του συστήματος προειδοποιεί τον οδηγό για προκείμενο κίνδυνο που παρουσιάζεται και τον βοηθά να αντιδράσει κατάλληλα. Στην περίπτωση που ο οδηγός δε συμμορφωθεί, αναλαμβάνει να επέμβει ενεργοποιώντας το αυτόματο σύστημα πέδησης.

2.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά αισθητήρια συστήματα που περιλαμβάνονται σε ένα αυτόνομο όχημα.

2.3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LASER ILLUMINATED DETECTION AND RANGING (LIDAR)

Με το LIDAR, πολλαπλές δέσμες ακτινών laser αποστέλλονται προς διάφορες κατευθύνσεις και στη συνέχεια η αντανάκλασή τους επιστρέφει ως σήμα, σε κατάλληλα τοποθετημένους αισθητήρες, που υπολογίζουν και δίνουν πληροφορίες στο όχημα για τις αποστάσεις, το μέγεθος, τον όγκο, αλλά και την πυκνότητα των διάφορων αντικειμένων του περιβάλλοντος. (Σχήμα 2-4)



ΣΧΗΜΑ 2-4: ΣΥΣΤΗΜΑ LIDAR

Κατά αυτόν τον τρόπο, το αυτόνομο όχημα μπορεί να δημιουργήσει έναν 3D χάρτη του περιβάλλοντος από τα δεδομένα που λαμβάνει. Τα LIDAR έχουν τη δυνατότητα να σκανάρουν το περιβάλλον εκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο, σε απόσταση έως και 200 m από τον αισθητήρα. Το σύστημα αυτό, συνήθως, τοποθετείται στην οροφή του οχήματος ώστε να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πρόσβαση στο εξωτερικό πεδίο.

2.3.2 RADAR- RADIO DETECTION AND RANGING

Η λειτουργία του είναι παραπλήσια με αυτή του LIDAR, διαφοροποιημένο ως προς το ότι χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τον εντοπισμό της θέσης, της απόστασης και της ταχύτητας των αντικειμένων και έχει μεγαλύτερη εμβέλεια.

Τα αυτόνομα οχήματα, ταυτόχρονα με τα radar, διαθέτουν και την τεχνολογία adaptive cruise control, η οποία διαφυλάττει την πρέπουσα απόσταση ασφαλείας από το προπορευόμενο όχημα, επιταχύνοντας και επιβραδύνοντας το όχημα χωρίς την ενασχόληση του οδηγού.

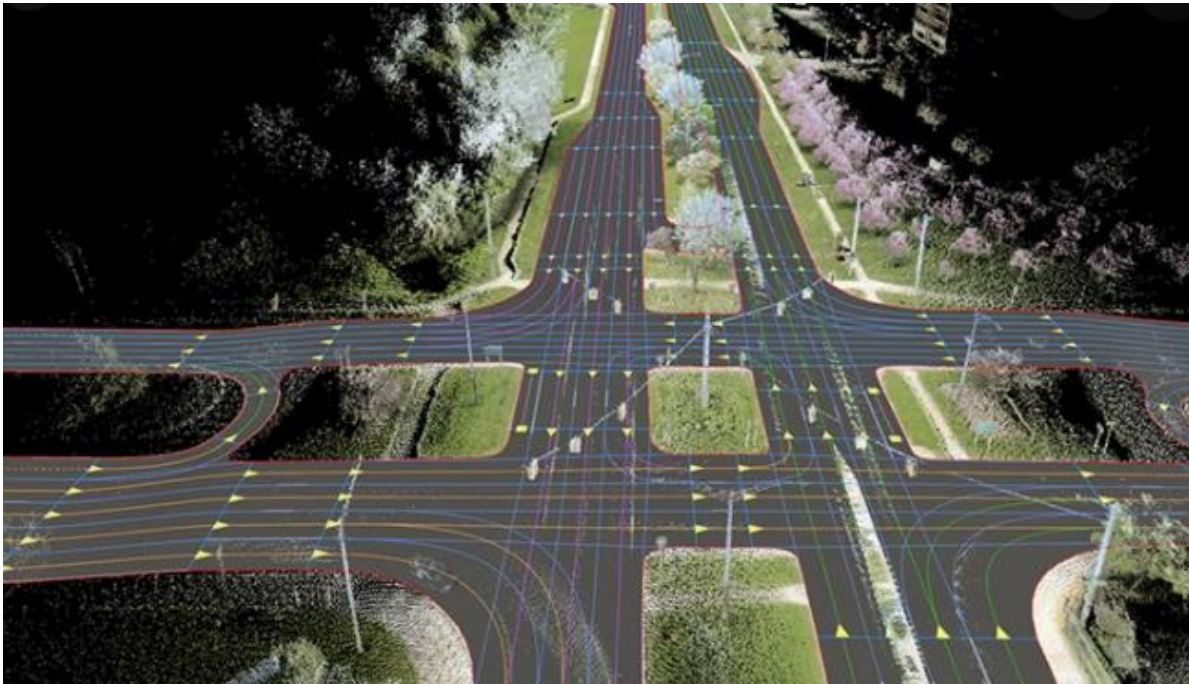
2.3.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ-ULTRASONIC SENSORS

Οι υπερηχητικοί (ultrasonic) αισθητήρες χρησιμοποιούνται στην υποβοήθηση παρκαρίσματος, αλλά και γενικά στα συστήματα αποφυγής συγκρούσεων. Σε ένα αυτόνομο όχημα οι αισθητήρες αυτοί έχουν ευρύτερη εμβέλεια από τους απαντώμενους στα σύγχρονα συμβατικά οχήματα. Ένα αυτόνομο όχημα, διαθέτει πολλούς τέτοιους αισθητήρες (ανάλογα το εκάστοτε όχημα), λόγω του μικρού μεγέθους τους και της μεγάλης ικανότητας τους στην ανίχνευση κοντινών αντικειμένων.

2.3.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ (GLOBAL POSITIONING SYSTEM – GPS)

Το αυτόνομο οχήματα φέρουν συσκευές GPS, παρεμφερείς με αυτές των κινητών τηλεφώνων. Το GPS είναι ένα σύστημα πλοήγησης, το οποίο κάθε στιγμή γνωρίζει με ευρύτατη ακρίβεια την εικόνα των δρόμων όπου κινούνται τα υπόλοιπα οχήματα, τη θέση του συγκεκριμένου οχήματος που το διαθέτει, αλλά και την τοπική ώρα. Τα δεδομένα αυτά παρέχονται μέσω μιας σύνδεσης του συστήματος αυτού με τέσσερεις ή και περισσότερους δορυφόρους. Ένα σύστημα GPS μπορεί να λειτουργήσει με οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες και σε οποιοδήποτε σημείο αυτό βρίσκεται. Η μόνη προϋπόθεση για τη λειτουργία του είναι η απρόσκοπτη επικοινωνία με τους δορυφόρους GPS. Τα δεδομένα του GPS ωφελούν για να συγκριθούν τα δεδομένα του σχετικά με το πού βρίσκεται, με την θέση του στον χάρτη. Παράλληλα, είναι άλλη μία πηγή πληροφόρησης για την ταχύτητα του οχήματος. Η συνεργασία με τα radar είναι άμεση αλλά και χρήσιμη, διότι το radar λαμβάνει την ταχύτητα των άλλων οχημάτων και το GPS, κατόπιν εκτιμά την προβλεπόμενη κατάσταση που θα επακολουθήσει. Γνωρίζοντας ένα όχημα την ακριβή του θέση, γνωρίζει αν έχει μπροστά του ελεύθερο και ανοιχτό δρόμο,

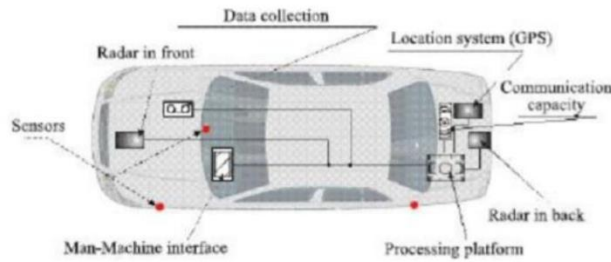
οπότε θα αναπτύξει ταχύτητα, αντίθετα αν εισέρχεται σε στροφές θα ελαττώσει ταχύτητα. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να προσαρμόζει την κίνηση του ανάλογα με το ανάγλυφο του οδοστρώματος που διατρέχει. Ενδιαφέρον έχουν και οι προηγμένοι χάρτες HD live maps (Σχήμα 2-5) λόγω της αξιοπιστίας τους. Πιο συγκεκριμένα, οι HD ζωντανοί χάρτες δημιουργούν μια εξαιρετικά λεπτομερή και δυναμική αναπαράσταση του περιβάλλοντος, επιτρέποντας σε ένα όχημα να έχει κάθε στιγμή γνώση του περιβάλλοντός του. Επίσης, οι HD ζωντανοί χάρτες παρέχουν ακρίβεια της τάξης του 1m, καθιστώντας δυνατή την ακρίβεια επιπέδου λωρίδας, με χαμηλότερη καθυστέρηση από αυτή του παραδοσιακού GPS.



ΣΧΗΜΑ 2-5: ΧΑΡΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

2.3.5 ΚΑΜΕΡΕΣ

Στα αυτόνομα οχήματα, η όραση του οδηγού αντικαθίσταται από τις κάμερες ταχείας επεξεργασίας, με τις οποίες σαρώνει τον περίγυρο του. Οι κάμερες βρίσκονται τοποθετημένες περιμετρικά του αμαξώματος, έτσι ώστε η εμβέλεια τους να καλύπτει 360 μοίρες. Διαθέτουν την ικανότητα λήψης τρισδιάστατων εικόνων και παραγωγής βίντεο. Οι κάμερες χρησιμοποιούν τους λεγόμενους αλγόριθμους όρασης, απομονώνοντας τα κινούμενα στοιχεία από τη συνολική προσλαμβάνουσα εικόνα λήψης του περιβάλλοντός τους. Καταφέρνουν, μιμούμενες την ανθρώπινη όραση, να επισημαίνουν εμπόδια, φανάρια κυκλοφορίας και ανθρώπινες παρουσίες.



ΣΧΗΜΑ 2-6: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΘΕΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

2.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δυνατές επικοινωνίες που θα έχουν τα αυτόνομα οχήματα επιπέδου 4 και άνω.

Αν και οι αλγόριθμοι ελέγχου των αυτόνομων οχημάτων προσφέρουν ολοένα και μεγαλύτερη ασφάλεια για τον έλεγχο του οχήματος, η πλήρης αυτοματοποίηση για να τεθεί σε ευρεία χρήση, λόγω της πολυπλοκότητας, απαιτεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Ακόμα, υπάρχει ένα σύνολο γεγονότων που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη τεχνολογίας, δυνατότητας και υποδομής ενημέρωσης ενός αυτόνομου οχήματος σχετικά με ένα συμβάν. Σε ένα μελλοντικό περιβάλλον αυτόνομης οδήγησης είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας υποδομής κεντρικού ελέγχου και επικοινωνιών. Ο κάθε οδηγός συμβατικού οχήματος υποχρεώνεται να ενημερώνει μέσω κατάλληλων φωτεινών διατάξεων τους άλλους οδηγούς για την πρόθεση του ως προς την αλλαγή της πορείας του, διότι ο συντονισμός μεταξύ των οδηγών καθιστά την κυκλοφορία αποτελεσματικότερη. Το δίκτυο με τη σειρά του, ενημερώνει τους οδηγούς μέσω φωτεινών σηματοδοτών, με οδικές σημάνσεις, ακόμη και με προβολή μηνυμάτων με σημαντικές ανακοινώσεις. Κατά την ίδια λογική, αλλά βασισμένη στα μέσα των σύγχρονων τεχνολογιών, είναι επιβεβλημένη η ύπαρξη ενός σύγχρονου κεντρικού συστήματος επικοινωνίας των αυτόνομων οχημάτων, για την ενημέρωση και την διευκόλυνσή τους. Παρακάτω περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθούν όσα προαναφέρθηκαν [14].

2.4.1 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ

Κάθε αυτόνομο όχημα, χρησιμοποιεί ένα δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας 3G, 4G ή πλέον το πολλά υποσχόμενο 5G. Ένας υπολογιστής με ειδικό software τοποθετημένος στο αυτόνομο όχημα δέχεται στον επεξεργαστή του δεδομένα από τα αισθητήρια όργανα, όπου αναλύονται με σκοπό το όχημα να κινηθεί με ασφάλεια. Τα αυτόνομα οχήματα είναι συνδεδεμένα με

κάποιο κέντρο δεδομένων, αποκτώντας πληροφορίες, αναβαθμίσεις του λογισμικού και δεδομένα για την κίνηση. Ταυτόχρονα, μέσω μιας βάσης ανταλλαγής δεδομένων αποστέλλονται τα δεδομένα της αυτόνομης οδήγησης του οχήματος σε άλλα οχήματα, και έτσι, μέσω των δεδομένων των υπόλοιπων οχημάτων, «μαθαίνουν» τα αυτόνομα οχήματα.

2.4.2 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ V2V

Η τεχνολογία επικοινωνίας οχήματος προς όχημα V2V (Vehicle to Vehicle), δίνει την δυνατότητα στα οχήματα να επικοινωνούν μεταξύ τους, ανταλλάσσοντας πληροφοριακά δεδομένα μεταξύ τους. Εάν για παράδειγμα, ένα όχημα που συνδέεται μέσω V2V συναντήσει ένα επικίνδυνο σημείο ή γεγονός θα μεταφέρει αυτές τις πληροφορίες σε άλλα οχήματα της περιοχής, προειδοποιώντας τα αποτελεσματικά, ώστε να επιστήσουν την προσοχή τους, και να διασχίσουν με ασφάλεια το κρίσιμο σημείο, που ενδεχομένως να δημιουργούσε δυσχέρεια στη πορεία των άλλων οχημάτων. Επιπλέον, η τεχνολογία V2V δεν επηρεάζεται από δυσμενείς συνθήκες του καιρού, του φωτός κλπ.[14]

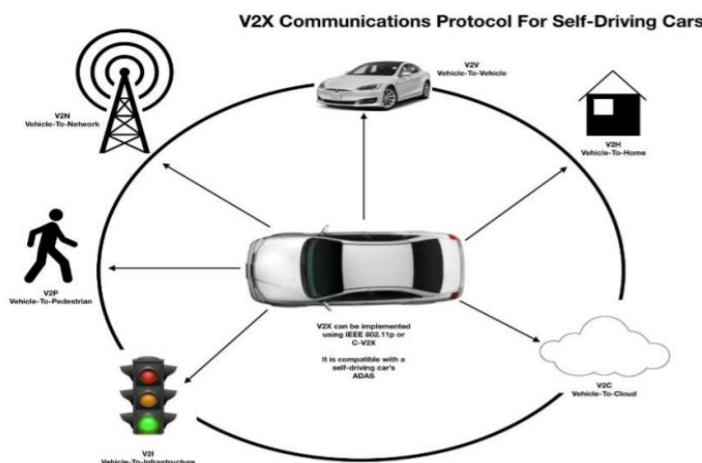
2.4.3 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ V2I

Η τεχνολογία επικοινωνίας οχήματος προς υποδομές V2I (Vehicle to Infrastructure), δίνει τη δυνατότητα στα οχήματα να έχουν επικοινωνία με τις υποδομές. Κατά συνέπεια το όχημα, θα μπορεί να έχει επίγνωση, σε πραγματικό χρόνο, της επικρατούσας κατάστασης των σηματοδοτών, των οδικών σημάνσεων, των κυκλοφοριακών ρυθμίσεων κλπ. Η εν λόγω τεχνολογία μπορεί να οδηγήσει στην ολική αλλαγή της εικόνας των οδικών δικτύων και να δοθούν νέες δυνατότητες, καθώς πια δεν θα είναι χρήσιμοι οι φωτεινοί σηματοδότες και θα μπορούν να αντικατασταθούν από πομπούς που θα εκπέμπουν σήματα, ώστε τα οχήματα να γνωρίζουν εάν θα πρέπει να σταματήσουν ή εάν μπορούν αν συνεχίσουν την πορεία τους κανονικά. Επίσης, οι πινακίδες και οι οδικές ενημερώσεις θα μπορούσαν να αντικατασταθούν πάλι με πομπούς που θα ενημερώνουν κατευθείαν τα οχήματα. Υπάρχει η προοπτική και για άλλες ωφέλιμες ευκαιρίες που προσφέρει η τεχνολογία αυτή, όπως η αλλαγή των κυκλοφοριακών ρυθμίσεων, η απαλλαγή του φαινομένου κυκλοφοριακής συμφόρησης μέσω κατάλληλου αλγορίθμου ελέγχου της ταχύτητας των οχημάτων, ο έλεγχος των οχημάτων ώστε να μην παραβιάζουν τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας (Κ.Ο.Κ.), η εξυπηρέτηση εκτάκτων καταστάσεων και ο κεντρικός έλεγχος πλοήγησης των οχημάτων. [14]

2.4.4 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ V2X

Ο όρος V2X (Vehicle to Everything)(Σχήμα 2-7) περιλαμβάνει τόσο την έννοια του V2V όσο και αυτή του V2I. Στην περίπτωση ενός αναπάντεχου συμβάντος, όπως ένα κινούμενο εμπόδιο επί της οδού, τα αυτοκίνητα που βρίσκονται σε συγκεκριμένη ακτίνα θα ενημερωθούν για αυτό, έτσι, θα προφτάσουν να λάβουν τα ανάλογα μέτρα. Το σημαντικότερο όλων είναι ότι η τεχνολογία V2X θα βοηθήσει στην αποφυγή ατυχημάτων, εφόσον θα δίνεται η δυνατότητα

στα οχήματα να «βλέπουν» άλλα οχήματα σε σημεία που η ακτίνα της ανθρώπινης όρασης δεν ανταποκρίνεται. Επίσης, τα οχήματα θα μπορούν να επικοινωνούν και με εξωτερικά συστήματα, όπως κτήρια, ποδηλάτες, πεζοί κλπ. Σε αυτό το συλλογικό δίκτυο όλα τα αυτοκίνητα ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους, μεταξύ των υποδομών επικοινωνίας, αλλά και με ο,τιδήποτε βρίσκεται γύρω του. Με την ταυτόχρονη εφαρμογή των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας τύπου 5G, πρόκειται να υπάρξουν μεγαλύτερες δυνατότητες υλοποίησης των δικτύων V2X [14].



ΣΧΗΜΑ 2-7: ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ V2X

2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Η ανάπτυξη συστημάτων αυτόματης πλοήγησης οχημάτων είναι πρόκληση για καθολική εφαρμογή σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριοποίησης τα επόμενα χρόνια. Η μετάβαση από τη χρήση των συμβατικών οχημάτων σε αυτόνομα, θα επιφέρει πρωτοφανείς διαφοροποιήσεις και προαγωγή στη ζωή των κοινωνιών. Παρακάτω, παρατίθενται οι σημαντικότεροι από τους τομείς στους οποίους χρησιμεύουν τα αυτόνομα οχήματα:

2.5.1 ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Πολλά από τα ερευνητικά προγράμματα αφορούν στρατιωτικά μη επανδρωμένα οχήματα. Αρχικά, τα οχήματα αυτά εμφανίστηκαν ως τηλεκατευθυνόμενα, έως την ως τώρα τελειοποίηση τους σε αυτόνομα. Σκοπός τους, η χρήση τους σε δυσπρόσιτες, επικίνδυνες και ερευνητικές αποστολές, καθώς και σε μεταφορές πολεμικού εξοπλισμού, έτσι ώστε να διευκολύνουν τον στρατό και να τον απαλλάξουν από ακραίες επικίνδυνες εκθέσεις και περιττή επιβάρυνση. (Σχήμα 2-8)



ΣΧΗΜΑ 2-8: ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΟ ΟΧΗΜΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

2.5.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Πολλές φορές χρειάζεται να επιτελεστούν εργασίες χαρτογράφησης και δειγματοληψίας σε δυσπρόσιτες περιοχές, καθώς και σε επιβαρυμένο περιβάλλον, εκεί που οι κίνδυνοι της ανθρώπινης παρουσίας είναι μεγάλοι, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, ή από απαγορευτικό χημικό περιβάλλον. Σε αυτές τις περιπτώσεις που είναι αδύνατον να παρευρεθούν άνθρωποι, τα αυτόνομα οχήματα καθίστανται απαραίτητα.

2.5.3 ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι διαστημικές εφαρμογές ήταν από τους πρώτους τομείς όπου απαιτήθηκε η χρήση οχημάτων που θα μπορούσαν να πλοηγηθούν μόνα τους, με σκοπό την εξερεύνηση, τη μεταφορά εξοπλισμού, χαρτογραφήσεις, αποστολές κ.ά.. Θεμελιώδες βήμα με επιστημονικές ανταμοιβές. (Σχήμα 2-9)



ΣΧΗΜΑ 2-9: ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΟΧΗΜΑ

2.5.4 ΈΚΤΑΚΤΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ

Σε ιδιάζουσες περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ο άνθρωπος βοηθήθηκε από τα αυτόνομα οχήματα, χωρίς να τεθούν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Τέτοιες περιπτώσεις είναι καταστροφές από σεισμό, ηφαιστειακές εκρήξεις, πυρκαγιές, εκρήξεις, τοξικό χημικό περιβάλλον, κ.ά. όπου καθίσταται επισφαλής η ανθρώπινη προσέγγιση.

2.5.5 ΟΧΗΜΑΤΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Η εισαγωγή της αυτονομίας στη δημόσια συγκοινωνία, αν και σε περιορισμένη κλίμακα, έχει ήδη πραγματοποιηθεί επιτυχώς σε ορισμένα κράτη. Στόχος της καλπάζουσας αυτής τεχνολογίας, είναι η ολοκληρωτική αντικατάσταση των συμβατικών μέσων μεταφοράς προς όφελος της μετακίνησης του πληθυσμού. Ένα τρανό παράδειγμα αποτελεί το μικρό αυτόνομο λεωφορείο (minibus), όπου το 2014 τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία, εξυπηρετώντας τους κατοίκους της πόλης των Τρικάλων[15],[16]. Το λεωφορείο αυτό διένυε 4Km στο κέντρο της πόλης των Τρικάλων, κινούμενο με ταχύτητα 10-12Km/h, συμπληρώνοντας το υφιστάμενο δίκτυο αστικών λεωφορείων. Η πόλη των Τρικάλων ήταν η πρώτη στον κόσμο όπου δοκιμάστηκε αυτόνομο λεωφορείο σε αστικό περιβάλλον(Σχήμα 2-10).



ΣΧΗΜΑ 2-10: ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΩΝ ΤΡΙΚΑΛΩΝ

2.5.6 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η βιομηχανία εκμεταλλεύομενη το δυναμικό των νέων τεχνολογιών, ενσωμάτωσε στις λειτουργίες της, τα αυτόνομα οχήματα μεταφοράς, αλλά και οργάνωσης. Το βιομηχανικό περιβάλλον, λόγω των διαρκών απαιτήσεων της μεταφοράς φορτίων με ευστοχία τοποθέτησης και οργάνωσης απέκτησε νέες δυνατότητες αξιοποίησης, αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων.

2.5.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΑΝΟΜΩΝ

Επί καθημερινής βάσης, τα οδικά δρομολόγια μεταφοράς εμπορευμάτων παγκοσμίως είναι ανυπολόγιστα. Τα αυτόνομα οχήματα μεταφοράς προϊόντων, παρέχουν μία ενισχυτική λύση σε θέματα βέλτιστης επιλογής διαδρομής στην αποφυγή της αναπόφευκτης κυκλοφοριακής συμφόρησης, συνεπώς και του επαναπροσδιορισμού του χρονοδιαγράμματος υλοποίησης της διαδικασίας μεταφοράς και διανομής. Ένα παράδειγμα στις παραδόσεις δεμάτων αποτελεί το πρόσφατο εγχείρημα της αυτοκινητοβιομηχανία Ford σε συνεργασία με την εταιρία διανομής προϊόντων Hermes. Στόχος του εγχειρήματος αυτού (Self-Driving Vehicle Research Programme) είναι η μεταφορά και η παράδοση των προϊόντων στον προορισμό τους, χωρίς την ύπαρξη διανομέα [17].

2.6 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Οι τεχνικές ελέγχου από την πλευρά της αυτοματοποίησης συνιστά ένα πρόβλημα αυτόματου ελέγχου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κλασικές και σύγχρονες τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται στα συστήματα. Εισάγονται οι ακόλουθοι βασικοί ορισμοί:

Σύστημα:

Μια συλλογή από στοιχεία που περιλαμβάνονται σε πραγματικό ή ιδεατό σύνορο, με σκοπό την εκτέλεση κάποιας λειτουργίας. Το σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του μέσω του συνόρου (Σχήμα 2-11). Ως περιβάλλον ορίζεται οτιδήποτε δεν περιέχεται στο σύστημα. Το σύστημα και η συμπεριφορά του περιγράφεται από τις μεταβλητές του συστήματος.

Ως δυναμικό σύστημα καλείται ένα σύστημα του οποίου η συμπεριφορά εξαρτάται από τον χρόνο. Η εξέλιξη ενός δυναμικού συστήματος στον χρόνο περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις (συνεχές) ή εξισώσεις διαφορών (διακριτό).



ΣΧΗΜΑ 2-11: ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Έλεγχος:

Η θεωρία ελέγχου είναι διεπιστημονικός κλάδος της μηχανικής και των μαθηματικών, ο οποίος ασχολείται με τη συμπεριφορά και τον έλεγχο των δυναμικών συστημάτων. Στόχος είναι να αναπτυχθεί, χρησιμοποιώντας τους νόμους που διέπουν ένα φυσικό σύστημα, ένα μοντέλο ή ένας αλγόριθμος, που θα ελέγχει την εφαρμογή των εισόδων συστήματος για να οδηγήσει το σύστημα σε μια επιθυμητή κατάσταση. Παράλληλα, ελαχιστοποιείται τυχόν καθυστέρηση, υπέρβαση ή σφάλμα σταθερής κατάστασης και διασφαλίζεται ένα επίπεδο σταθερότητας ελέγχου. Το θέμα των ελεγκτών αναλύεται στην ενότητα που ακολουθεί.

Ελεγκτής: Προκειμένου να επιτευχθεί το παραπάνω, η χρήση ενός ελεγκτή είναι απαραίτητη. Ο ελεγκτής θα αναλάβει όλες αυτές τις δράσεις και θα αναλύσουμε παρακάτω τον τρόπο λειτουργίας του. Ο ελεγκτής συνιστά ένα άλλο υποσύστημα το οποίο θα συνδυάσει τη λειτουργία με το σύστημα (Plant) έτσι ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ελέγχου. Ένα σύστημα μπορεί να δέχεται εισόδους (ελέγχου)-inputs, ή/και διαταραχές-disturbances οι οποίες είναι εισοδοί που δεν είναι αποτέλεσμα ελέγχου και αποδίδει εξόδους-

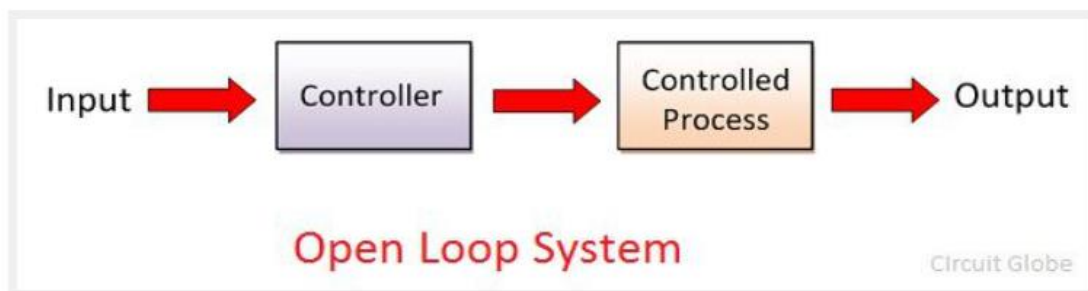
outputs στο περιβάλλον. Ως διαταραχή καλείται οποιοδήποτε μη επιθυμητό σήμα που επηρεάζει την έξοδο.

Τα συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: Ανοικτά και κλειστά συστήματα. Στα ανοικτά συστήματα ακόμη και αν υπάρχει ελεγκτής στην είσοδο τους, αυτός δεν λαμβάνει γνώση της κατάστασης των εξόδων τους και απλά επιβάλλει σήματα ελέγχου χωρίς να γνωρίζει εάν το σύστημα υπό έλεγχο ανταποκρίνεται επιτυχώς. Στα κλειστά συστήματα ο ελεγκτής παίρνει διέγερση και από την έξοδο του συστήματος, και έτσι το επιθυμητό σήμα που παράγεται από τον ελεγκτή είναι συνάρτηση της εξόδου. Δηλαδή, σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου η είσοδος εξαρτάται από την έξοδο (closed-loop). Η κύρια διαφορά των συστημάτων ανοικτού και κλειστού βρόχου έγκειται στην λήψη πληροφοριών από την έξοδο του συστήματος υπό-έλεγχο.

Σε ένα σύστημα ενδέχεται να υπάρχουν πολλές εισοδοι και πολλές έξοδοι (Multi-Input-Multi-Output System/M.I.M.O. System).

2.6.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Ένα σύστημα ανοικτού βρόχου (Σχήμα 2-12), είναι ένα σύστημα στο οποίο ο ελεγκτής δεν λαμβάνει γνώση της κατάστασης της εξόδου του. Λέγεται αλλιώς σύστημα μη ανάδρασης. Το σύστημα ανοικτού βρόχου δεν είναι αξιόπιστο και η ακρίβεια είναι μικρότερη σε σχέση με ένα σύστημα κλειστού βρόχου, όπου ο ελεγκτής λαμβάνει γνώση της κατάστασης εξόδου και αντιδρά με κατάλληλο σήμα.

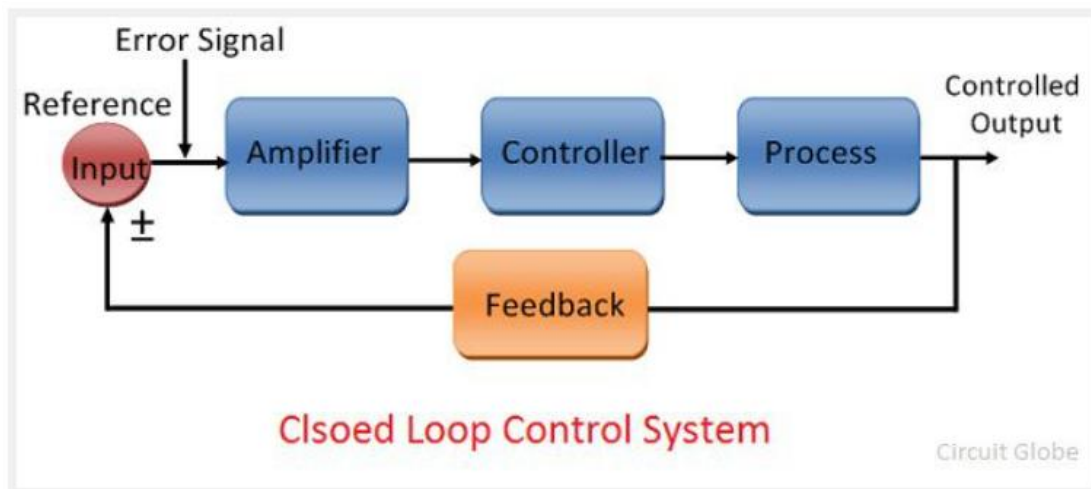


ΣΧΗΜΑ 2-12: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

2.6.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Στο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, η έξοδος του συστήματος ανατροφοδοτείται ως σήμα εισόδου στον ελεγκτή. Σε ένα τέτοιο σύστημα η έξοδος συγκρίνεται με την είσοδο. Η διαφορά αυτή μεταξύ εισόδου και εξόδου ονομάζεται σήμα σφάλματος. Η σύγκριση αυτή γίνεται

μετρώντας την έξοδο του συστήματος με κατάλληλες μετρητικές διατάξεις (π.χ. αισθητήρες). Ο κλειστός βρόχος υλοποιείται μέσω του μηχανισμού ανάδρασης (Εικόνα 2-13).



ΣΧΗΜΑ 2-13: ΤΥΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

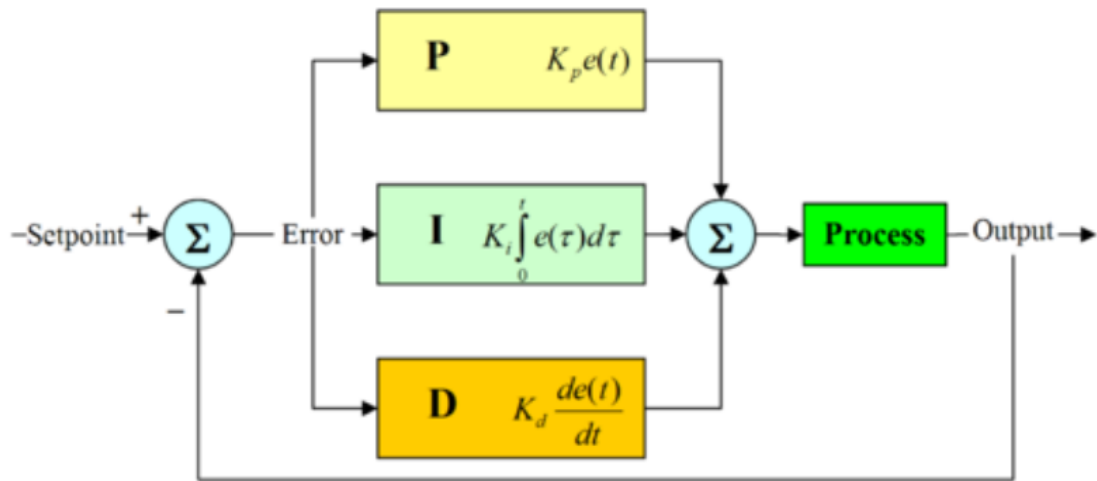
Τα συστήματα μπορούν να χωριστούν επίσης στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Γραμμικά. Ένα σύστημα θεωρείται γραμμικό όταν ισχύει για αυτό η αρχή της επαλληλίας.
- Μη Γραμμικά. Ένα σύστημα καλείται μη γραμμικό όταν οι νόμοι του αποτελούν μη γραμμικές εξισώσεις.

2.6.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE (PID)

Ένας από τους γνωστότερους ελεγκτές με ευρεία χρήση στα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου είναι ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-παραγωγικός ελεγκτής. Οι PID ελεγκτές αναπτύχθηκαν την δεκαετία του '40, αλλά μέχρι και σήμερα παραμένει μια ενεργή τεχνολογία στην βιομηχανία. Μια εφαρμογή των PID – ελεγκτών στην αυτόνομη οδήγηση αποτελεί το cruise control που αναφέρθηκε παραπάνω.

Στόχος ενός PID ελεγκτή είναι να διορθώσει το σφάλμα μεταξύ μιας μετρήσιμης μεταβλητής από ένα επιθυμητό σημείο λειτουργίας (set-point) Η γενική μορφή με χρήση Block διαγραμμάτων ενός PID ελεγκτή για τον έλεγχο ενός συστήματος (process) παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2-14):



ΣΧΗΜΑ 2-14: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ PID ΕΛΕΓΚΤΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (PROCESS)

Για τον υπολογισμό της εξόδου αυτού του ελεγκτή είναι απαραίτητοι τρεις όροι: ο αναλογικός όρος (P), ο ολοκληρωτικός (I) και ο διαφορικός (D).

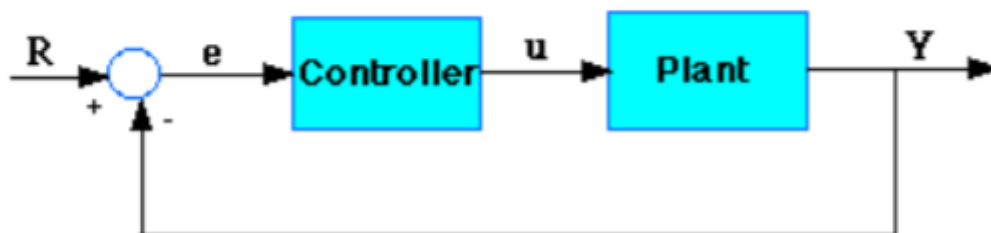
Η συνάρτηση μεταφοράς ενός PID ελεγκτή στο πεδίο Laplace δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$HPID(s) = K_p + K_I/s + K_Ds \quad (1)$$

όπου K_p είναι το αναλογικό κέρδος K_I είναι το ολοκληρωτικό κέρδος και K_D είναι το διαφορικό κέρδος του ελεγκτή.

Το αναλογικό κέρδος καθορίζει την αντίδραση στο τρέχον σφάλμα, το ολοκλήρωμα καθορίζει την αντίδραση βασισμένη στο άθροισμα των σφαλμάτων σε διάστημα χρόνου και η παράγωγος καθορίζει την αντίδραση, βάση της ταχύτητας μεταβολής του σφάλματος στο χρόνο. Ο συνδυασμός κατάλληλων τιμών για τις σταθερές ενίσχυσης (κερδών) καθορίζει τον ελεγκτή που απαιτείται για την αντιστάθμιση της λειτουργίας του συστήματος.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η δράση ενός ελεγκτή με προσθήκη του στον κύριο κλάδο του συστήματος (σερβομηχανισμός).



ΣΧΗΜΑ 2-15: ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΣΤΟΝ ΚΥΡΙΟ ΚΛΑΔΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η διαφορά μεταξύ της τιμής της επιθυμητής εισόδου(R) και της πραγματικής εξόδου(Y) ονομάζεται σφάλμα παρακολούθησης (e). Το σφάλμα αυτό εισέρχεται στον ελεγκτή, ο οποίος επιπρόσθετα υπολογίζει το ολοκλήρωμα και την παράγωγό του. Το u που εξέρχεται από τον ελεγκτή ισούται με το αναλογικό κέρδος επί την τιμή του σφάλματος, σύν το ολοκληρωτικό κέρδος επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος, σύν το διαφορικό κέρδος, επί την παράγωγο του σφάλματος. Δηλαδή:

$$u = Kpe + KI \int e dt + KD \frac{de}{dt} \quad (2)$$

Το u αυτό θα εισέλθει στο σύστημα πλέον και στη συνέχεια θα ληφθεί ένα σήμα εξόδου(Y), το οποίο θα αποσταλεί πίσω στο αισθητήριο κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς (ανατροφοδότηση).

Σε κάποιες εφαρμογές είναι εφικτό να απαιτηθούν μόνο έναν ή δύο όροι ώστε να επιτευχθεί ο κατάλληλος έλεγχος. Η εξάλειψη αυτών των όρων του ελεγκτή μπορεί να γίνει με τιμή ενίσχυσης για το κέρδος τους ίση με μηδέν. Ένας τέτοιος ελεγκτής θα λέγεται ελεγκτής PI, PD, P ανάλογα με το ποιοι όροι χρησιμοποιούνται. Οι ελεγκτές PI είναι αρκετά διαδεδομένοι, αφού η δράση του παραγωγικού όρου (D) είναι πολύ ευαίσθητη σε θορύβους μέτρησης.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η επίδραση των τριών όρων του ελεγκτή P, I και D.

Όπως προαναφέρθηκε, το αναλογικό κέρδος καθορίζει την αντίδραση στο τρέχον σφάλμα, οπότε η χρησιμοποίηση ενός αναλογικού ελεγκτή (P controller) θα ελάττωνε ως αποτέλεσμα τον χρόνο ανύψωσης και το μόνιμο σφάλμα και θα βελτίωνε την συμπεριφορά του συστήματος στην μεταβατική και στην μόνιμη κατάσταση. Το μόνιμο σφάλμα από έναν τέτοιο ελεγκτή δεν πρόκειται ποτέ να μηδενισθεί. Ο αναλογικός όρος P συνήθως συνδυάζεται με άλλους όρους, διότι δεν ανταπεξέρχεται ικανοποιητικά σε όλα τα συστήματα και σε όλους τους τύπους των εξωτερικών διαταραχών.

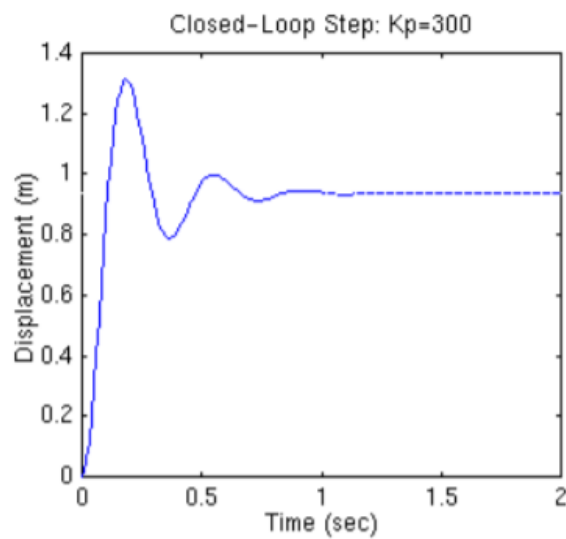
Από την άλλη, ο ολοκληρωτικός έλεγχος εξαλείφει το μόνιμο αυτό σφάλμα, αλλά αυτό μπορεί να γίνει με πολλές ταλαντώσεις μέχρι να επέλθει στο σύστημα μια τελική ισορροπία (έντονη μεταβατική απόκριση). Έτσι, ο ολοκληρωτικός όρος I χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα στα οποία υπάρχει σφάλμα κατά τη μόνιμη κατάσταση, όμως αυτό έχει επίδραση στην ταχύτητα απόκρισης, αλλά και στην ευστάθεια του συστήματος.

Τέλος, ο διαφορικός έλεγχος θα αυξήσει τη σταθερότητα στο σύστημα και θα μειώσει την υπερύψωση, καθώς και την μεταβατική απόκριση. Ο διαφορικός όρος D όμως δεν χρησιμοποιείται για το σχηματισμό ελεγκτή ποτέ από μόνος του. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την επίδραση του κάθε όρου ενός PID ελεγκτή, σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΕΡΔΩΝ ΤΟΥ PID ΕΛΕΓΚΤΗ ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟ ΜΟΝΙΜΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

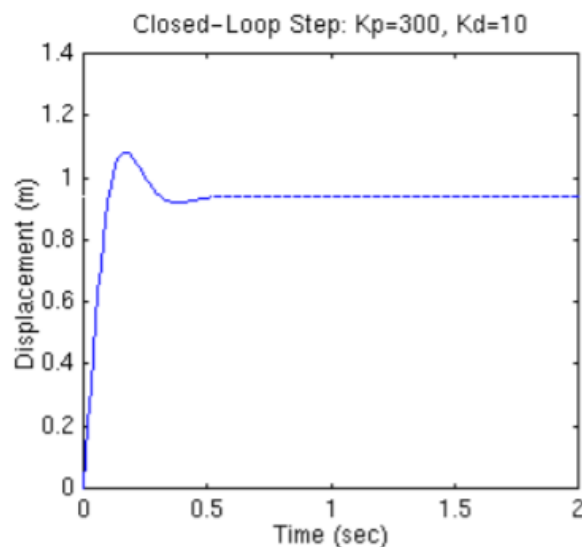
Αντίδραση Ελεγκτή	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
Kp	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
Ki	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
Kd	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα στα των χρονικών αποκρίσεων εξόδου για εφαρμογή P, PD, PI και PID ελεγκτών[58].



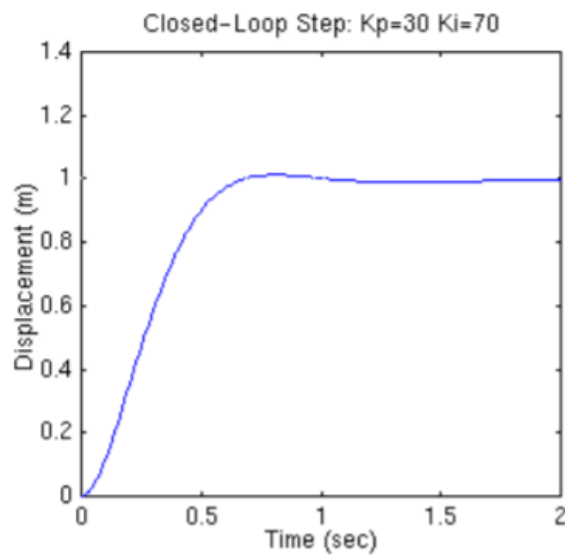
ΣΧΗΜΑ 2-16 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ P - ΕΛΕΓΚΤΗ

Στο Σχήμα 2-16 παρουσιάζεται ότι ο αναλογικός ελεγκτής μειώνει τόσο τον χρόνο ανύψωσης, όσο και το μόνιμο σφάλμα, αυξάνει όμως την υπερύψωση και μειώνει σε ένα μικρό ποσοστό τον χρόνο αποκατάστασης.



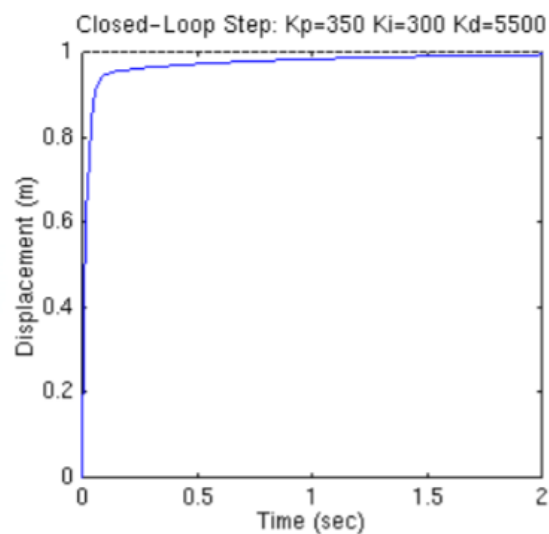
ΣΧΗΜΑ 2-17: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PD - ΕΛΕΓΚΤΗ

Η παραπάνω καμπύλη δείχνει ότι ο διαφορικός PD-ελεγκτής μειώνει τόσο την υπερύψωση όσο και τον χρόνο αποκατάστασης και έχει μικρή επίδραση στον χρόνο ανύψωσης, καθώς και στο μόνιμο σφάλμα.



ΣΧΗΜΑ 2-18: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PI - ΕΛΕΓΚΤΗ

Η παραπάνω απόκριση δείχνει ότι ο ολοκληρωτικός ελεγκτής εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα.



ΣΧΗΜΑ 2-19: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PID - ΕΛΕΓΚΤΗ

Τελικά, παρατηρείται ένα σύστημα χωρίς υπέρβαση, με γρήγορο χρόνο ανύψωσης και καθόλου μόνιμο σφάλμα με χρήση κατάλληλου PID - ελεγκτή.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα όσον αφορά τους ελεγκτές αυτούς:

- Όσο αυξάνεται το αναλογικό κέρδος, μειώνεται το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, όμως αν αυξηθεί πολύ, το σύστημα σταθεροποιείται.
- Ο ολοκληρωτικός έλεγχος καταφέρνει να μειώσει κατά πολύ το μόνιμο σφάλμα, αλλά πολλές φορές χειροτερεύει την ευστάθεια του συστήματος.

- Τέλος, με τον διαφορικό έλεγχο υπάρχει αύξηση της απόσβεσης, αλλά και βελτίωση της ευστάθειας, χωρίς μάλιστα να επηρεάζεται το μόνιμο σφάλμα.

2.6.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (OPTIMAL CONTROL)

Ο βέλτιστος έλεγχος προσφέρει λύση σε πολλά γνωστά προβλήματα στην θεωρία ελέγχου. Το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου έγκειται στην εύρεση του βέλτιστου σήματος ελέγχου $u(t)$, με τη χρήση του οποίου ελαχιστοποιείται μια συνάρτηση κόστους ή ένας δείκτης απόδοσης που έχει ορισθεί. Ταυτόχρονα με την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, θα πρέπει να τηρούνται και οι περιορισμοί που έχει το σύστημα υπό έλεγχο, δηλαδή οι εξισώσεις κατάστασης του αλλά και πρόσθετοι φυσικοί περιορισμοί που τίθενται στο σύστημα. Η συνάρτηση κόστους, η οποία έχει και φυσική σημασία, εξαρτάται συνήθως από τις μεταβλητές κατάστασης και από τις μεταβλητές εισόδου του συστήματος.

- Μια είσοδος ονομάζεται αποδεκτή ως προς έλεγχο (admissible control input) αν ικανοποιούνται οι φυσικοί περιορισμοί που έχουν τεθεί στην είσοδο στο χρονικό διάστημα $[t_0, t_f]$.
- Ένα διάνυσμα κατάστασης ονομάζεται αποδεκτό ως προς έλεγχο (admissible state trajectory) εάν ικανοποιούνται οι φυσικοί περιορισμοί του διανύσματος κατάστασης στο χρονικό διάστημα $[t_0, t_f]$.

Κάποια παραδείγματα προβλημάτων που είναι εφικτό να επιλυθούν με τον βέλτιστο έλεγχο είναι τα παρακάτω:

- ✓ Προβλήματα ελαχίστου χρόνου: Εύρεση της εισόδου εκείνης που μεταφέρει το σύστημά μας από μια κατάσταση σε μία άλλη σε ελάχιστο χρόνο.
- ✓ Προβλήματα ελέγχου τελικής τιμής: Εύρεση της εισόδου που ελαχιστοποιεί την απόκλιση της τελικής τιμής του διανύσματος κατάστασης από μια επιθυμητή τιμή.
- ✓ Προβλήματα ελάχιστης ενέργειας: Εύρεση της εισόδου εκείνης ώστε το σύστημα να μεταφερθεί από την αρχική του στην τελική κατάσταση σπαταλώντας την ελάχιστη δυνατή ενέργεια.

Ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου είναι ο Γραμμικός Τετραγωνικός Έλεγχος (Linear Quadratic -LQ). Όπως δηλώνει και το όνομά του, ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιείται σε γραμμικά συστήματα. Ο ελεγκτής αυτός έχει χρήση σε προβλήματα στα οποία το σύστημα πρέπει να ακολουθήσει μια τροχιά, καταναλώνοντας ελάχιστη ενέργεια, ελαχιστοποιώντας κάποιο κριτήριο κόστους.

Ένα γραμμικό και χρονικά μεταβαλλόμενο σύστημα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (3)$$

Η ακολουθία ελέγχου που θα βρεθεί θα πρέπει να ελαχιστοποιεί την παρακάτω έκφραση:

$$J = \frac{1}{2} x^T(tf) S f x(tf) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t)] dt \quad (4)$$

Όπου J είναι η συνάρτηση κόστους και ονομάζεται κριτήριο κόστους τετραγωνικής μορφής. Οι συμμετρικοί πίνακες S, Q και R είναι τα βάρη των x και u. Οι όροι $x^T(t)Q(t)x(t)$ και $u^T(t)R(t)u(t)$ δείχνουν την ύπαρξη περιορισμού στο πλάτος των διανυσμάτων x και u.

Άρα, στο πρόβλημα του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου είναι μια περίπτωση βέλτιστου ελέγχου, όπου το σύστημα περιγράφεται από γραμμικές εξισώσεις και το κόστος αναφέρεται ως μια τετραγωνική συνάρτηση.

Ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα βέλτιστου ελέγχου όπου συναντάται σε πολλά προβλήματα είναι ο γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής (linear quadratic regulator – LQR), μια μορφή του προβλήματος του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου. Στη μέθοδο αυτή όλοι οι πίνακες των εξισώσεων κατάστασης είναι χρονικά αμετάβλητοι. Επίσης, $t_0=0$ και t_f είναι κάποιος θετικός αριθμός ή μπορεί να τείνει στο άπειρο. Λαμβάνοντας το t_f να τείνει στο άπειρο θα έχουμε:

$$J = \int_{t_0}^{\infty} [x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t)] dt \quad (5)$$

Η παραπάνω συνάρτηση θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, βρίσκοντας την είσοδο $u(t)$. Η φυσική σημασία της συνάρτησης J είναι να περιοριστεί η κατάσταση του συστήματος κοντά στο σημείο ισορροπίας από την διαταραγμένη θέση, έχοντας ταυτόχρονα την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

2.6.5 ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ (MODEL PREDICTIVE CONTROL - MPC)

Ένας άλλος τύπος ελεγκτή είναι ο προβλεπτικός ελεγκτής (MPC). Ο προβλεπτικός έλεγχος γενικά βασίζεται σε δυναμικά μοντέλα διεργασιών (γραμμικά εμπειρικά ή μη γραμμικά). Ο όρος MPC αναφέρεται σε μια οικογένεια ελεγκτικών αλγορίθμων, οι οποίοι χρησιμοποιούν σαφή μοντέλα διεργασιών, ώστε να γίνει η πρόβλεψη της μελλοντικής απόκρισης του μοντέλου ενδιαφέροντος, μέσω βελτιστοποίησης.

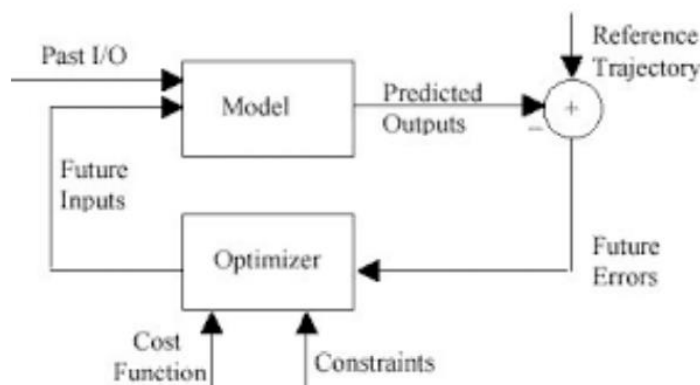
Είναι ένας εξελιγμένος τύπος ελεγκτών, και χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια στην βιομηχανία κλπ, και γενικά όπου είναι αναγκαίος ο έλεγχος ενός συστήματος στο οποίο επιβάλλονται κάποιοι περιορισμοί. Ένα από τα θετικά του χαρακτηριστικά είναι η αποτελεσματικότητά του στην αντιμετώπιση σύνθετων πολύ-μεταβλητών προβλημάτων ελέγχου με περιορισμούς. Έτσι, οι διάφορες παραλλαγές των ελεγκτών αυτών είναι αρκετά δημοφιλείς και αποδεκτές στην ακαδημαϊκή κοινότητα και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Η κύρια ιδέα των ελεγκτών αυτών βασίζεται στο γεγονός ότι οι μεταβολές (actions) που διενεργούνται στο σύστημα κατά το παρελθόν και κατά το παρόν επηρεάζουν την μελλοντική κατάσταση του συστήματος. Ο στόχος είναι το σύστημα να ακολουθεί μια προκαθορισμένη τροχιά - setpoint trajectory. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του μοντέλου διεργασίας, με

σκοπό να γίνει η πρόβλεψη των μεταβολών χειραγωγούμενων μεταβλητών του συστήματος, οι οποίες με τη σειρά τους έχουν προκύψει από τις αλλαγές στις μη χειραγωγούμενες μεταβλητές.

Σκοπός είναι η διαφορά των χειραγωγούμενων μεταβλητών με την επιθυμητή τιμή που έχει τεθεί να μείνει σε όσο πιο χαμηλά επίπεδα γίνεται και να ορισθεί η ιδανική μελλοντική ακολουθία ελέγχου βασισμένη στην τρέχουσα κατάσταση του συστήματος.

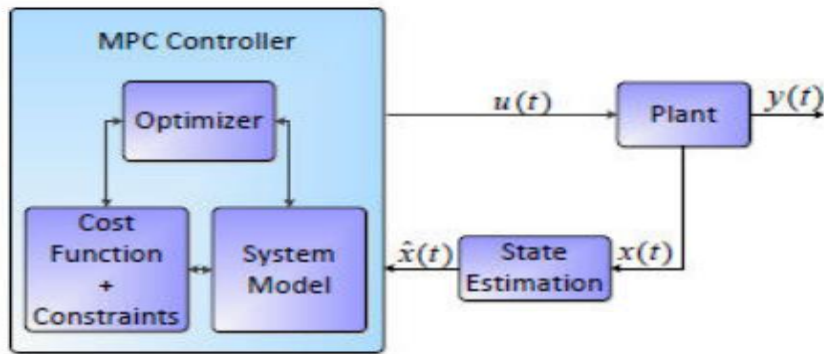
Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε χρονικό διάστημα, επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης βάσει της τρέχουσας κατάστασης, στο οποίο επιβάλλονται επιπλέον περιορισμοί. Κατά την επίλυση ελαχιστοποιείται ένα αντικειμενικό κριτήριο απόδοσης (objective function), κάθε χρονική στιγμή πάνω σε ένα χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης (prediction horizon). Έτσι, με βάση την τρέχουσα τιμή των μεταβλητών κατάστασης, υπολογίζεται η μελλοντική είσοδος του συστήματος, που με τη σειρά της θα οδηγήσει στην μελλοντική έξοδο, ελαχιστοποιώντας την απόσταση από την τροχιά στόχου (set-point trajectory)(Σχήμα 2-20). Αυτό που επιδιώκεται είναι να βρεθεί η ακολουθία του νόμου ελέγχου, δηλαδή της εισόδου η οποία θα βελτιστοποιήσει την απόδοση του ελεγκτή - συστήματος. Σε κάθε διάστημα που έχει επιλεγεί υπολογίζεται ο βέλτιστος νόμος ελέγχου (u), ώστε με τις τιμές αυτές ως είσοδο στο μοντέλο, να μειωθεί η απόκλιση από την τροχιά που έχει τεθεί ως επιθυμητή.



ΣΧΗΜΑ 2-20: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΒΛΕΠΤΗ - ΕΛΕΓΚΤΗ

Σύμφωνα με το μοντέλο και τους περιορισμούς που επιβάλλονται στις μεταβλητές εισόδου και εξόδου, η συνάρτηση κόστους (cost function) που χρησιμοποιείται στη βελτιστοποίηση μπορεί να έχει να κάνει με κατανάλωση ενέργειας, κατανάλωση καυσίμου, απόσταση από κάποιο σημείο αναφοράς, και άλλα. Στη αυτόνομη οδήγηση συγκεκριμένα, οι MPC - ελεγκτές χρησιμοποιούνται για την αποφυγή εμποδίων και την παρακολούθηση τροχιάς. Ένας τέτοιος ελεγκτής αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία (βλ. Κεφάλαιο 3).

Ο προβλεπτικός ελεγκτής περιέχει τα τρία βασικά σημεία που φαίνονται στο Σχήμα 2-21.



ΣΧΗΜΑ 2-21: ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ MPC - ΕΛΕΓΚΤΗ

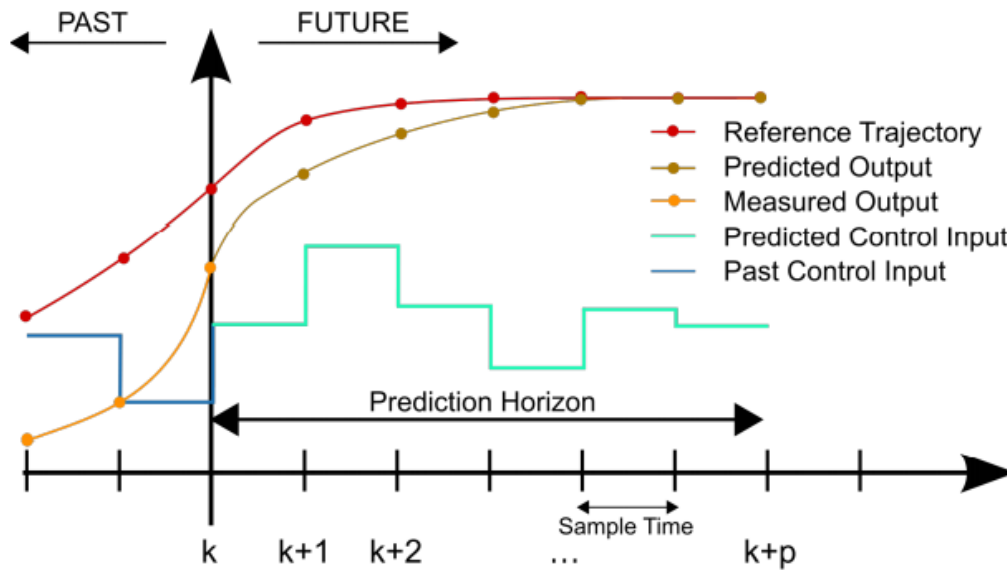
Μέσω της βελτιστοποίησης που γίνεται, παράγεται η είσοδος του ελεγκτή $u(t)$ ή αλλιώς control input. Η είσοδος αυτή εφαρμοζόμενη στο μοντέλο της διεργασίας (Plant), δίνει την ελάχιστη τιμή στην συνάρτηση κόστους (cost function). Η βελτιστοποίηση αυτή, γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τους διάφορους περιορισμούς που δίνονται για τις μεταβλητές και προφανώς, την συνάρτηση κόστους.

Ενδεχομένως να υπάρχει και ένας εκτιμητής κατάστασης, ώστε να κάνει την πρόβλεψη για τις μη μετρήσιμες μεταβλητές κατάστασης ($\hat{x}(t)$).

Ένας προβλεπτικός ελεγκτής βελτιστοποιεί την έξοδο ενός μοντέλου μέσα σε έναν πεπερασμένο ορίζοντα, με έναν επαναληπτικό τρόπο που θα αναλυθεί παρακάτω.

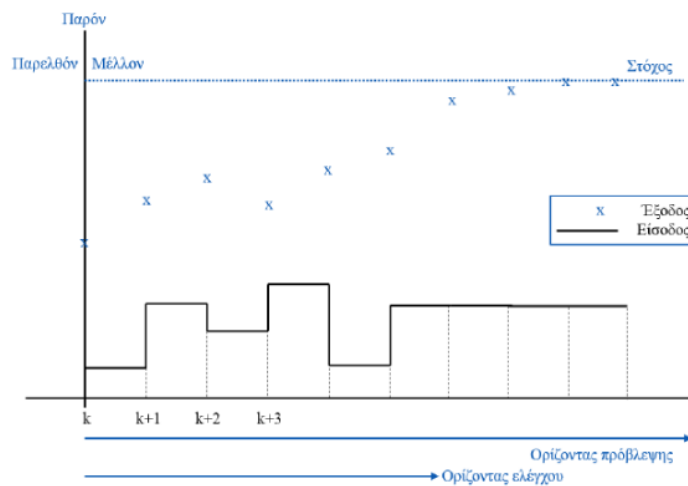
Στο διάγραμμα του Σχήματος 2-22 φαίνεται ότι το βήμα με βάση τον χρόνο, είναι ένα. Σε κάθε βήμα, η κατάσταση του μοντέλου μετράται και μέσω της βελτιστοποίησης υπολογίζεται μια στρατηγική ελέγχου $u(t)$, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος για πεπερασμένα μελλοντικά χρονικά βήματα $k=t+0, t+1, t+2, t+3, \dots, t+p$, με p να είναι ο αριθμός των επερχόμενων σημείων του ορίζοντα πρόβλεψης.

Πρακτικά όμως, κάποιες αλλαγές (π.χ. διαταραχές), μπορεί να δημιουργήσουν σφάλμα μεταξύ της εξόδου που έχει προβλεφθεί και της πραγματικής εξόδου. Έτσι, στις περιπτώσεις αυτές, το πρώτο βήμα της στρατηγικής ελέγχου εφαρμόζεται στο μοντέλο και έπειτα, η κατάστασή του μετρείται ξανά, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αρχική τιμή για το επόμενο βήμα. Η ανατροφοδότηση με την μετρούμενη πληροφορία στον βελτιστοποιητή (optimizer) προσθέτει ευρωστία στον ελεγκτή. Η κατάσταση μετρείται ξανά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε φορά με καινούργιες τιμές στην κατάσταση του συστήματος. Σε κάθε επανάληψη, ο κυλιόμενος ορίζοντας πρόβλεψης μετατοπίζεται ένα βήμα προς τα εμπρός.



ΣΧΗΜΑ 2-22: MPC - ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Έτσι, εξάγεται στο συμπέρασμα ότι ο προβλεπτικός έλεγχος είναι δυνατόν να «προβλέπει το μέλλον» και να έχει την απαραίτητη συμπεριφορά έτσι ώστε να πετυχαίνει την βέλτιστη απόδοση, αλλά και να περιγράφει την κατάσταση του συστήματος κατά το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον (Σχήμα 2-23).



ΣΧΗΜΑ 2-23: : ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ([HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/315787201_PROBLEPTIKO_S_ELENCHOS_MIA_KATHEMERINE_ARCHE_POU_ERHARMOZETAI_STE_BIOMECHANIA](https://www.researchgate.net/publication/315787201_PROBLEPTIKO_S_ELENCHOS_MIA_KATHEMERINE_ARCHE_POU_ERHARMOZETAI_STE_BIOMECHANIA))

Η διαφορά μεταξύ του PID και του MPC έγκειται στην διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος από τον κάθε ελεγκτή. Ο PID ελεγκτής όπως προαναφέρθηκε μπορεί να δεχτεί

μόνο μια είσοδο και μία έξοδο (SISO System), ενώ ο MPC μπορεί να επεξεργαστεί και πολυπλοκότερα συστήματα με περισσότερες από μια μεταβλητές εισόδου και εξόδου (MIMO System). Επιπροσθέτως, ένας PID ελεγκτής δεν δίνει τη δυνατότητα να επιβληθούν περιορισμοί στο σύστημα και ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα του προβλεπτικού ελεγκτή είναι η ευελιξία που έχει στους περιορισμούς. Παρακάτω θα αναλυθεί περεταίρω ο προβλεπτικός ελεγκτής που χρησιμοποιείται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

2.7 ΜΟΝΤΕΛΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ

Προκειμένου να μελετηθεί η κίνηση ενός οχήματος, χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά αναπαριστούν την κίνηση ενός οχήματος με τη μορφή εξισώσεων. Παρακάτω αναφέρονται τα μοντέλα αυτά και οι διαφορές τους.

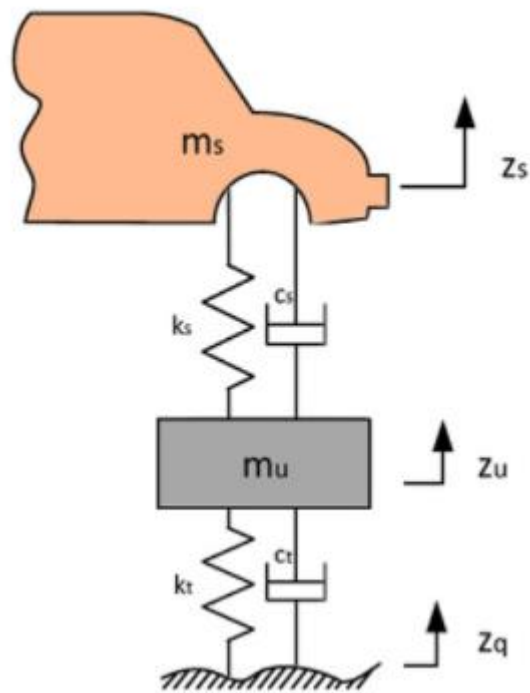
2.7.1 QUARTER CAR MODEL

Αυτό το μαθηματικό μοντέλο είναι γραμμικό και απλό όσον αφορά την υλοποίησή του, και χρησιμοποιείται για τη μελέτη των αναρτήσεων ενός οχήματος και συνεπώς της κατακόρυφης κίνησης του σώματος του οχήματος. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως για την μελέτη της κατακόρυφης ταλάντωσης του οχήματος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού είναι προσεγγιστικά.

Τα κύρια στοιχεία ενός quarter car μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-24 είναι:

- η μη αναρτημένη μάζα m_u , που περιλαμβάνει την μάζα του τροχού και των δισκοφρένων του
- η αναρτημένη μάζα m_s , που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του αμαξώματος πάνω από τον τροχό και άνω, δηλαδή το $\frac{1}{4}$ της συνολικής μάζας του οχήματος
- η ανάρτηση που τα συνδέει και έχει μοντελοποιηθεί με ένα ελατήριο σταθεράς k_s και ένα αποσβεστήρα σταθεράς c_s σε παραλληλία,
- ο τροχός, ο οποίος μοντελοποιείται με ένα ελατήριο με σταθερά k_t και έναν αποσβεστήρα c_t , ο οποίος συνήθως θεωρείται αμελητέος,

Το quarter car μοντέλο έχει δύο βαθμούς ελευθερίας, έναν για την κάθετη μετατόπιση της αναρτημένης μάζας και έναν για την κάθετη μετατόπιση της μη αναρτημένης. Παρακάτω φαίνεται γραφικά ένα τέτοιο μοντέλο:



ΣΧΗΜΑ 2-24: QUARTER CAR MODEL

2.7.2 HALF CAR MODEL

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ένα απλοποιημένο μοντέλο οχήματος που αποτελείται από δύο τροχούς, για αυτό ονομάζεται αλλιώς bicycle model. Το μοντέλο χωρίζεται στα ακόλουθα υπο - τμήματα:

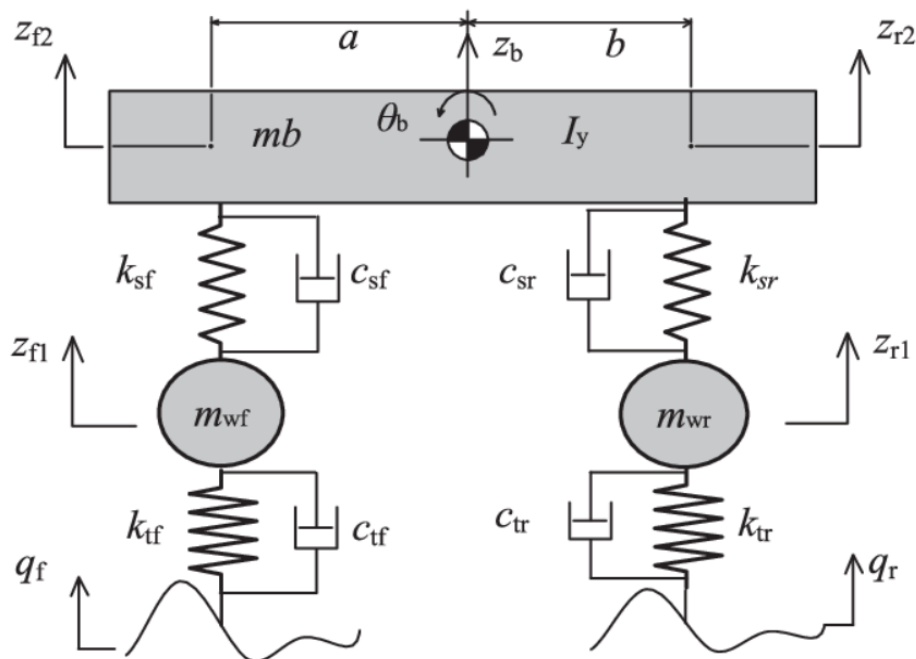
Bicycle Model (Pitch-Bounce):

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπαριστά το μισό όχημα, είτε την δεξιά μεριά είτε την αριστερή, και τους αντίστοιχους τροχούς τους. Χρησιμοποιείται προκειμένου να μελετηθούν η κάθετη κίνηση και ο καλπασμός του οχήματος. Οι βαθμοί ελευθερίας αυτού του μοντέλου είναι τέσσερεις:

- η κάθετη μετατόπιση του οχήματος,
- οι μετατοπίσεις των τροχών που μελετώνται στο μοντέλο
- η γωνία καλπασμού

Τα κύρια στοιχεία ενός half car model front-rear, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-25 είναι τα εξής:

- η ανηρτημένη μάζα m_b με ροπή αδράνειας I_y , που αποτελεί το $\frac{1}{2}$ του οχήματος
- η ανάρτηση, που μοντελοποιείται με ελατήρια και αποσβεστήρες, με συμβολισμούς k_{sf} , c_{sf} και k_{sr} , c_{sr} για το εμπρόσθιο και το οπίσθιο μέρος αντίστοιχα.
- τους τροχούς, με μάζες m_{wf} , m_{wr} , εμπρός και πίσω αντίστοιχα
- τα ελαστικά, όπου μέσω αυτών οι τροχοί έρχονται σε επαφή με το οδόστρωμα, και μοντελοποιούνται και αυτά με ένα ελατήριο σταθεράς k_{tf} και έναν αποσβεστήρα με σταθερά c_{tf} για το μπροστινό μέρος και k_{tr} , c_{tr} για το πίσω, αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 2-25: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ FRONT - REAR ΜΟΝΤΕΛΟΥ

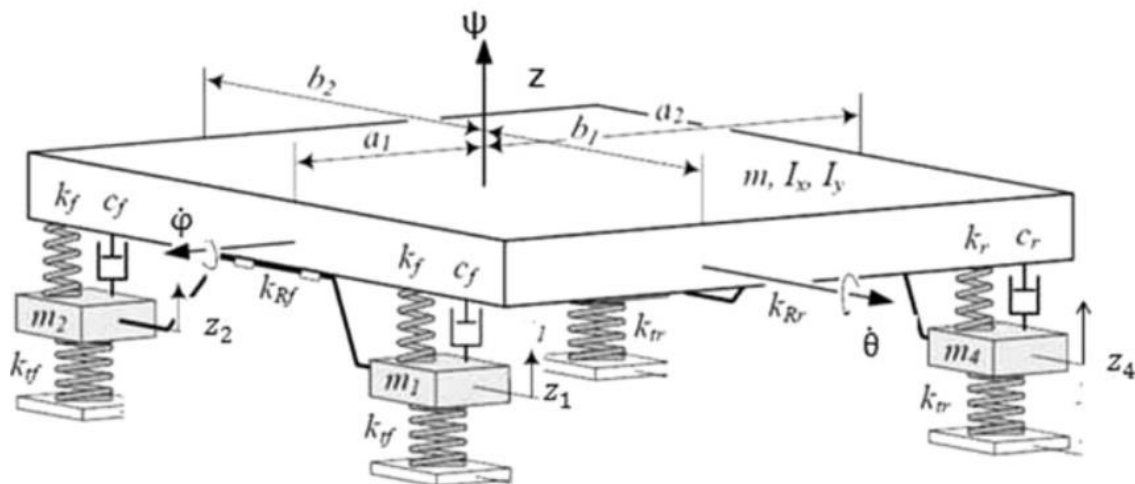
Half Car (Pitch-Roll):

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη μελέτη της εκτροπής (roll) του οχήματος. Εδώ η μοντελοποίηση γίνεται και πάλι στο μισό όχημα, αλλά αυτή τη φορά κατά τον εγκάρσιο άξονα (εμπρόσθιο ή οπίσθιο). Οι βαθμοί ελευθερίας σε αυτή την περίπτωση είναι:

- η κάθετη κίνηση του οχήματος
- η γωνία εκτροπής
- οι μετατοπίσεις των δύο τροχών που μοντελοποιούνται

- η γωνία εκτροπής
- η γωνία καλπασμού
- οι μετατοπίσεις των τεσσάρων τροχών

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-27, η ανηρτημένη μάζα αναπαριστάται με μια πλάκα, η οποία έχει μάζα ίση με του οχήματος (m) και με z_1, z_2, z_3, z_4 συμβολίζονται οι μετατοπίσεις του κάθε τροχού.



ΣΧΗΜΑ 2-27: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ FULL CAR ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα κύρια στοιχεία ενός full car model, είναι τα εξής:

- η ανηρτημένη μάζα m , με ροπές αδράνειας διαμήκη I_x και εγκάρσια I_y ,
- οι αναρτήσεις, που και πάλι αναπαριστώνται ως ελατήρια και αποσβεστήρες με σταθερές k_r, k_f και c_r, c_f αντίστοιχα.
- οι τροχοί με μάζες m_1, m_2, m_3, m_4 ,
- τα ελαστικά, που μοντελοποιούνται με ελατήρια και αποσβεστήρες σταθερών k_{rf}, k_{tr} και c_{rf}, c_{tr}

2.7.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑ RACEJKA

Μέσω των ελαστικών το όχημα έρχεται σε επαφή με τον δρόμο. Όπως σε κάθε επαφή μεταξύ δύο σωμάτων, παράγονται κάποιες δυνάμεις. Η μοντελοποίηση των ελαστικών είναι αρκετά δύσκολη, καθώς αυτά εμφανίζουν υψηλή μη-γραμμική συμπεριφορά για μεγάλες τιμές slip ratio και slip angle. Ο Hans B. Pacejka ανέπτυξε μια σειρά μοντέλων σχεδιασμού ελαστικών με το όνομα "Magic Formula". Η μοντελοποίηση κατά Pacejka χρησιμοποιείται ευρέως σε προσομοιώσεις δυναμικής οχημάτων. Το μοντέλο ελαστικών κατά Pacejka υπολογίζει τις πλευρικές δυνάμεις των ελαστικών με βάση την γωνία ολίσθησης και τις διαμήκεις δυνάμεις τους [49],[50],[30].

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιείται ένα μη-γραμμικό μοντέλο τεσσάρων τροχών, σε συνδυασμό με μοντελοποίηση ελαστικών κατά Pacejka, προκειμένου να περιγραφεί η κίνηση του οχήματος. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο αυτό.

3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ (MPC) ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ

3.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Όταν ένα όχημα κινείται, όπως είδαμε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η κίνησή του αυτή διέπεται από κάποιες εξισώσεις, που με τις κατάλληλες παραμέτρους μας οδηγούν σε αποτελέσματα για τις δυνάμεις που δέχεται, για την ταχύτητά του και τις επιταχύνσεις.

Αρχικά, οι βασικές εξισώσεις που χρειάζονται ώστε να περιγραφεί η κίνηση του οχήματος στη λωρίδα κυκλοφορίας είναι οι παρακάτω διαφορικές εξισώσεις:[30],[31]

$$m\dot{v}_x = m\nu\dot{\psi} + \sum_{i=0}^4 F_{xi} + P_f + P_r \quad (6)$$

$$m\dot{v}_y = -m\nu x\dot{\psi} + \sum_{i=0}^4 F_{yi} + P_f \delta_i \quad (7)$$

όπου έχουμε τους εξής συμβολισμούς:

- m : η συνολική μάζα του οχήματος
- v_x : η διαμήκης συνιστώσα της ταχύτητας
- v_y : η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας
- F_{xi} : οι δυνάμεις που δέχονται τα ελαστικά στον άξονα x' που είναι παράλληλος στο μεταξόνιο του οχήματος
- F_{yi} : οι δυνάμεις που δέχονται τα ελαστικά στον άξονα y' που είναι παράλληλος στο μετατρόχιο του οχήματος
- $\dot{\psi}$: η γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον κάθετο άξονα που βρίσκεται στο κέντρο μάζας του οχήματος
- P_f : η αναπτυσσόμενη δύναμη επιτάχυνσης στους εμπρόσθιους τροχούς του οχήματος
- P_r : η αναπτυσσόμενη δύναμη επιτάχυνσης στους οπίσθιους τροχούς του οχήματος

$$J_z \ddot{\psi} = l_f (F_{y1} + F_{y2} + P_f \delta_i) - l_r (F_{y3} + F_{y4}) + \left(\frac{wt}{2}\right) (-F_{x1} + F_{x2} - F_{x3} + F_{x4}) \quad (8)$$

με τους παρακάτω συμβολισμούς:

- J_z : η ροπή αδράνειας του οχήματος
- $\ddot{\psi}$: η γωνιακή επιτάχυνση γύρω από τον κάθετο άξονα που βρίσκεται στο κέντρο μάζας του οχήματος
- l_f : η απόσταση από το cog του οχήματος μέχρι τον μπροστινό άξονα
- l_r : η απόσταση από το cog του οχήματος μέχρι τον πίσω άξονα
- F_{xi} : οι δυνάμεις που δέχονται τα ελαστικά στον άξονα x' που είναι παράλληλος στο μεταξόνιο του οχήματος
- F_{yi} : οι δυνάμεις που δέχονται τα ελαστικά στον άξονα y' που είναι παράλληλος στο μετατρόχιο του οχήματος
- w : το μετατρόχιο του οχήματος

$$e_{\psi} = \psi - \psi_s \quad (9)$$

$$e_y = vx \cos(e\psi) + vx \sin(e\psi) \quad (10)$$

Όπου

- e_{ψ} : ο προσανατολισμός του οχήματος
- e_y : η πλευρική θέση του οχήματος

Το παρακάτω ζευγάρι εξισώσεων αφορά τις συνιστώσες των δυνάμεων που δέχονται τα ελαστικά, παίρνοντας ως σύστημα αναφοράς το μετατρόχιο και το μεταξόνιο του οχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1:

$$F_{xi} = f_{xi} \cos(\delta_i) - f_{yi} \sin(\delta_i) \quad (11a)$$

$$F_{yi} = f_{xi} \sin(\delta_i) + f_{yi} \cos(\delta_i), \text{ με } i=\{1,2,3,4\}, \quad (11b)$$

όπου

- δ_i : είναι η γωνία στροφής του εκάστοτε τροχού
- F_{xi} : οι δυνάμεις που δέχονται τα ελαστικά στον άξονα x'x που είναι παράλληλος στο μεταξόνιο του οχήματος
- F_{yi} : οι δυνάμεις που δέχονται τα ελαστικά στον άξονα y'y που είναι παράλληλος στο μετατρόχιο του οχήματος
- f_{xi} : οι δυνάμεις που δρουν στον διαμήκη άξονα του κάθε ελαστικού
- f_{yi} : οι δυνάμεις που δρουν στον εγκάρσιο άξονα του κάθε ελαστικού

Οι παρακάτω εξισώσεις αφορούν τις δυνάμεις πέδησης του οχήματος:

$$f_{x1} = f_{x2} = \sigma F_b / 2 \quad (12a)$$

$$f_{x3} = f_{x4} = (1 - \sigma) F_b / 2 \quad (12b)$$

όπου

- σ είναι ο συντελεστής κατανομής (ο οποίος εξαρτάται από το εκάστοτε όχημα)
- και F_b είναι η συνολική δύναμη πέδησης.

Η δύναμη f_{yi} υπολογίζεται κάνοντας χρήση των απλοποιημένων εξισώσεων Pacejka Magic Tire Formula[44],[30]:

$$f_{yi} = \sqrt{(\mu_i F_{zi})^2 - f_{xi}^2} \sin(C_i \arctan(B_i a_i)) \quad (13)$$

Όπου τα B_i , C_i υπολογίζονται με τη χρήση πειραματικών δεδομένων.[30]

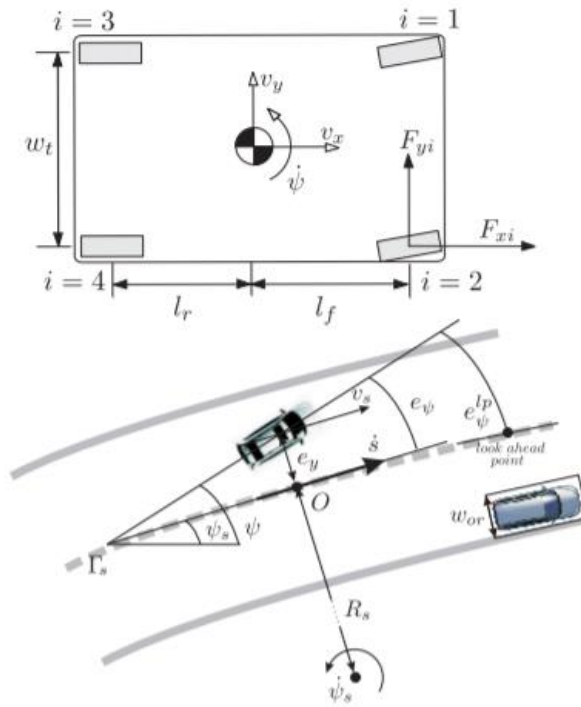
Οι γωνίες ολίσθησης κάθε ελαστικού δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\alpha_1 = (vy + lf \psi) / (vx - \frac{wt}{2} \psi) - \delta \quad (14)$$

$$\alpha_2 = (v_y + l_f \dot{\psi}) / (v_x + \frac{w_t}{2} \dot{\psi}) - \delta \quad (15)$$

$$\alpha_3 = (v_y - l_r \dot{\psi}) / (v_x - \frac{w_t}{2} \dot{\psi}) \quad (16)$$

$$\alpha_4 = (v_y - l_r \dot{\psi}) / (v_x + \frac{w_t}{2} \dot{\psi}) \quad (17)$$



ΣΧΗΜΑ 3-1: MODELING NOTATION[30]

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΩΔΙΚΑ

Η μοντελοποίηση του συστήματος έγινε με χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος Matlab®. Το *matrix laboratory*, όπως είναι το πλήρες όνομά του, είναι ένα διαδραστικό περιβάλλον ανάπτυξης/περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής τεχνικής και συγχρόνως μια προγραμματιστική γλώσσα υψηλού επιπέδου τέταρτης γενιάς. Το Matlab® επιτρέπει την ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων είτε με γραφή κώδικα (script), είτε με απευθείας γραφική διασύνδεση οντοτήτων στο περιβάλλον προσομοίωσης Simulink®[51]. Ο κώδικας βασίζεται στη μαθηματική γλώσσα περιγραφής του Matlab®. Για τη μοντελοποίηση του οχήματος επιλέχθηκε η απευθείας γραφή κώδικα στην υποστηριζόμενη γλώσσα προγραμματισμού από το Matlab®,

δεδομένου ότι αυτό επιτρέπει μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας στην περιγραφή, χωρίς τη δέσμευση έτοιμων μοντέλων και συστημάτων από βιβλιοθήκες. Για τον προβλεπτικό έλεγχο χρησιμοποιήθηκε επίσης κώδικας, ενώ έγινε και χρήση της έτοιμης συνάρτησης του Matlab® 'fmincon'.

Όσον αφορά τη λειτουργία του κώδικα, χρησιμοποιούνται 2 εξωτερικές συναρτήσεις για την επίτευξη καλύτερης προγραμματιστικής οργάνωσης.

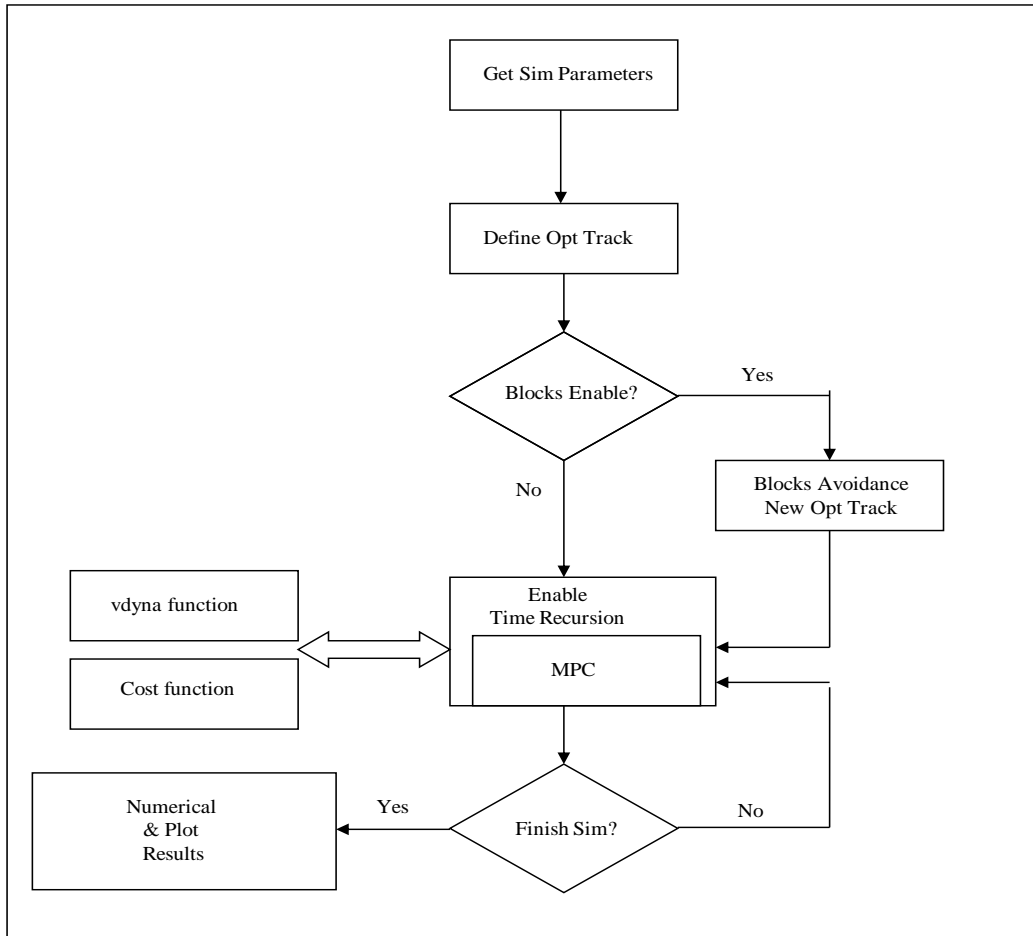
Έτσι, με βάση τα παραπάνω ο κώδικας αποτελείται από συνολικά 3 υπο-ρουτίνες:

- Δυναμικές Εξισώσεις Κινηματικής Οχήματος
- Συνάρτηση Κόστους για τους υπολογισμούς του MPC ελεγκτή
- Υλοποίηση Μη- Γραμμικού Προβλεπτικού ελεγκτή (βασικό τμήμα κώδικα)

Εξαιτίας του πλήθους των λειτουργιών του, το βασικό τμήμα κώδικα είναι οργανωμένο σε τμήματα (code segments), όπως φαίνεται και στο Παράρτημα Α, για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης και της παρακολούθησής του. Ο κώδικας οργανωτικά χωρίζεται στα ακόλουθα τμήματα:

- Τμήμα παραμέτρων μοντέλου (parameters section)
- Τμήμα επιλογής τροχιάς (definition of track)
- Τμήμα για τον καθορισμό των διεργασιών αποφυγής εμποδίων (block avoidance section)
- Τμήμα χρονικής αναδρομικής λειτουργίας μοντέλου (Time recursion section)
- Τμήμα υλοποίησης Μη-γραμμικού προβλεπτικού ελεγκτή (Non-Linear MPC section)
- Τμήμα υπολογισμού και εκτίμησης σφαλμάτων τροχιάς (Track Error Checking Section)
- Τμήμα Γραφικών και Αριθμητικών Απεικονίσεων Μεταβλητών (Plot Section)

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής(flow chart) το οποίο αναπαριστά γραφικά τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε:



ΣΧΗΜΑ 3-2: FLOW CHART

Στις ενότητες που ακολουθούν θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι λειτουργίες όλων των τμημάτων κώδικα του μοντέλου, καθώς και οι περιγραφές των συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται.

3.2.1 ΤΜΗΜΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – PARAMETERS SECTION

Στο τμήμα αυτό του κώδικα ορίζονται οι παράμετροι με τις τιμές που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου ως προς τη διαδικασία της προσομοίωσης. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τη χρονική διάρκεια των προσομοιώσεων, τις παραμέτρους κερδών των ελεγκτών για τις εισόδους του συστήματος, Boolean μεταβλητές για τη λειτουργία του MPC, και την ενεργοποίηση ή όχι των εμποδίων στον κώδικα. Αναλυτικά οι παράμετροι παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 3-1: Παρουσίαση των παραμέτρων του μοντέλου οχήματος

Παράμετρος	Σημασία
Tf(sec)	Η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης
dt(sec)	Η παράμετρος αυτή ορίζει τα βήματα της χρονικής διαμέρισης για τη διαδικασία διακριτοποίησης του χρόνου προσομοίωσης. Τα χρονικά βήματα είναι σταθερά.
Tc	Χρονικός Ορίζοντας Ελέγχου (Control Horizon) του MPC, ο οποίος ορίζει το πλήθος σημείων υπολογισμού ελέγχου για τον MPC μέσω της σχέσης T_c/dt .
Tr	Χρονικός Ορίζοντας Δράσης (Activation Horizon) του MPC. Ο ορίζοντας δράσης ορίζει το πλήθος σημείων δράσης του MPC μέσω της σχέσης T_r/dt .
K1, K2, K3	Κέρδη των ελεγκτών για τις 3 εισόδους του μοντέλου του οχήματος : u1 (Γωνία Εκτροπής του Τιμονιού του Οχήματος – σε rad), u2 (Δύναμη Πέδησης του Οχήματος – σε Nt), u3 (Δύναμη Επιτάχυνσης του Οχήματος – σε Nt). Οι συντελεστές κερδών του ελεγκτή K1, K2, K3 επιδρούν πολλαπλασιαστικά αντίστοιχα σε κάθε είσοδο του μοντέλου, διαμορφώνοντας το τελικό διάνυσμα εισόδου (u) για το σύστημα.
nmpc_cont_actv	Η συγκεκριμένη Boolean μεταβλητή (y/n) επιλέγει την ενεργοποίηση του ελεγκτή. Για την τιμή 'y' ο Ελεγκτής ενεργοποιείται σε κάθε χρονικό σημείο της προσομοίωσης, εκτελώντας τους υπολογισμούς, μέσω της συνάρτησης κόστους. Εάν η μεταβλητή τεθεί σε τιμή 'n', ο Ελεγκτής ενεργοποιείται μόνο μία φορά στο πλήθος των καθοριζομένων σημείων του ορίζοντα δράσης (Tr) και η δράση του επιβάλλεται σε όλα τα σημεία του ορίζοντα (ελέγχου και πρόβλεψης).
nmpc_use_lastc	Η συγκεκριμένη Boolean μεταβλητή (y/n) επιλέγει τη χρήση των εντολών ελέγχου οι οποίες έχουν προκύψει. Στην περίπτωση που η μεταβλητή έχει τεθεί σε τιμή 'y', τότε σε όλο το χρονικό παράθυρο πρόβλεψης του ορίζοντα χρησιμοποιείται η τελευταία εκτιμώμενη είσοδος δράσης από τον ορίζοντα ελέγχου (Tc). Εάν η μεταβλητή τεθεί σε τιμή 'n', τότε σε κάθε χρονικό σημείο δράσης οι εντολές εισόδου είναι διαφορετικές και ανακύπτουν από τους υπολογισμούς του MPC οι οποίοι αφορούν τα προηγούμενα έως το τρέχον σημείο του ορίζοντα ελέγχου.
sel_track	Η μεταβλητή λαμβάνει τις τιμές 1 – 4, δηλαδή μία από τις προκατασκευασμένες τροχιές που χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις. Οι τιμές αντιστοιχούν σε: (1) Τροχιά Γραμμικών Τμημάτων (2) Τροχιά U-Turn (3) Τροχιά Fish Hook (4) Τροχιά τύπου S.

blocks_enable	Η συγκεκριμένη Boolean μεταβλητή (y/n), ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την εισαγωγή εμποδίων στην επιλεγείσα τροχιά.
b_xstart b_xstop b_ystart b_ystop	Τα διανύσματα ορίζουν τις συντεταγμένες αρχής και τέλους ενός εμποδίου κατά τους άξονες συντεταγμένων x και y. Τα δύο πρώτα διανύσματα ορίζουν την αρχή και το τέλος - μήκος του εμποδίου ως προς τον άξονα x, ενώ τα άλλα δύο διανύσματα ορίζουν το πλάτος του εμποδίου κατά τον άξονα y. Τα διανύσματα επιτρέπουν την εισαγωγή οποιουδήποτε πλήθους εμποδίων.
s_plot	Η συγκεκριμένη Boolean μεταβλητή (y/n), επιλέγει εάν οι γραφικές παραστάσεις θα γίνουν με βάση το χρόνο (t) ή τη διανυόμενη απόσταση (s). Εάν η παράμετρος τεθεί σε τιμή 'y', οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται συναρτήσει του μήκους. Εάν η παράμετρος τεθεί σε τιμή 'n', τότε οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης t.

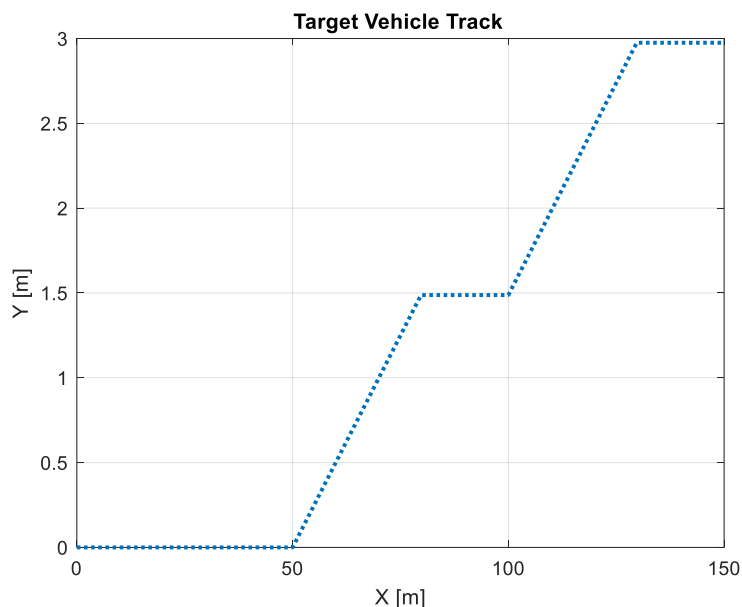
Η χρήση των παραμέτρων καθορίζεται από το χρήστη, εξαρχής και πριν την εκτέλεση του κώδικα από το περιβάλλον Matlab ®. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει οποιαδήποτε από τις παραπάνω παραμέτρους, δίνοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης πολύπλοκων σεναρίων.

3.2.2 ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ - TARGET TRACK

Σε αυτό το τμήμα του κώδικα ορίζονται οι προκαθορισμένες τροχιές (Target tracks), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με την επιλογή του χρήστη, για τον έλεγχο των επιδόσεων του οχήματος υπό τη δράση του Ελεγκτή MPC. Οι προκαθορισμένες τροχιές καθορίζονται με χρήση της μεταβλητής sel_track, η οποία μπορεί να λάβει τιμές από 1 - 4, αν και υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας κώδικα για τον ορισμό επιπλέον τροχιών. Αναλυτικά στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι τροχιές που κατασκευάζονται σε αυτό το τμήμα του κώδικα:

Τροχιά Ευθυγράμμων Τμημάτων - Linear Segments Track:

Αυτή η τροχιά αποτελείται από 5 διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα, διαφορετικής διεύθυνσης, τα οποία εκτελούν μεταβάσεις κατά την y διεύθυνση ενώ άλλα τμήματα είναι μηδενικής κλίσης (παράλληλα με τον άξονα x). Η μορφή της τροχιάς παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



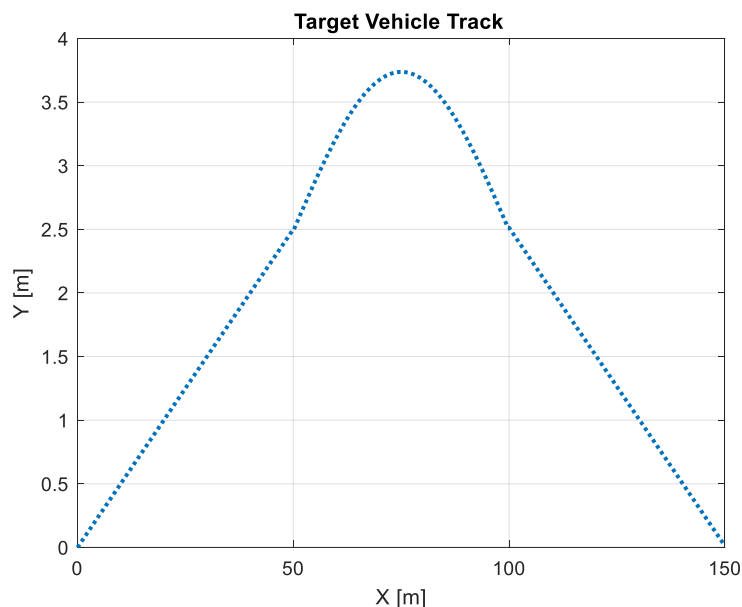
ΣΧΗΜΑ 3-3: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1, το όχημα αρχικά κινείται σε ευθεία με μηδενική κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα για διάστημα 85m. Κατόπιν, κινείται με κλίση 65 μοιρών ως προς τον άξονα x, για 45m. Στη συνέχεια, η κλίση γίνεται ξανά μηδενική για 40m, πριν γίνει και πάλι 65 μοίρες, για τα επόμενα 45m. Τέλος, η κλίση γίνεται ξανά μηδενική για τα τελευταία 35m.

Η τροχιά αυτή είναι κατάλληλη για τον έλεγχο παρακολούθησης της τροχιάς, δεδομένου ότι το όχημα αναγκάζεται να μεταβάλλει την αρχική τροχιά του σε αλλαγή κλίσεως με γραμμική διαβάθμιση. Επιπλέον, η τροχιά είναι κατάλληλη για την εισαγωγή εμποδίων και για τον έλεγχο της ικανότητας ελιγμών που επιτυγχάνονται μέσω των εντολών από τον MPC ελεγκτή, καθώς περιέχει ευθύγραμμα τμήματα. Να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία τα εμπόδια συχνά τοποθετούνται σε ευθείες[30],[31].

Τροχιά Αναστροφής - U-turn Track:

Η τροχιά αυτή χρησιμοποιείται για τη μελέτη της ικανότητας αναστροφής του οχήματος. Στην τροχιά αυτή το όχημα εισέρχεται σε στροφή μεταβολής κλίσης όπου η κλίση εξόδου είναι σχεδόν αντίστροφη της κλίσεως εισόδου (U-turn). Η μορφή της τροχιάς παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

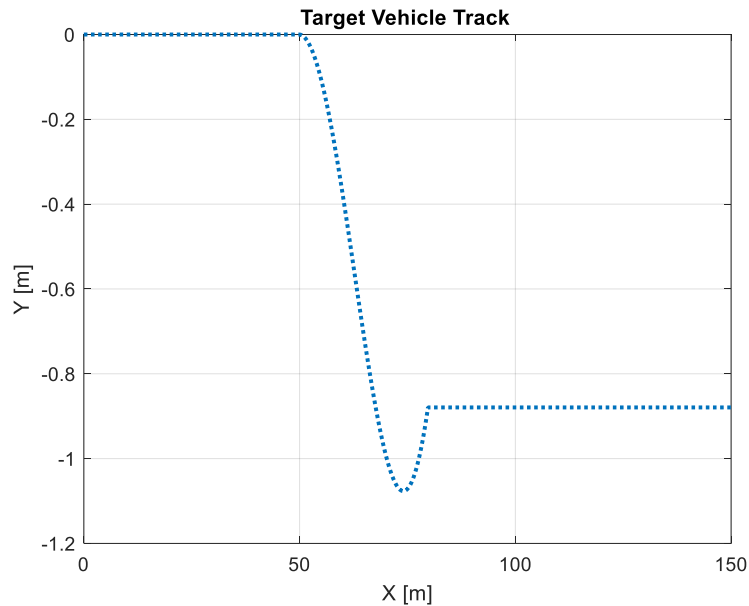


ΣΧΗΜΑ 3-4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ U-TURN

Η συγκεκριμένη τροχιά εκτελεί αναστροφή κατεύθυνσης της κίνησης του οχήματος και αποτελεί ένα συνηθισμένο τμήμα οδικής μεταβολής για τους δρόμους κίνησης των οχημάτων[52]. Η τροχιά του οχήματος προοδευτικά αλλάζει κλίση με στόχο να επιτύχει κατά την τελική έξοδο αντίθετη κατεύθυνση κίνησης από αυτήν της εισερχόμενης φάσης. Η τροχιά αυτή είναι κατάλληλη για τη μελέτη παρακολούθησης της συμπεριφοράς του οχήματος, δεδομένου ότι αυτό αναγκάζεται σε διαρκή αλλαγή κατεύθυνσης από την είσοδο στην έξοδο της τροχιάς, ελέγχοντας έτσι την επάρκεια εντολών από τον MPC ελεγκτή.

Τροχιά Αγκίστρι – Fish-Hook Track:

Στην τροχιά αυτή το όχημα εισέρχεται σε ημιτονική μεταβολή κατά ένα τμήμα, ενώ στο τέλος αυτής της μεταβολής αποκαθιστά την κίνηση του σε μία οριζόντια τροχιά. Η παραγόμενη τροχιά, σχηματικά μοιάζει με ένα αγκίστρι (Fish-Hook). Η μορφή της τροχιάς παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

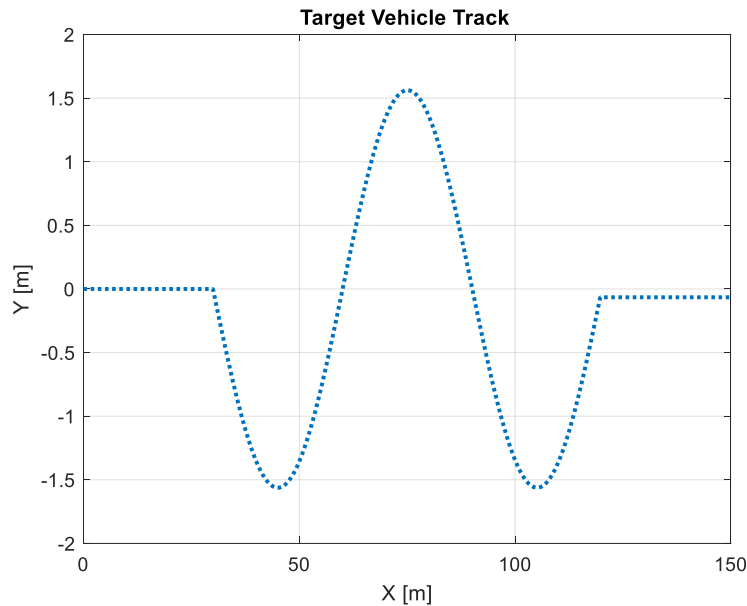


ΣΧΗΜΑ 3-5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ FISH HOOK

Η συγκεκριμένη τροχιά αποτελείται από ένα αρχικό οριζόντιο τμήμα, το οποίο φτάνει μέχρι τα 85m. Στη συνέχεια για την παρακολούθηση της τροχιάς το όχημα υπόκειται σε μία ημιτονική μεταβολή βύθισης η οποία συνεχίζει μέχρι ένα κατώτατο σημείο, το οποίο βρίσκεται στα 120m. Η ημιτονική μεταβολή το εξαναγκάζει σε διαρκή μεταβολή κλίσης. Μετά την ολοκλήρωση αυτού του τμήματος η τροχιά αποκαθίσταται ημιτονικά αυξανόμενη μέχρι ένα σημείο χαμηλότερου πλάτους, το οποίο εντοπίζεται στα 130m. Κατόπιν, και για τα επόμενα τελευταία 120m, η τροχιά παρατηρείται ευθεία, με μηδενική κλίση ως προς τον άξονα x. Η τροχιά αυτή συνδυάζει γρήγορες ημιτονικές μεταβολές μειούμενης και αυξανόμενης κλίσεως, με τελικό οριζόντιο τμήμα μηδενικής κλίσης. Για το λόγο αυτό θεωρείται κατάλληλη για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του οχήματος ενώ υπόκειται σε εντολές εισόδου από τον MPC ελεγκτή.

Τροχιά Τύπου S – S Track:

Στην τροχιά αυτή το όχημα αναγκάζεται σε 5 αλληπάλληλες και διαρκείς αλλαγές κατευθύνσεων κατά την κίνηση του στο δρόμο με την μορφή ενός S. Η μορφή της τροχιάς παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 3-6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΥΠΟΥ S

Όπως είναι προφανές από το παραπάνω σχήμα, η τροχιά αυτή ξεκινά με ένα ευθύγραμμο τμήμα για τα πρώτα 50m της τροχιάς. Στη συνέχεια, υπόκειται σε μία ημιτονική μεταβολή, διάρκειας 200m. Φτάνοντας στο τρίτο και τελευταίο τμήμα της τροχιάς, βρίσκεται ένα ευθύγραμμο τμήμα 50m. Η συγκεκριμένη τροχιά αποτελείται από διαρκείς και αλλεπάλληλες μεταβολές. Η μορφή αυτής της τροχιάς είναι επίσης συνηθισμένη στους δρόμους κίνησης οχημάτων, είτε κατά τη φάση ελιγμών για την αποφυγή εμποδίων. Η τροχιά αυτή αποτελεί επίσης μία τροχιά προς επιλογή για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ελεγκτή MPC.

3.2.3

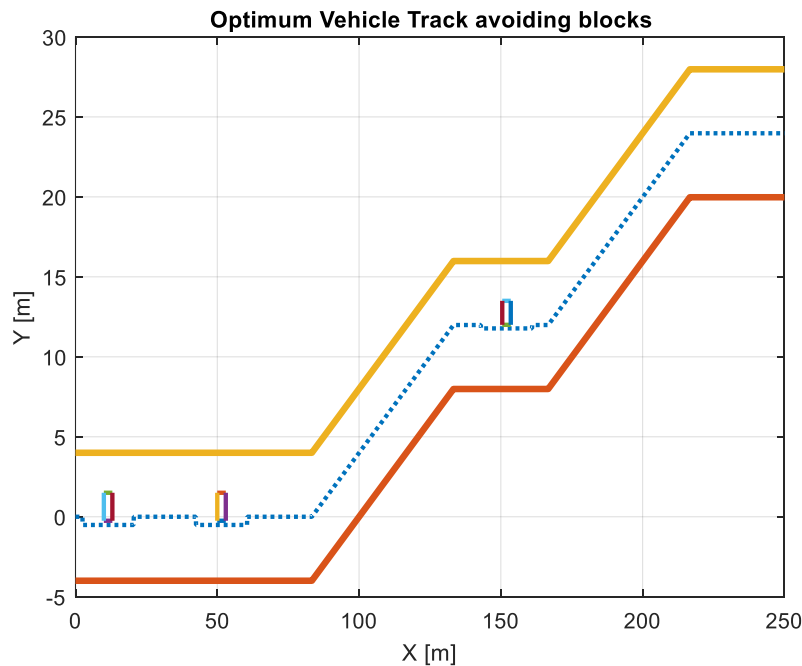
ΤΜΗΜΑ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΕΜΠΟΔΙΩΝ – BLOCK AVOIDANCE SECTION

Το τμήμα αποφυγής εμποδίων του κώδικα, ενεργοποιείται στην περίπτωση που ο χρήστης έχει επιλέξει την εισαγωγή εμποδίων στην τροχιά του οχήματος. Η ενεργοποίηση της τοποθέτησης των εμποδίων γίνεται με χρήση της Boolean μεταβλητής `blocks_enable` σε τιμή 'y'. Η τοποθέτηση των εμποδίων στην τροχιά, γίνεται με τη χρήση των διανυσμάτων `b_xstart`, `b_xstop`, `b_ystart` και `b_ystop`. Τα δύο πρώτα διανύσματα ορίζουν την, κατά τον x άξονα, θέση ενός εμποδίου (σημείο αρχής και τέλους εμποδίου) ορίζοντας κατά τον τρόπο αυτό το μήκος του εισερχόμενου εμποδίου στην τροχιά. Τα δύο τελευταία διανύσματα ορίζουν κατά ανάλογο τρόπο την τοποθέτηση του εμποδίου κατά τον y – άξονα (σημείο αρχής και τέλους εμποδίου), ορίζοντας κατά τον τρόπο αυτό το πλάτος του εισερχόμενου εμποδίου στην τροχιά. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τοποθετήσει στην τροχιά οποιοδήποτε αριθμό εμποδίων.

Μετά την ενεργοποίηση και εισαγωγή των εμποδίων από το χρήστη, ο κώδικας του συγκεκριμένου τμήματος, εντοπίζει τα εμπόδια και παραλλάσει την αρχική επιθυμητή τροχιά (Target track που έχει επιλεγεί από τη μεταβλητή `sel_track`), με μία νέα η οποία έχει ως στόχο

την αποφυγή αυτών των εμποδίων. Έτσι παράγεται μία νέα τροχιά η οποία μοιάζει με την αρχική, αλλά αποφεύγοντας τα εμπόδια που έχουν εισαχθεί. Στην φάση αυτή το σύστημα θα εκτελέσει τη διαδικασία προσομοίωσης με σκοπό να επιτύχει όσο το δυνατόν καλύτερα την κίνηση του οχήματος επί της νέας τροχιάς.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται η εισαγωγή 3 εμποδίων μήκους 3 m και πλάτους 1.75 m για το καθένα, επί της γραμμικής τροχιάς που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τα εμπόδια στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουν τοποθετηθεί στις θέσεις 10, 50 και 150m.



ΣΧΗΜΑ 3-7: ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΜΠΟΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Στο σχήμα παρουσιάζεται η τροχιά γραμμικών τμημάτων ($sel_track = 1$) με 3 εισερχόμενα εμπόδια. Από το τμήμα του κώδικα αποφυγής εμποδίων (`block avoidance`), παρατηρείται ότι η αρχική γραμμική τροχιά, παραλλάσσεται, με στόχο την αποφυγή των εισερχομένων εμποδίων. Η παραγόμενη τροχιά αποτελεί τη νέα βέλτιστη τροχιά προς εκτέλεση από τον MPC-ελεγκτή. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η νέα τροχιά αποτελείται από απότομες μεταβάσεις οι οποίες συντελούνται για την αποφυγή των εμποδίων. Ο κώδικας στο σημείο αυτό προβλέπει τη διαδικασία εκκίνησης αποφυγής του εμποδίου νωρίτερα από το ίδιο το εμπόδιο, με στόχο να δώσει στον ελεγκτή τον απαιτούμενο χρόνο αντίδρασης για την επίτευξη της νέας τροχιάς. Η λειτουργία αυτή είναι ανάλογη της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς ενός οδηγού, ο οποίος αντιδρά με αλλαγή της τροχιάς του οχήματος, όταν στο οπτικό πεδίο του αντιληφθεί την ύπαρξη του εμποδίου. Στο σχήμα επιπλέον της νέας τροχιάς παρουσιάζονται και τα όρια του δρόμου κίνησης (έντονες περιμετρικές γραμμές ορίων). Μετά την εκτέλεση των σεναρίων (`test cases`) θα παραχθεί και η πραγματική τροχιά κίνησης του οχήματος, η οποία επιτυγχάνεται με τη δράση του MPC-ελεγκτή.

Η λειτουργία του τμήματος του κώδικα αποφυγής εμποδίων βασίζεται στη χρήση δύο εσωτερικών παραμέτρων, τις bx_h και by_h . Οι εσωτερικές αυτές παράμετροι θέτουν τα όρια «χωρικής» αντίδρασης για την επίτευξη της νέας τροχιάς που αποφεύγει τα εμπόδια. Η παράμετρος bx_h βασίζεται στο μήκος του εμποδίου και στην ταχύτητα κίνησης του οχήματος κατά τον x-άξονα και καθορίζεται από τον τύπο:

$$bx_h(b) = (opt_Vx/2) * (b_xstop(b) - b_xstart(b)) \quad (20)$$

Η παράμετρος by_h βασίζεται στο πλάτος αποφυγής του εμποδίου το οποίο προκύπτει από τη σχέση:

$$by_h(b) = 0.3 * (b_ystop(b) - b_ystart(b)) \quad (21)$$

Ο έλεγχος αποφυγής αρχίζει τη δράση του από τον εντοπισμό του εμποδίου - bx_h και συνεχίζει τη δράση του μέχρι το τέλος του εμποδίου + bx_h . Εάν κατά τη φάση αυτής της συνθήκης δεν ανιχνεύεται σύγκρουση με το εμπόδιο, ο κώδικας διατηρεί την x-κατεύθυνση της τροχιάς χωρίς εκτροπή. Σε αντίθετη περίπτωση, ο κώδικας ελέγχει εάν το εμπόδιο μπορεί να αποφευχθεί καλύτερα (δηλ, με ελάχιστη αλλαγή τροχιάς) με κίνηση προς τα κάτω, ή εναλλακτικά εξετάζει τη δυνατότητα αλλαγής τροχιάς με κίνηση προς τα πάνω (κατά την y-διεύθυνση κίνησης).

Με τις συνθήκες αυτές παράγεται η νέα τροχιά για την αποφυγή των εμποδίων.

3.2.4

ΤΜΗΜΑ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΝΑΔΡΟΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο τμήμα αυτό του κώδικα εκτελείται ολόκληρη η διαδικασία χρονικής προσομοίωσης για τη διάρκεια κίνησης του οχήματος. Η χρονική διάρκεια προσομοίωσης ορίζεται από τον χρήστη μέσω της παραμέτρου tf (sec). Ο χρόνος διακριτοποιείται με τη χρήση του χρονικού βήματος dt (sec). Επιπλέον, καθορίζονται και οι αρχικές συνθήκες του διανύσματος κατάστασης, με τις οποίες θα κληθεί η συνάρτηση του μοντέλου του οχήματος για την παραγωγή της χρονικής εξέλιξης του διανύσματος κατάστασης μέσω της συνάρτησης $vdyna()$.

Οι αρχικές ταχύτητες για τους x και y άξονες, εκτιμώνται από τα δύο πρώτα διαδοχικά σημεία της επιθυμητής τροχιάς. Το διάνυσμα κατάστασης θα λάβει υπ' όψιν του ως αρχικές συνθήκες, αυτές τις ταχύτητες $Vx0$, $Vy0$. Όπως φαίνεται και στο Παράρτημα με τον κώδικα, το διάνυσμα εισόδου έχει αρχική τιμή μηδέν για όλες τις εισόδους.

Στη συνέχεια, με τη χρήση του βρόχου επανάληψης, εκκινείται η διαδικασία της χρονικής προσομοίωσης για όλα τα προβλεπόμενα χρονικά σημεία (αυξανόμενου του χρόνου μετά τη διακριτοποίηση μέχρι το τελικό σημείο tf). Η νέα τιμή του διανύσματος κατάστασης προκύπτει από τη χρήση της συνάρτησης που περιγράφει το μοντέλο του οχήματος:

$$[x(:,i+1),fx(:,i+1),fy(:,i+1),ey(:,i+1)]=vdyna(x(:,i),u(:,i),dt);$$

Το διάνυσμα κατάστασης αποθηκεύει τις μεταβλητές του σε πίνακα με στήλες την χρονική στιγμή και γραμμές τις 5 μεταβλητές κατάστασης του συστήματος.

Κατόπιν αυτού, υπολογίζεται η τρέχουσα θέση της τροχιάς του οχήματος η οποία αποθηκεύεται στο δυσδιάστατο διάνυσμα track().

Εν συνεχεία, ο κώδικας υπολογίζει τις επιθυμητές ταχύτητες που το όχημα θα έπρεπε να είχε αναπτύξει κατά τις διευθύνσεις x και y. Ο κώδικας, με βάση τις Boolean μεταβλητές που έχουν τεθεί από το χρήστη για την nmpc_cont_actn, ενεργοποιεί τον MPC ελεγκτή. Η λειτουργία του MPC βασίζεται στη χρήση της συνάρτησης fmincon() του Matlab®. Η συνάρτηση αυτή αναζητά βέλτιστη λύση για μη γραμμικά συστήματα, που υπόκεινται σε περιορισμούς, με χρήση μίας επιθυμητής συνάρτησης κόστους.

Η fmincon() αποτελεί μία συνάρτηση που αναζητά σημεία ελαχίστου σε πολυπαραμετρικές συναρτήσεις οι οποίες ορίζονται ως κόστος, υπακούοντας σε πλήθος δεσμεύσεων και περιορισμών. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισοτικοί ή ανισοτικοί. Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση και τον εντοπισμό ελαχίστων σε μη γραμμικές συναρτήσεις (και περιορισμούς).

Η συνάρτηση βασίζεται σε χρήση διαφόρων αλγορίθμων ('interior-point', 'trust-region-reflective', 'sqp', 'sqp-legacy', 'active-set'). Ο βασικός αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται ως βασική επιλογή (default) είναι ο 'interior-point'. Οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να καθορισθούν κατά την κλήση της συνάρτησης με χρήση της ιδιότητας 'Algorithm'.

Οι μέθοδοι εσωτερικού σημείου ή μέθοδοι φραγμού είναι μια συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων γραμμικής και μη γραμμικής κυρτής βελτιστοποίησης. Η παραβίαση των περιορισμών της ανισότητας αποτρέπεται αυξάνοντας την αντικειμενική συνάρτηση κόστους (Objective function) με έναν όρο φραγμού που προκαλεί τη βέλτιστη μη περιορισμένη τιμή να παραμένει αποδεκτή στο χώρο επιλογών των μεταβλητών που διαθέτει το πρόβλημα.

Οι μέθοδοι εσωτερικού σημείου ταιριάζουν καλύτερα σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (σχεδιαστικές μεταβλητές). Οι μέθοδοι εσωτερικού σημείου είναι επίσης σχετικά απλές για να μπορούν να προγραμματισθούν (αλγοριθμικά).

Οποιοδήποτε πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) γραμμικής συνάρτησης πάνω από ένα κυρτό σετ. Οι μέθοδοι αυτές εξασφαλίζουν ότι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου είναι πολυωνυμικής πολυπλοκότητας στη διάσταση και την ακρίβεια της λύσης.[54],[55],[56]

Η κλήση της συνάρτησης παρουσιάζεται παρακάτω:

```
[u_opt,fval(i)]=fmincon(@(uh0)Cost(temp_cost,uh0,xh0,opt_trackh0,dt),uh0,A,B,Aeq,Beq,lb,ub);
```

Η συνάρτηση fmincon καλείται με ορίσματα εισόδου τη συνάρτηση κόστους (cost function), το τρέχον διάνυσμα εισόδων - uh0 και μία ομάδα πινάκων για την εφαρμογή περιορισμών

ανισοτήτων $Ax < b$ και ισοτήτων $Aeqx = beq$. Οι συγκεκριμένοι πίνακες εισάγουν τους περιορισμούς ανισοτήτων και ισοτήτων στη συνάρτηση κόστους. Στην συγκεκριμένη κλήση της οι πίνακες είναι κενοί, δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπάρχουν περιορισμοί αυτής της μορφής.

Τέλος, η συνάρτηση χρησιμοποιεί τα άνω και κάτω φράγματα u_b και l_b για το διάνυσμα εισόδου u , έτσι ώστε το επιθυμητό κόστος να υπόκειται στους περιορισμούς των διαθέσιμων εισόδων[1]. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

$$\begin{aligned}
 -0.7 \leq u(1) \leq 0.7 & \quad (22) & \quad \text{για την είσοδο κατεύθυνσης (steering)} \\
 -20111 \leq u(2) \leq 0 & \quad (23) & \quad \text{για την είσοδο πέδησης (braking force)} \\
 0 \leq u(3) \leq 20000 & \quad (24) & \quad \text{για την είσοδο επιτάχυνσης (acceleration force)}
 \end{aligned}$$

Ο MPC μετά την κλήση της συνάρτησης `fmincon()` επιστρέφει τη βέλτιστη είσοδο u_{opt} και για τις 3 συνιστώσες των εισόδων του συστήματος. Οι είσοδοι καταγράφονται και εφαρμόζονται στο σύστημα για την εξέλιξη της κίνησης του οχήματος. Η τελική δράση των εισόδων στο μοντέλο γίνεται αφού καθορισθούν οι επιλογές με τη Boolean μεταβλητής `nmprc_use_lastc`. Η τελευταία, εφόσον τεθεί σε τιμή 'y', θα διατηρήσει για όλες τις χρονικές στιγμές τη βέλτιστη τιμή εισόδων που έχει προκύψει μετά την επεξεργασία ολόκληρου του Ορίζοντα Ελέγχου (Control Horizon). Δηλαδή, για όλες τις τιμές του ορίζοντα πρόβλεψης, η είσοδος θα έχει την τιμή που επετεύχθη για τη χρονική στιγμή H_c . Αλλιώς, οι είσοδοι διαμορφώνονται και ενδεχομένως διαφοροποιούνται με βάση τις τιμές που έχουν επιτευχθεί σε κάθε κύκλο δράσης του MPC ελεγκτή.

Ο κώδικας της αναδρομής ενημερώνει τον χρήστη για την πρόοδο εκτέλεσης των υπολογισμών με οπτικά μηνύματα που περιλαμβάνουν, τους ορίζοντες ελέγχου και δράσης, καθώς και το επί τοις εκατό ποσοστό της επεξεργασίας της τροχιάς κίνησης.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

Linear Optimal Track
Current Vehicle Speed Vx - Vy (m/s)
4.9994 -0.0301

NMPC activated once every Hp cycles
Hc and Hp Calculation Horizon (points)
20 25

NMPC Calculation Progress on Track (%) .... /
1.0198
  
```

Σχήμα 3-8: Ενημέρωση προόδου εκτέλεσης κατά την προσομοίωση

Στη συνέχεια, οι είσοδοι για το μοντέλο προσδιορίζονται από τη δράση των κερδών (σταθερές) για κάθε μία είσοδο.

Ο κώδικας επιστρέφει στην εκτέλεση του επόμενου χρονικού βήματος μέσω του βρόχου επανάληψης, οπότε και επαναλαμβάνει τις εργασίες που περιγράφηκαν για το επόμενο χρονικό σημείο, κ.ο.κ.

Αυτό το τμήμα του κώδικα αποτελεί μέρος της αναδρομικής διαδικασίας υπολογισμών που περιγράφηκε παραπάνω (Παράρτημα Α). Ο MPC ελεγκτής καλείται σε ένα χρονικό σημείο να ενεργοποιηθεί, ανάλογα με την επιλογή που θα κάνει ο χρήστης.

Προτού επεξηγηθεί η λειτουργία αυτή, θα δώσουμε τους ορισμούς των παραμέτρων H_p και H_c . Η παράμετρος H_p θέτει τον ορίζοντα πρόβλεψης (δράσης) –Prediction Horizon του MPC σε πλήθος σημείων. Η τιμή του προκύπτει παίρνοντας το κάτω φράγμα του T_p (χρονική διάρκεια ορίζοντα πρόβλεψης), διαιρεμένο με το dt (βήμα χρονικής διαμέρισης).

Ο Ορίζοντας ελέγχου - Control Horizon ορίζεται από τη μεταβλητή H_c , η οποία αντίστοιχα προκύπτει από το κάτω φράγμα του T_c (χρονική διάρκεια ορίζοντα ελέγχου), διαιρεμένο με το dt (βήμα χρονικής διαμέρισης).

Η εσωτερική μεταβλητή `mrc_actn` ενεργοποιεί τον MPC ελεγκτή όταν η τιμή της είναι 1 ενώ τον αφήνει απενεργοποιημένο όταν η τιμή της είναι μηδέν.

Εάν ο χρήστης, από την επιλογή της Boolean μεταβλητής, θέσει την `nmrc_cont_actn` σε τιμή 'γ', τότε ο MPC ενεργοποιείται σε κάθε βήμα της διαδικασίας της χρονικής προσομοίωσης. Οι υπολογισμοί του θα βασιστούν σε ολόκληρο το παράθυρο του Ορίζοντα Ελέγχου. Εναλλακτικά θα ενεργοποιηθεί μία φορά στο παράθυρο του Ορίζοντα Πρόβλεψης (διαδικασία `modulo` τρέχοντος χρονικού σημείου και H_p). Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση ο ελεγκτής MPC θα ενεργοποιηθεί όσες φορές απαιτείται από το λόγο των συνολικών σημείων της προσομοίωσης διά το πλήθος σημείων του Ορίζοντα πρόβλεψης.

Προφανώς θα πρέπει πάντοτε να ισχύει ότι $H_c \leq H_p$. Οι δύο ορίζοντες (ελέγχου H_c – πρόβλεψης H_p) ρυθμίζουν τη συνολική λειτουργία του MPC ελεγκτή. Ο ορίζοντας πρόβλεψης ρυθμίζει κάθε πότε ενεργοποιείται ο ελεγκτής MPC, ενώ ο ορίζοντας ελέγχου ρυθμίζει το πλήθος των σημείων στο οποίο γίνονται οι υπολογισμοί. Κατόπιν, αφού ξεπεραστεί το τελευταίο σημείο του H_c , οι υπολογισμοί διατηρούνται μέχρι το τέλος του ορίζοντα H_p . Αυτό είναι χρήσιμο συνήθως σε υπολογισμούς που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο, όπου οι υπολογιστικοί πόροι είναι περιορισμένοι. Ένα μεγαλύτερο παράθυρο δράσης συνεπάγεται περισσότερους αριθμητικούς υπολογισμούς. Οι παραγόμενες εντολές ελέγχου u για το χρονικό τμήμα μεταξύ H_c+1 έως H_p καθορίζονται πάντοτε με χρήση της τελευταίας τιμής ελέγχου $u(H_c)$ που έχει παραχθεί από τους υπολογισμούς.

Ο μεγαλύτερος ορίζοντας πρόβλεψης εκτείνει περισσότερο την ικανότητα προβλέψεων στην επιθυμητή τροχιά συνεκτιμώντας πολλές μελλοντικές θέσεις. Από την άλλη πλευρά, ο ορίζοντας ελέγχου πρέπει να περιορίζεται σε ένα πλήθος σημείων το οποίο δεν απέχει σημαντικά από την τρέχουσα θέση του οχήματος. Αυτό διασφαλίζει ότι η πρόβλεψη γίνεται για σύντομο χρονικό διάστημα το οποίο διατηρεί μορφολογικά ίδια χαρακτηριστικά για τις θέσεις κίνησης της τροχιάς. Από τις διαδικασίες της προσομοίωσης αναζητήθηκαν οι βέλτιστοι καθορισμοί για τα χρονικά παράθυρα δράσης και για τους δύο ορίζοντες (H_c και H_p).

Γενικός στόχος είναι οι Ορίζοντες Ελέγχου και Πρόβλεψης να κρατηθούν σε λογικές τιμές σχετικά κοντά μεταξύ τους.

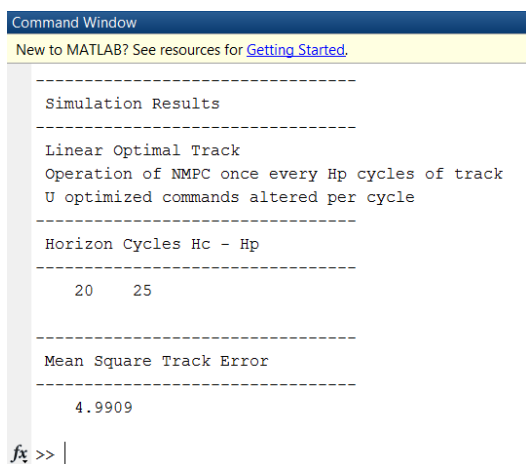
3.2.6 ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΤΡΟΧΙΑΣ – TRACK ERROR SECTION

Στο συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα, η διαδικασία χρονικής προσομοίωσης έχει ολοκληρωθεί. Η αποθήκευση της τροχιάς που έχει επιτευχθεί από το μοντέλο του οχήματος μετά τη δράση του ελεγκτή MPC γίνεται στο διάνυσμα `track()`. Η επιθυμητή τροχιά που θα εκτελεστεί από το όχημα είναι προ-αποθηκευμένη στο διάνυσμα `opt_track()` από το τμήμα του κώδικα που κατασκευάστηκε η επιθυμητή βέλτιστη τροχιά.

Το συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα υπολογίζει την «ευκλείδεια νόρμα» της απόστασης των δύο τροχιών και παράγει την απόσταση σφάλματος για κάθε σημείο της χρονικής προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα επιδεικνύονται γραφικά, αλλά και αριθμητικά, με χρήση της έτοιμης συνάρτησης `mse()` του Matlab®, η οποία υπολογίζει το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα από τα στοιχεία του διανύσματος `track_err()`.

3.2.7 ΤΜΗΜΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Στο αυτό το τμήμα του κώδικα υπολογίζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα μετά το τέλος της διαδικασίας προσομοίωσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα τυπώνονται στο παράθυρο αποτελεσμάτων (Command Window) του Matlab®, ενώ οι παραγόμενες γραφικές παραστάσεις αποτυπώνονται σε ξεχωριστά παράθυρα (figures). Ενδεικτικά παρουσιάζεται το παράθυρο εκτέλεσης μετά την ολοκλήρωση ενός σεναρίου:



```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

-----
Simulation Results
-----
Linear Optimal Track
Operation of NMPC once every Hp cycles of track
U optimized commands altered per cycle
-----
Horizon Cycles Hc - Hp
-----
    20    25
-----

Mean Square Track Error
-----
    4.9909
-----

fx >> |
```

Σχήμα 3-9: Παράθυρο Αποτελεσμάτων εκτέλεσης σεναρίου

Στο παράθυρο παρουσιάζεται ο τύπος της τροχιάς στον οποίο εκτελέστηκε η διαδικασία της προσομοίωσης (Linear Track). Το παράθυρο ενημερώνει για τον τρόπο ενεργοποίησης του MPC στο σενάριο (παράμετροι `nmprc_cont_actn` και `nmprc_use_lastc` σε τιμή 'n'). Επίσης, παρουσιάζονται οι αριθμητικές τιμές σε πλήθος σημείων για τους Ορίζοντες Ελέγχου και Δράσης αντίστοιχα ($H_c=20$ και $H_p=25$). Τέλος παρατίθεται η τιμή του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (MSE) που επιτεύχθηκε. Οι αριθμητικές πληροφορίες δίνουν μία συνοπτική εικόνα των αποτελεσμάτων.

Οι μεταβλητές του συστήματος που χρόνο-εξελίσσονται μέσω της προσομοίωσης απεικονίζονται και γραφικά. Η γραφική παράσταση γίνεται με χρήση των εντολών γραφικής απεικόνισης του Matlab®. Αναλυτικότερα, οι γραφικές παραστάσεις αφορούν τα παρακάτω μεγέθη:

- Επιθυμητή Τροχιά για το όχημα
- Τροχιά που έχει επιτευχθεί από το όχημα
- Επιθυμητή Τροχιά – Τροχιά Αποφυγής Εμποδίων – Πραγματική Τροχιά οχήματος σε κοινό διάγραμμα
- Σφάλμα μεταξύ Επιθυμητής και Πραγματικής Τροχιάς
- Διάνυσμα εισόδου $u(1)$
- Διάνυσμα εισόδου $u(2)$
- Διάνυσμα εισόδου $u(3)$
- Ταχύτητα Οχήματος κατά την x-διεύθυνση
- Ταχύτητα Οχήματος κατά την y-διεύθυνση

Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις γίνονται συναρτήσεως είτε του χρόνου (t), είτε της διανυόμενης απόστασης του οχήματος (s) με βάση την επιλογή του χρήστη στην παράμετρο `s_plot`.

Οι γραφικές παραστάσεις δίνουν μία αναλυτική εικόνα των διαδικασιών εξέλιξης, μέσω του συνολικού μοντέλου για όλη τη διάρκεια του σεναρίου. Η πληροφορία που παρέχεται για κάθε μέγεθος μπορεί να συνδυαστεί, αποκομίζοντας σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του μοντέλου του οχήματος καθώς και του MPC-ελεγκτή.

3.2.8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ – VDYNAM

Η μοντελοποίηση του οχήματος περιέχει έναν σημαντικό αριθμό από παραμέτρους που ορίστηκαν στη θεωρητική παρουσίαση του μοντέλου. Επιπρόσθετα, η μοντελοποίηση περιλαμβάνει τις δυναμικές μη γραμμικές εξισώσεις που διέπουν χρονικά την κίνηση του

οχήματος. Η μοντελοποίηση έχει γίνει με περιγραφή στο χώρο κατάστασης. Το διάνυσμα κατάστασης του οχήματος διαθέτει 5 συνιστώσες, ενώ το διάνυσμα εισόδου ορίζεται με χρήση των 3 εισόδων του συστήματος.

Πίνακας 3-2: Παράμετροι του μοντέλου οχήματος[30]

Παράμετρος	Τιμή	Ερμηνεία Παραμέτρου
M[Kg]	2050	mass of the vehicle
Jz[Kgm ²]	3344	yaw inertia of the vehicle
Lf[m]	1.43	distance from the vehicle center of gravity to the front
Lr[m]	1.47	distance from the vehicle center of gravity to the rear
sigma	0.7	constant (vehicle dependant) distribution parameter
wt[m]	1.63	disturbance vectors
mu	1	friction coefficient
B1	-10.5	parameter calibrated using experimental data
B2	-10.5	
B3	-12.7	
B4	-12.7	
C1	0.5	
C2	0.5	
C3	0.5	
C4	0.5	
g[m/s ²]	9.81	gravity acceleration
Fz1[N]	$(l_r * m * g) / (2 * (l_r + l_f))$	vertical forces
Fz2[N]	$(l_r * m * g) / (2 * (l_r + l_f))$	
Fz3[N]	$(l_f * m * g) / (2 * (l_r + l_f))$	
Fz4[N]	$(l_f * m * g) / (2 * (l_r + l_f))$	
c[m]	1.77	vehicle width
a[m]	2.12	distance of the center of gravity from the front vehicle bumpers
b[m]	2.66	distance of the center of gravity from the rear vehicle bumpers
alpha_min[deg]	$-4/180 * \pi$	Min slip angle of tire
alpha_max[deg]	$4/180 * \pi$	Max slip angle of tire
P_dist	0.75	Power distribution factor on axis ($0 \leq P_dist \leq 1$)

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι οι παράμετροι ρυθμίζουν τις αριθμητικές λεπτομέρειες για την κατανομή της μάζας του οχήματος, τις γεωμετρικές διαστάσεις του, το βάρος του, την πρόσφυση των ελαστικών, την κατανομή ισχύος στους άξονες, κλπ.

Με την κλήση του, το μοντέλο `vdyna()` απαιτεί ένα σύνολο από εξωτερικές μεταβλητές (ορίσματα εισόδου).

```
function [xn,fx,fy,ey]=vdyna(x,u,dt)
```

Η συνάρτηση δέχεται ως εισόδους την τρέχουσα τιμή του διανύσματος κατάστασης $x(t)$, το διάνυσμα εισόδων $u(t)$ καθώς και τη χρονική διαμέριση (βήμα) dt για την εκτέλεση των αριθμητικών υπολογισμών.

Αρχικά, το μοντέλο οχήματος ελέγχει την εφαρμογή των περιορισμών – δεσμεύσεων (constraints) για τις γωνίες ολίσθησης α και για τα 4 ελαστικά, προκειμένου το όχημα να μην κινδυνεύει να εκτραπεί της πορείας του. Η τιμή του περιορισμού ορίζεται στα 0.7 rad για δεξιά και 0.7 rad για αριστερή στροφή [30], αυτές όμως οι τιμές μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με το πρόβλημα που μελετάται. Στη συνέχεια, το μοντέλο υπολογίζει αναλυτικά την κατανομή των δυνάμεων κατά x και y αντίστοιχα στους 4 τροχούς του οχήματος. Οι δυνάμεις αυτές περιγράφονται από τα διανύσματα $[f_{x1}, f_{x2}, f_{x3}, f_{x4}]$ και $[f_{y1}, f_{y2}, f_{y3}, f_{y4}]$. Οι δυνάμεις αναλύονται με βάση το σύστημα κατεύθυνσης που οφείλεται στη στροφή του τιμονιού του οχήματος (είσοδος $u(1)$) οπότε υπολογίζονται αναλυτικά οι συνιστώσες των δυνάμεων από τη διαδικασία στροφής του συστήματος συντεταγμένων. Η ανάλυση ορίζει νέα διανύσματα για τους άξονες x και y αντίστοιχα $[F_{x1}, F_{x2}, F_{x3}, F_{x4}]$ και $[F_{y1}, F_{y2}, F_{y3}, F_{y4}]$.

Στη συνέχεια κατανέμεται μέσω της μεταβλητής P_dist , η ισχύς στους άξονες του οχήματος:

$$P_f = P_dist * u(3) \quad (25)$$

$$P_r = (1 - P_dist) * u(3) \quad (26)$$

Με διακριτοποίηση των εξισώσεων κατάστασης στο πεδίο του χρόνου υπολογίζονται οι νέες τιμές του διανύσματος κατάστασης που αναλογούν στην επόμενη χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Επομένως, μετά την κλήση της συνάρτησης `vdyna()` το μοντέλο έχει προσδιορίσει τις νέες μεταβλητές κατάστασης, καθώς και τις ασκούμενες δυνάμεις στους άξονες των τροχών σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες γωνιακές εκτροπές.

Το μοντέλο του οχήματος αποτελεί μία αυτόνομη συνάρτηση, η οποία ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά του μοντέλου σε παραμέτρους, εκτελεί εσωτερικά τους υπολογισμούς και αποδίδει τις νέες τιμές του διανύσματος κατάστασης. Η οργάνωση του μοντέλου του οχήματος σε μια αυτόνομη συνάρτηση, προσδίδει ευελιξία στους υπολογισμούς και δομικότητα στο συνολικό κώδικα.

3.2.9

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ MPC (COST.M)

Η συνάρτηση κόστους αποτελεί μία συνάρτηση στην οποία προσμετρούνται, μέσω καθορισμένης αριθμητικής σχέσης, οι επιδράσεις των μεταβλητών, διαμορφώνοντας έτσι ένα

κριτήριο αριθμητικής απόφασης (κόστος) για τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Σκοπός είναι η **ελαχιστοποίηση** της τιμής της παρακάτω συνάρτησης (συνάρτηση κόστους):

$$J = Rho \sum_{i=1}^{Hc} \|x(1:2,i) - xo(1:2,i)\| + \sum_{i=1}^{Hc} \|u(1:3,i)\|^2$$

Η συνάρτηση κόστους επιστρέφει το παραγόμενο κόστος, το οποίο χρησιμοποιείται από τη συνάρτηση `fmincon()` του Matlab® προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη τιμή του διάνυσματος εισόδου `u_opt`, για την εξέλιξη της κίνησης του οχήματος. Αναλυτικά η συνάρτηση κόστους `cost.m` καλείται με χρήση των παρακάτω ορισμάτων:

```
function z_val=Cost(tcost,u,x0,track0,opt_track0,dt)
```

Η συνάρτηση δέχεται ως πρώτο όρισμα το προσωρινό κόστος `tcost`, το οποίο έχει προκύψει από τη βελτιστοποίηση μέσω της `fmincon()` στα προηγούμενα χρονικά βήματα της διαδικασίας υπολογισμών. Επιπλέον, δέχεται το διάνυσμα εισόδου `u` και κατάσταση `x`, καθώς και τη βέλτιστη τροχιά `opt_track` και την τροχιά την οποία έχει μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή το όχημα (διάνυσμα `track`).

Στη συνέχεια, η συνάρτηση αυτή καλεί τη `vdyna()` και υπολογίζει το νέο διάνυσμα κατάστασης. Με αυτό υπολογίζει τη νέα θέση του οχήματος με το δοθέν διάνυσμα εισόδου, και στη συνέχεια υπολογίζει την «ευκλείδεια νόρμα» της τρέχουσας και επιθυμητής (βέλτιστης) θέσης.

Πιο συγκεκριμένα το κόστος υπολογίζεται από τις σχέσεις (Παράρτημα Α):

$$dist = ((posx - opt_track(1,1))^2 + (posy - opt_track(2,1))^2)^{0.5} \quad (27)$$

$$u_norm = (u(1)^2 + u(2)^2 + u(3)^2)^{0.5} \quad (28)$$

$$z_val = rho * (dist^2) + u_norm^2 + tcost \quad (29)$$

Το κόστος (`z_val`) αποτελείται από 3 όρους. Ο πρώτος όρος $rho * (dist^2)$ λαμβάνει υπ' όψιν την «ευκλείδεια» απόσταση μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής θέσης για το τρέχον σημείο της τροχιάς. Ο παράγοντας `rho`, αποτελεί εσωτερική σταθερά, οι οποία προσδιορίστηκε με πειραματικές δοκιμές για να καταστήσει αποδοτική τη δράση του παράγοντα στη συνάρτηση κόστους. Ο δεύτερος όρος u_norm^2 προσμετρά την επίδραση του πλάτους των εισόδων μέσω της «ευκλείδειας νόρμας» για το διάνυσμα διέγερσης `u`. Ο τρίτος παράγοντας `tcost` προσμετρά την επίδραση του κόστους από τα προηγούμενα βήματα εκτέλεσης της `fmincon()`. Η συνάρτηση επιστρέφει το υπολογισμένο συνολικό κόστος `z_val`, το οποίο από την `fmincon()` οδηγεί στον προσδιορισμό της βέλτιστης διέγερσης για το διάνυσμα εισόδου `u_opt`.

Για το μοντέλο του οχήματος, επιπλέον της παραμετροποιήσιμης μορφής του, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι υφίσταται επιπλέον περιορισμούς (constraints), οι οποίοι προέρχονται από τη φυσική λειτουργία του συστήματος. Οι περιορισμοί αφορούν στα παρακάτω:

Πίνακας 3-3: Περιορισμοί (Constraints) στη λειτουργία του φυσικού μοντέλου οχήματος για τη βελτιστοποίηση[30]

Μεταβλητή	Περιορισμός
Π1: Γωνία ολίσθησης πέλματος ελαστικού α	$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$
Π2: Πλευρική μετατόπιση e_y	$e_{y_{\min}} \leq e_y \leq e_{y_{\max}}$
Π3: Κίνηση οχήματος	Υποκείμενη στις εξισώσεις κατάστασης
Π4: Είσοδοι u	$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$
Π5: Μεταβολή Εισόδων u	$\Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}$

Οι περιορισμοί (Π1) και (Π2) έχουν επιβληθεί απευθείας στον κώδικα του μοντέλου `vdyna()`. Ο περιορισμός (Π3) εφαρμόζεται εγγενώς, δεδομένου ότι η κίνηση του οχήματος υπολογίζεται πάντοτε με χρήση των εξισώσεων κατάστασης της περιγραφής του μοντέλου. Ο περιορισμός (Π4) εφαρμόζεται κατά την κλήση της συνάρτησης βελτιστοποίησης `fmincon()`, με χρήση των διανυσμάτων φράγματος l_b και u_b αντίστοιχα. Ο περιορισμός (Π5) προκύπτει φυσικά από την εφαρμογή του περιορισμού (Π4), εφόσον διατηρηθούν τα όρια μεταβολής.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι το επιλυόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης με χρήση του MPC ελεγκτή, εκτός από τη φυσική παραμετροποίηση του συστήματος του οχήματος εισάγει επιπλέον αυτές τις δεσμεύσεις, οι οποίες επιδρούν σημαντικά στην αναζήτηση βέλτιστης λύσης.

Στην επόμενο Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τη διαδικασία προσομοίωσης του μοντέλου, σε επιλεγμένες τροχιές, καθορίζοντας τους ορίζοντες ελέγχου και δράσης για το συνολικό σύστημα. Στόχος είναι η επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος ως προς την επιλογή των κατάλληλων εισόδων u , με στόχο την παρακολούθηση των επιθυμητών τροχιών κίνησης και την αποτελεσματική αποφυγή των εμποδίων.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ενδεικτικά τροχιές, οι οποίες καθορίστηκαν για τη διερεύνηση της λειτουργίας του προβλεπτικού ελεγκτή σε αυτόνομο όχημα. Οι τροχιές αυτές περιλάμβαναν γραμμικά τμήματα καθώς και τμήματα με μεταβαλλόμενες κλίσεις, με στόχο να ανιχνευθεί η ικανότητα παρακολούθησης που προκύπτει από τη λειτουργία του MPC ελεγκτή μέσω της παραγωγής των επιθυμητών σημάτων εισόδου (u_{opt}) από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Στο παρόν Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα των αντίστοιχων σεναρίων (test-cases). Επιπρόσθετα, θα αναλυθούν οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν οι τιμές των Οριζόντων Ελέγχου και Πρόβλεψης.

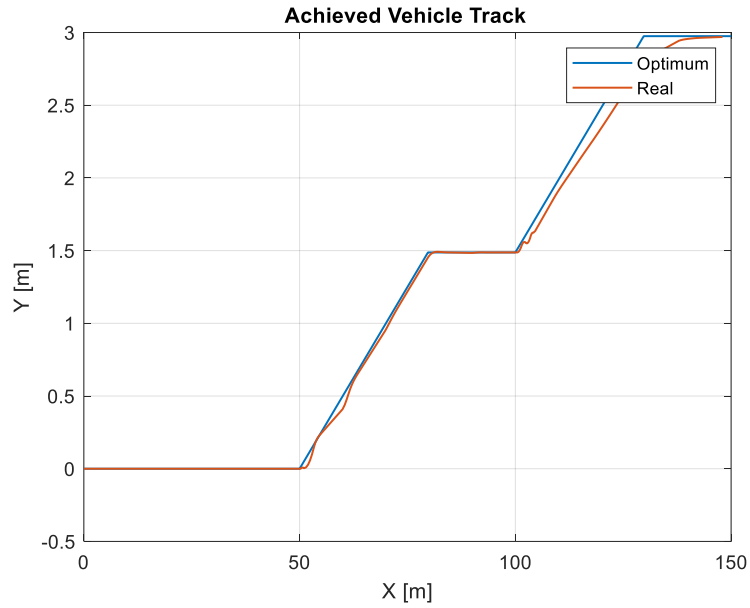
Τα σενάρια που εξετάστηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Σενάρια αποφυγής απόκλισης από τη λωρίδα και
- Σενάρια αποφυγής εμποδίων

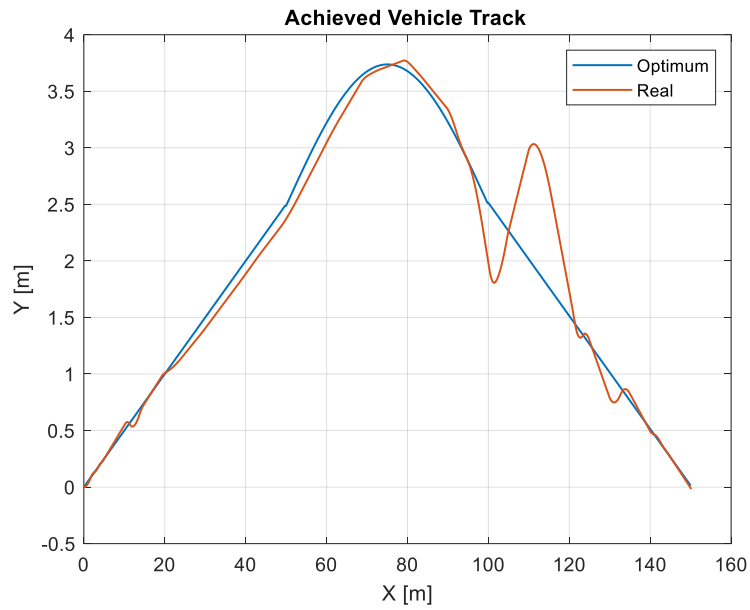
4.1 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ MPC - ΕΛΕΓΚΤΗ

Ο καθορισμός των παραμέτρων H_c και H_p (οριζόντων ελέγχου και δράσης αντίστοιχα) είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη συνολική λειτουργία του συστήματος μοντέλου οχήματος - MPC ελεγκτή. Οι τιμές επιλέχθηκαν με στόχο την καλύτερη δυνατή παρακολούθηση των τροχιών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η αύξηση των τιμών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του Ορίζοντα για τη λήψη αποφάσεων, αλλά παράλληλα και την αύξηση του υπολογιστικού φόρτου για την εκτέλεση των αριθμητικών υπολογισμών.

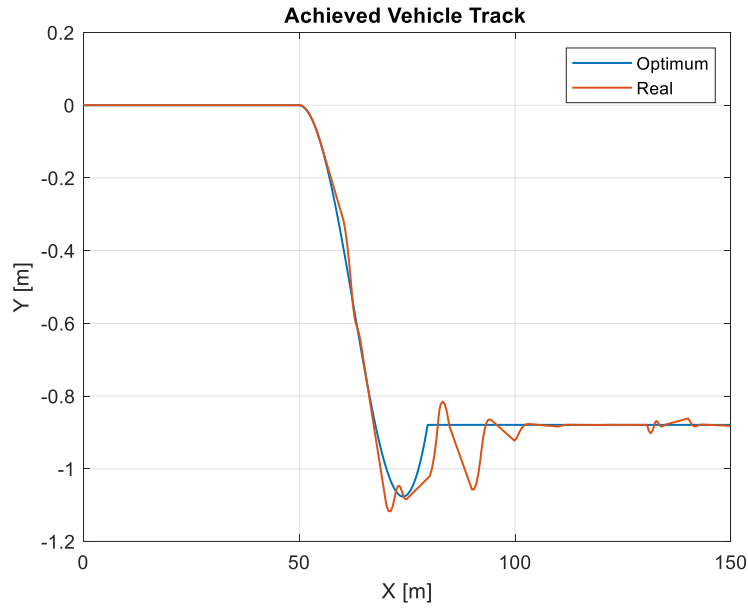
Στη συνέχεια, θα καταδειχθεί η επίδραση των παραμέτρων στην παρακολούθηση των τροχιών, επιλέγοντας τιμές $H_c = 20$ και $H_p = 40$, με εκλογή χρονικών διαστημάτων $T_c = 1$ και $T_p = 2$ sec αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα από την παρακολούθηση της κάθε τροχιάς παρουσιάζονται παρακάτω:



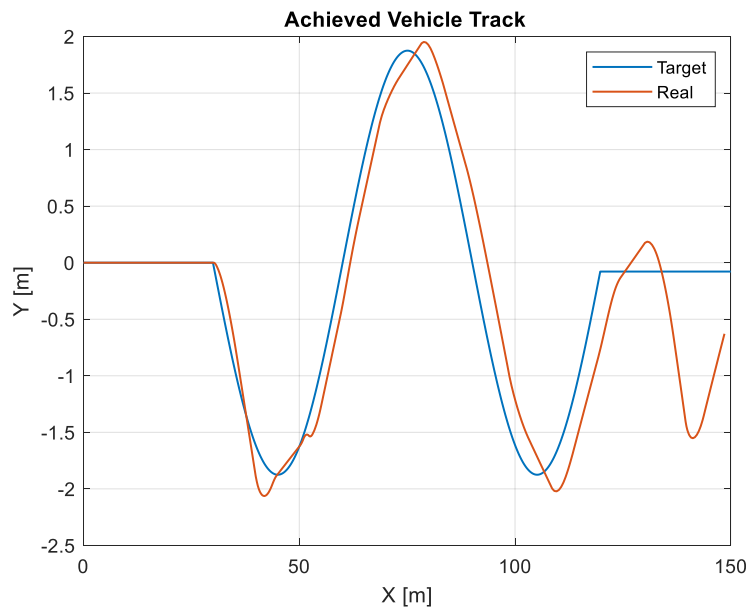
ΣΧΗΜΑ 4-1: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ (H_C=20 ΚΑΙ H_P=40)



ΣΧΗΜΑ 4-2: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ U-TURN ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ (H_C=20 ΚΑΙ H_P=40)



ΣΧΗΜΑ 4-3: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ FISH HOOK ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ($H_c=20$ ΚΑΙ $H_p=40$)

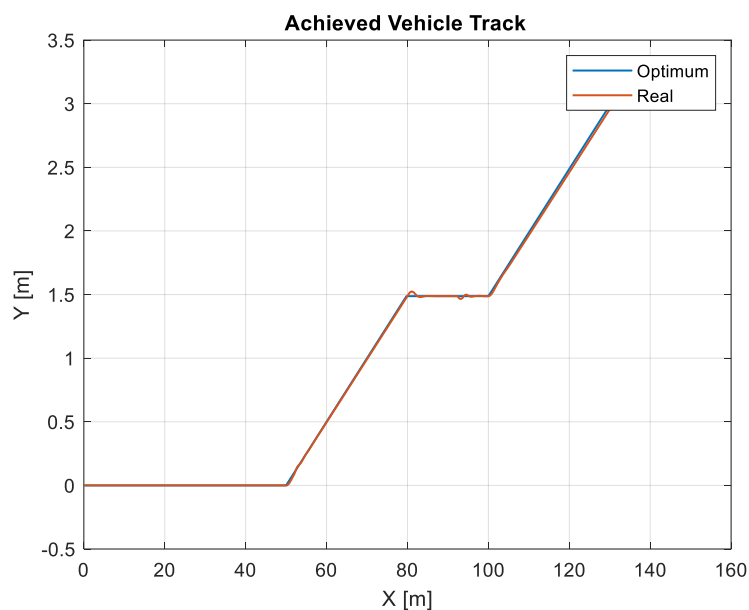


ΣΧΗΜΑ 4-4: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΥΠΟΥ S ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ($H_c=20$ ΚΑΙ $H_p=40$)

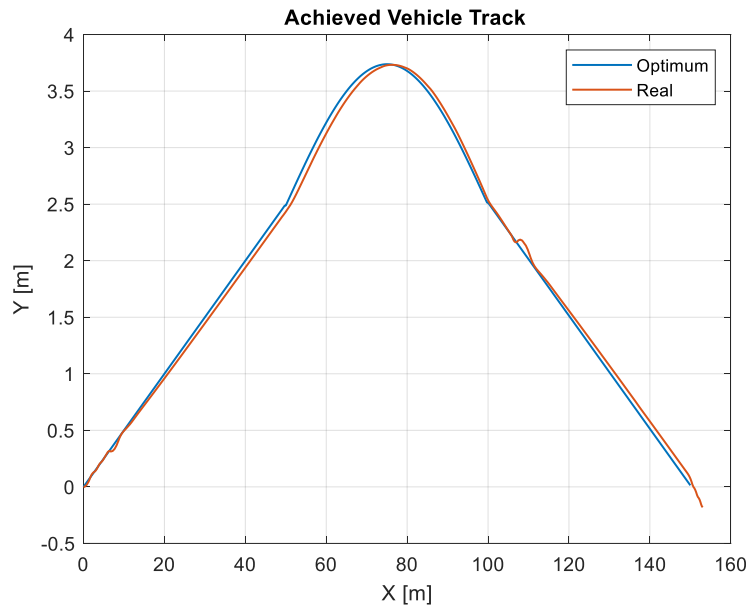
Από τα διαγράμματα, παρατηρείται ότι η ικανότητα παρακολούθησης της τροχιάς έχει μεταβληθεί σημαντικά. Η αύξηση του οριζοντα ελέγχου στα 20 σημεία, αναγκάζει τον MPC – ελεγκτή να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς του 20 σημεία, μέσα στον Ορίζοντα Πρόβλεψης

των 40 σημείων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τροχιά να έχει μεταβληθεί σημαντικά, και με τη σειρά του αυτό αναγκάζει τον ελεγκτή να επιλέξει μελλοντικές διορθωτικές δράσεις τροχιάς νωρίτερα από την απαιτούμενη χρονική στιγμή. Ο Ορίζοντας Πρόβλεψης των 40 σημείων, με βάση τη μοντελοποίηση του MPC – ελεγκτή, διατηρεί τις τιμές για τα σήματα εισόδου $u(t)$ ίδιες και σταθερές με αυτές που υπολογίστηκαν στο σημείο 20, για όλο το υπόλοιπο παράθυρο των σημείων 21 – 40. Αυτό γίνεται εμφανές για όλους τους τύπους των τροχιών που χρησιμοποιήθηκαν και στις κανονικές προσομοιώσεις, με τιμές αρχικά των οριζόντων $H_c = 15$ και $H_p = 15$. Σε καμία από τις τροχιές δεν παρατηρούμε ικανοποιητική συμπεριφορά από τον MPC – ελεγκτή και προφανώς, αφού τα χαρακτηριστικά διευθύνσεων και κλίσεων των τροχιών δεν άλλαξαν, αυτό που παρατηρείται οφείλεται εξολοκλήρου στις νέες τιμές των οριζόντων ελέγχου και πρόβλεψης.

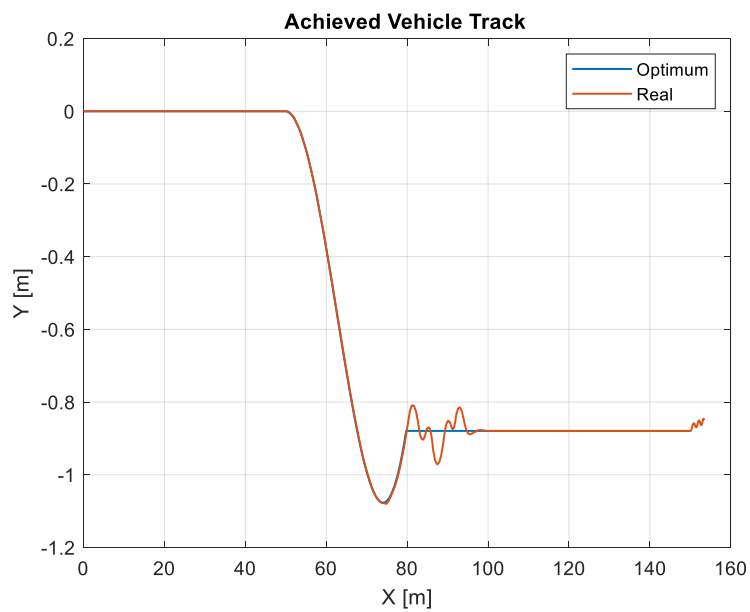
Στη συνέχεια, θα διατηρηθεί ο Ορίζοντας Ελέγχου στα 20 σημεία, ενώ θα μειωθεί ο Ορίζοντας Πρόβλεψης στα 24 σημεία (τιμές $T_c=1$ και $T_p=1.2$ sec αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα από την παρακολούθηση των τροχιών παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



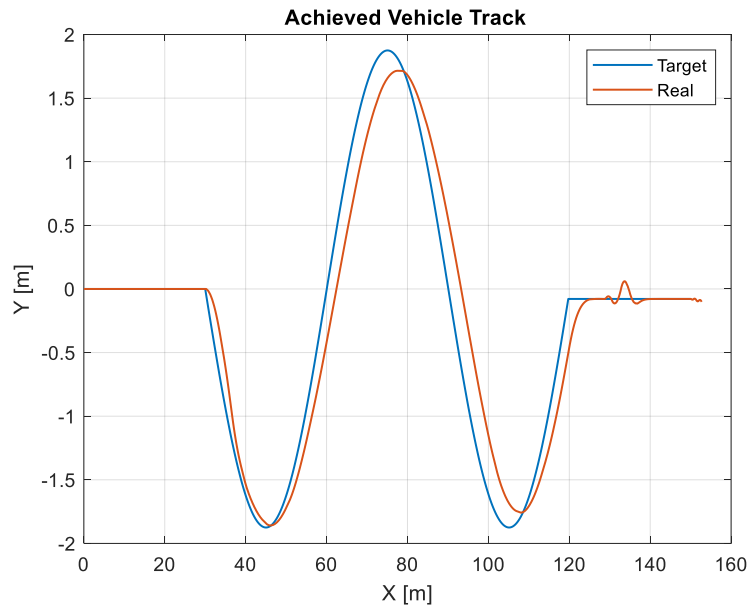
ΣΧΗΜΑ 4-5: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ($H_c=20$ ΚΑΙ $H_p=24$)



ΣΧΗΜΑ 4-6: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ U-TURN ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ($H_c=20$ ΚΑΙ $H_p=24$)



ΣΧΗΜΑ 4-7: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ FISH HOOK ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ($H_c=20$ ΚΑΙ $H_p=24$)



ΣΧΗΜΑ 4-8: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΥΠΟΥ S ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ($H_c=20$ ΚΑΙ $H_p=24$)

Παρατηρείται ότι ο MPC – ελεγκτής πετυχαίνει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα στην παρακολούθηση της τροχιάς σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση. Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε αυτές τις προσομοιώσεις αυξήθηκε ο Ορίζοντας Ελέγχου αλλά ο Ορίζοντας Δράσης κρατήθηκε σε τιμή σχετικά κοντινή με τον ορίζοντα ελέγχου (τιμές $H_c = 20$ και $H_p = 24$). Άρα, η χρήση μεγαλύτερων οριζόντων δράσης σε σχέση με τους ορίζοντες ελέγχου, επιβάλλει τη χρήση σημάτων ελέγχου για την είσοδο $u(t)$ τα οποία είναι ανεπιτυχή (εφόσον τα σήματα ελέγχου που παράγονται για τις θέσεις H_{c+1}, \dots, H_p , διατηρούν την τελευταία τιμή του σήματος εισόδου).

Κατά συνέπεια, προκύπτει ότι οι Ορίζοντες Ελέγχου και Δράσης θα πρέπει να κρατηθούν σε κοντινές-ή ίσες τιμές για την επίτευξη καλύτερου αποτελέσματος. Έτσι, επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις οι δύο ορίζοντες να έχουν ίσες τιμές, καθώς αυτό δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, όπως φαίνεται και από τις προσομοιώσεις. Επιπλέον, για πληρέστερη απόκριση και ικανότητα προσαρμογής, ο ορίζοντας ελέγχου πρέπει να κρατηθεί σε μικρές τιμές για τη γρήγορη παρακολούθηση των επερχόμενων τιμών θέσεως της τροχιάς χωρίς να αυξάνει το παράθυρο επεξεργασίας.

4.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΛΩΡΙΔΑ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που αφορούν την παρακολούθηση τροχιάς. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προς εξέταση σεναρίων, καθώς

και οι λόγοι για την επιλογή τους, έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τα σενάρια που διερευνήθηκαν είναι τα εξής:

- Τροχιά Γραμμικών Τμημάτων – Linear Segments Track
- Τροχιά Αναστροφής – U-turn track
- Τροχιά Αγκίστρι – Fish Hook Track
- Τροχιά τύπου S – S track

Στόχος των σεναρίων αυτών είναι να αναδειχθεί η ικανότητα του υλοποιηθέντος ελεγκτή να κρατήσει το όχημα στην επιθυμητή πορεία.

Όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, το συνολικό σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα καθορισμού παραμέτρων (setup) για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του. Οι παράμετροι που καθορίστηκαν περιλαμβάνονται στο τμήμα κώδικα Καθορισμού Παραμέτρων και συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

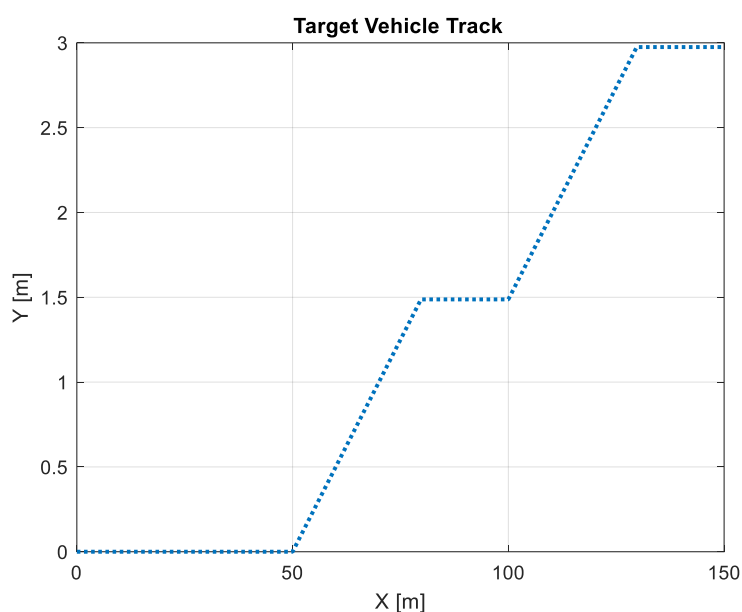
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ – MPC ΕΛΕΓΚΤΗ

Παράμετρος	Τιμή	Επεξηγήσεις
Tf (sec)	30	Διάρκεια Προσομοίωσης
dt (sec)	0.05	Χρονικό Βήμα προσομοίωσης
Hc (sec)	15	Ορίζοντας Ελέγχου (Control Horizon)
Hp (sec)	15	Ορίζοντας Πρόβλεψης (Prediction Horizon)
K1	1.00	Τιμή για τον ενισχυτή Κέρδους για την είσοδο u1 του συστήματος (steering).
K2	1.00	Τιμή για τον ενισχυτή Κέρδους για την είσοδο u2 του συστήματος (Breaking Force).
K3	0.5	Τιμή για τον ενισχυτή Κέρδους για την είσοδο u3 του συστήματος (Acceleration Force).
nmpc_cont_actv	'n'	Ενεργοποίηση του MPC ελεγκτή μία φορά, ανά Hp πλήθος σημείων.
nmpc_use_lastc	'n'	Ο MPC ελεγκτής υπολογίζει, με βάση τον Ορίζοντα Ελέγχου, εντολές εισόδου u_opt, οι οποίες διαφοροποιούνται για τον κάθε κύκλο υπολογισμών και εφαρμόζονται σε κάθε φάση στο μοντέλο του οχήματος.

Οι παραπάνω παράμετροι, που προέκυψαν μέσω δοκιμών και θα εφαρμοστούν κοινά, για όλους τους τύπους των σεναρίων, δηλαδή και για τους τέσσερεις τύπους τροχιών που έχουν επιλεγεί για τη διαδικασία του ελέγχου. Οι ρυθμίσεις αυτές διατηρούνται προφανώς ενιαίες για όλα τα σενάρια, καθώς αυτή είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση του ελεγκτή. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των σεναρίων, αναλυτικά για κάθε τροχιά.

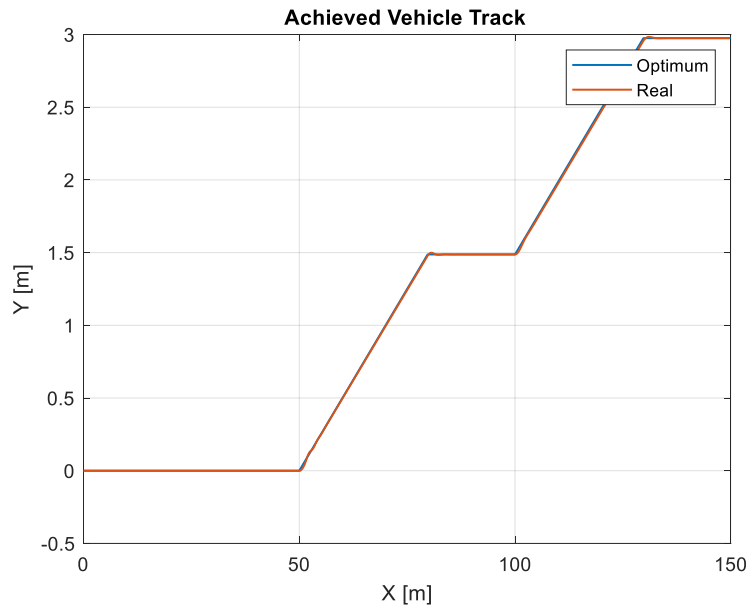
ΣΕΝΑΡΙΟ #1 (ΤΡΟΧΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ):

Σε αυτό το σενάριο χρησιμοποιήθηκε ένα τμήμα δρόμου που αποτελείται από πέντε γραμμικά μέρη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-1. Σκοπός είναι να μελετηθεί η ικανότητα παρακολούθησης της τροχιάς Γραμμικών Τμημάτων από το συνολικό σύστημα του μοντέλου Οχήματος - MPC ελεγκτή. Στο συγκεκριμένο σενάριο διερευνάται το κατά πόσον το όχημα που μελετάται μπορεί να ακολουθήσει την επιθυμητή καμπύλη, η οποία αποτελείται από απότομες στροφές. Έτσι, ελέγχεται ανταπόκριση του MPC ελεγκτή σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η άμεση δράση του. Η τροχιά που εξετάζεται σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 4-1 και τα χαρακτηριστικά της και οι λόγοι επιλογής της έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.



ΣΧΗΜΑ 4-9: ΤΡΟΧΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα από την παρακολούθηση της τροχιάς από το όχημα, με βάση τις εντολές εισόδου από τον ελεγκτή:



ΣΧΗΜΑ 4-10: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

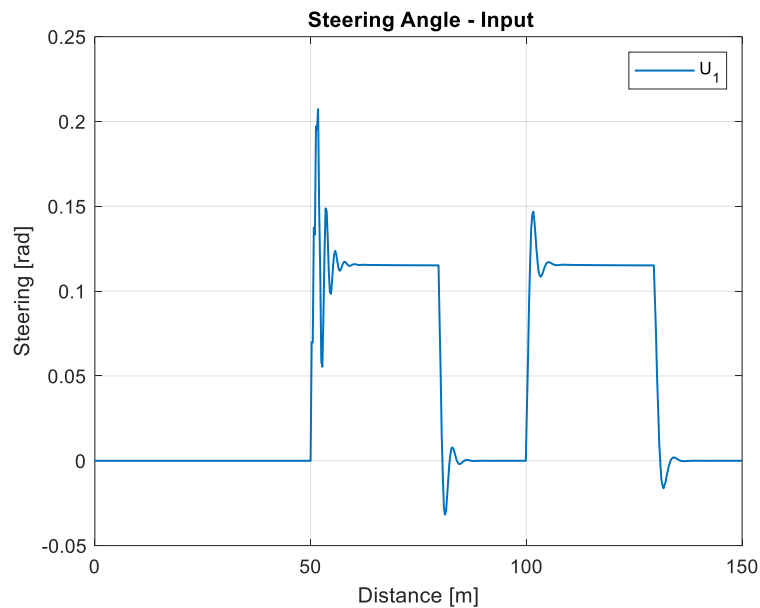
Από το κοινό διάγραμμα, παρατηρείται ότι το όχημα παρακολουθεί ικανοποιητικά τα σημεία της τροχιάς. Για όλα τα τμήματα της τροχιάς η παρακολούθηση είναι εξαιρετικά ακριβής. Η διακύμανση του σφάλματος τροχιάς με βάση τη διανυόμενη απόσταση παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 4-11: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

Από το διάγραμμα του σφάλματος τροχιάς παρατηρείται ότι αυτό παίρνει μέγιστη τιμή 0.25 m. Το σφάλμα υπολογίζεται από την «ευκλείδεια» νόρμα απόστασης πραγματικής και επιθυμητής τροχιάς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εντολές εισόδου (διάνυσμα u_{opt}) όπως προκύπτει από την εκτέλεση των υπολογισμών του MPC – ελεγκτή, με βάση τους ορίζοντες Ελέγχου και Πρόβλεψης (H_c και H_p αντίστοιχα):

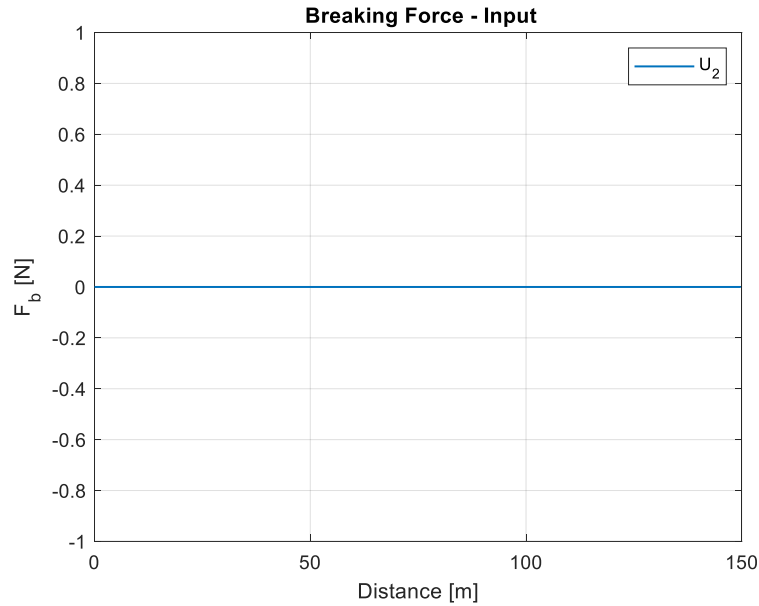


ΣΧΗΜΑ 4-12: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_1 – STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από τη μορφή της διανυόμενης τροχιάς οι μεταβολές ως προς την κατεύθυνση αναφέρονται στις διανυόμενες αποστάσεις των 50, 75, 100, 125 m. Στις αντίστοιχες θέσεις από το διάγραμμα της εισόδου u_1 – steering, παρατηρείται ότι σε αυτά τα σημεία ο ελεγκτής εισάγει αλλαγές κατεύθυνσης στην πλοήγηση του οχήματος. Οι μεταβολές του σήματος κυμαίνονται μεταξύ των επιτρεπτών ορίων της εισόδου u_1 . Μετά τις θέσεις μεταβολών η κλίση του τιμονιού του οχήματος κρατείται σε μία μέση σταθερή τιμή γύρω στα 0.1 rad.

Οι απότομες αλλεπάλληλες μεταβολές που παρατηρούνται από την απόσταση των 50m μέχρι και τα 60m περίπου, οφείλονται στα βέλτιστα που παράγει η συνάρτηση για την ελαχιστοποίηση. Οι μεταβολές αυτές είναι εφικτό να εξαλειφθούν με τη χρήση φίλτρου για τις παραγόμενες τιμές από την συνάρτηση `fmincon`, αυτό όμως θα επιδρούσε στην βελτιστοποίησή της.

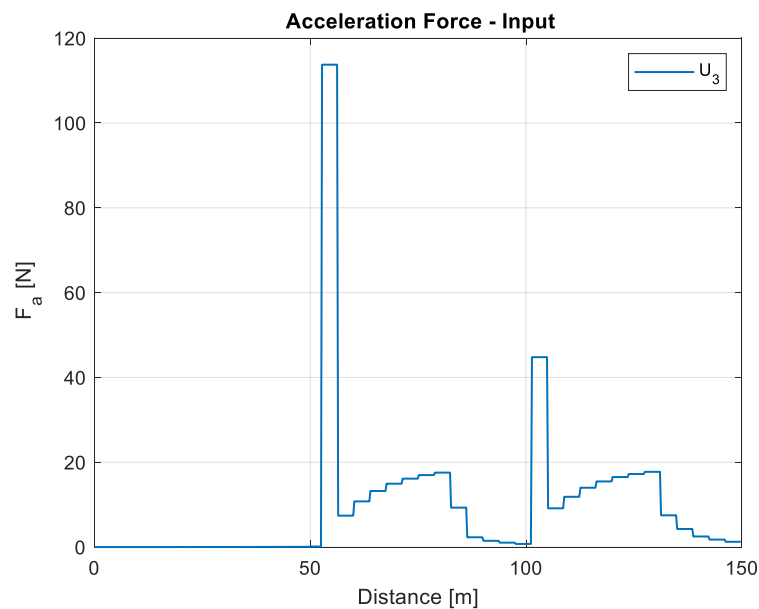
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-13: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_1 – STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι ο MPC ελεγκτής δεν χρησιμοποιεί καθόλου τη δυνατότητα πέδησης που προσφέρει το μοντέλο. Προφανώς αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παρακολούθηση της τροχιάς είναι ικανοποιητική (ως προς την ταχύτητα και τη θέση) και κατά συνέπεια δεν απαιτείται πέδηση για την παρακολούθηση της.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_3 – Acceleration Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:

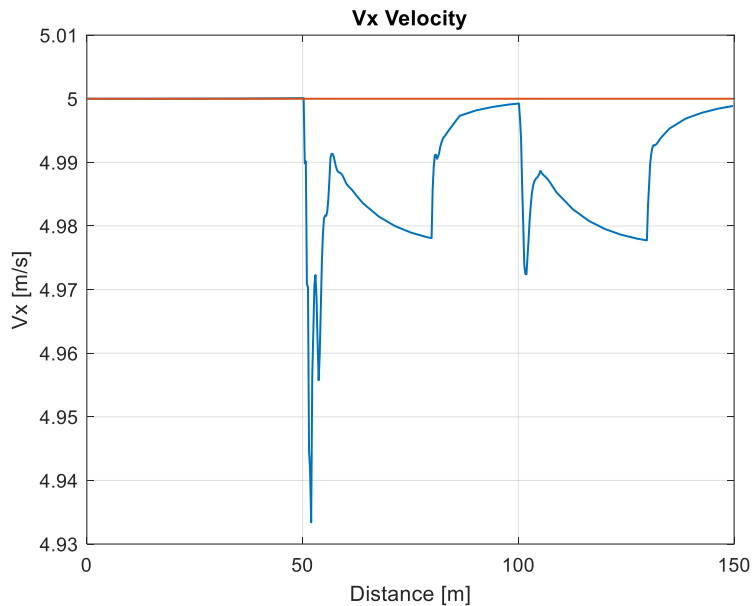


ΣΧΗΜΑ 4-14: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_3 – ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι στις αντίστοιχες θέσεις απόστασης όπου εισέρχεται μεταβολή κλίσεως στη βέλτιστη τροχιά, ο MPC – ελεγκτής επιταχύνει για να διατηρήσει την επιθυμητή ταχύτητα της τροχιάς. Η τιμή της δύναμης επιτάχυνσης αρχικά έχει τιμή 110 Nt

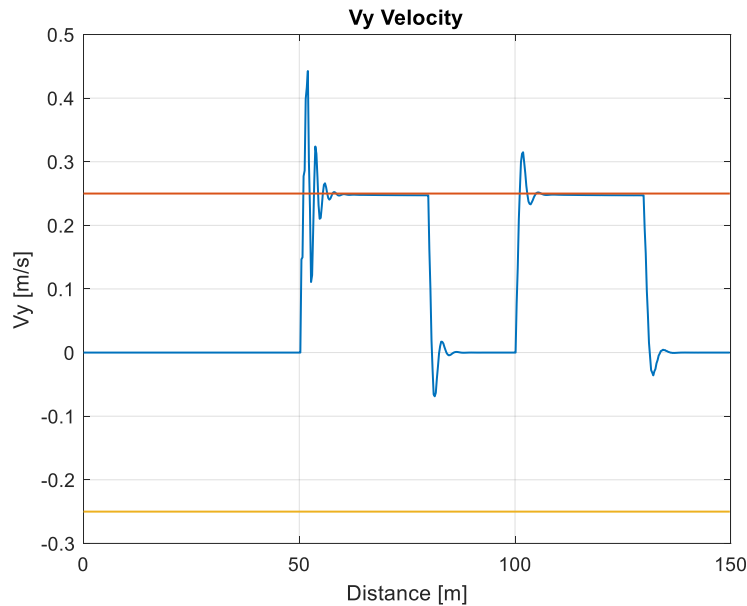
ενώ στη συνέχεια 45 Nt, ενώ προς το τέλος της τροχιάς η τιμή αυτή φθίνει (κάθε 1000 Nt δύναμης επιτάχυνσης αντιστοιχούν σε επιτάχυνση της τάξης των 0.48 m/s^2 σύμφωνα με τη μάζα του οχήματος για το μοντέλο).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ταχυτήτων κατά x και y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-15: ΤΑΧΥΤΗΤΑ Vx ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Σύμφωνα με τη διαμόρφωση της τροχιάς η επιθυμητή ταχύτητα κατά x είναι 5 m/s , καθώς με αυτή την ταχύτητα κατασκευάζονται τα σημεία της τροχιάς. Παρατηρείται ότι το όχημα τείνει να διατηρήσει την ταχύτητα κίνησης του κατά x κοντά στην τιμή αυτή με ελάχιστη απόκλιση. Παρατηρείται ότι η ταχύτητα του οχήματος πέφτει κατά 0.07 m/s από την επιθυμητή λίγο αφότου έχει διανύσει τα 50m , και προφανώς αυτό συνιστά και το αίτιο που αναγκάζει τον MPC - ελεγκτή για την εισαγωγή του σήματος επιταχύνσεως για το όχημα στο σημείο αυτό (Σχήμα 4-6).



ΣΧΗΜΑ 4-16: ΤΑΧΥΤΗΤΑ VY ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Η ταχύτητα κατά τον y - άξονα, όταν αυτή υπάρχει, για την εκτέλεση της τροχιάς πρέπει να διατηρηθεί στην περιοχή +/- 0.25 m/s, διότι αυτές είναι οι ακραίες τιμές ανάλογα με την κατεύθυνση των τροχών. Σημειώνεται ότι η τροχιά έχει κατασκευαστεί με ταχύτητα κατά y ίση με 0.25m/s. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι αυτή διατηρείται με μικρές διακυμάνσεις εντός της συγκεκριμένης ζώνης. Στα υπόλοιπα τμήματα στα οποία δεν αναμένεται η ύπαρξη της Vy, αυτή έχει μηδενική τιμή.

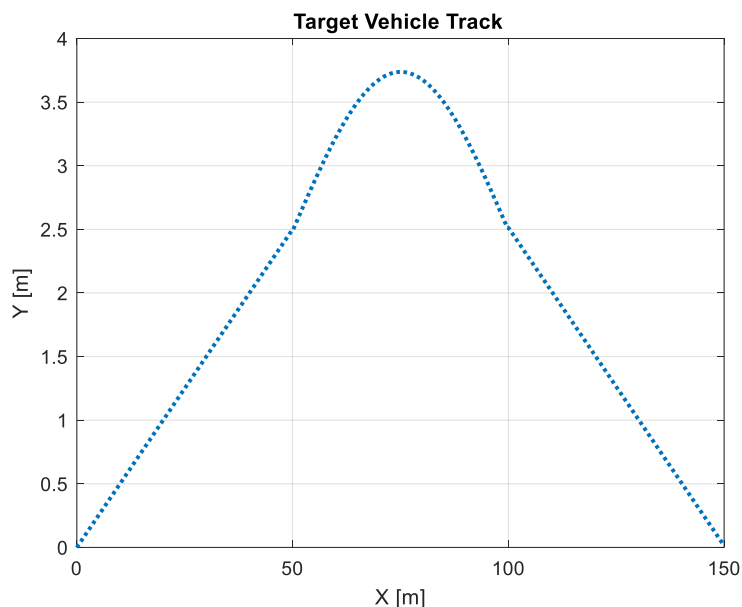
Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι MSE=0.0184.

 Mean Square Track Error

0.0184

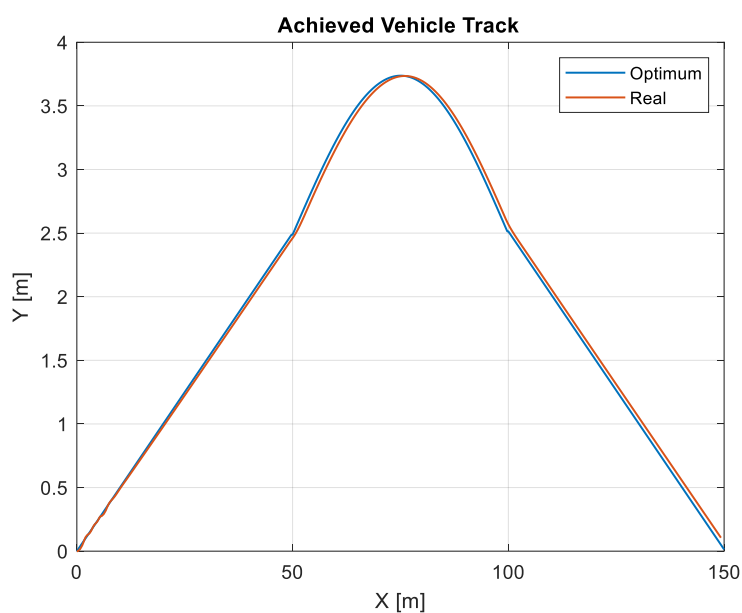
ΣΕΝΑΡΙΟ #2 (ΤΡΟΧΙΑ U-TURN):

Σε αυτό το σενάριο θα μελετηθεί η ικανότητα παρακολούθησης της τροχιάς αναστροφής από το συνολικό σύστημα του μοντέλου Οχήματος – MPC ελεγκτή. Η τροχιά αυτή αποτελείται από δύο διαδοχικά τμήματα καμπυλών με αλλαγή διεύθυνσης από το τμήμα εισόδου στο τμήμα εξόδου. Στόχος είναι να εξακριβωθεί η ικανότητα των απαιτούμενων αλλαγών διευθύνσεων του οχήματος, έτσι ώστε το όχημα να παρακολουθεί βέλτιστα την επιθυμητή καθορισμένη τροχιά (Target track). Η τροχιά παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 4-17: ΤΡΟΧΙΑ U-TURN

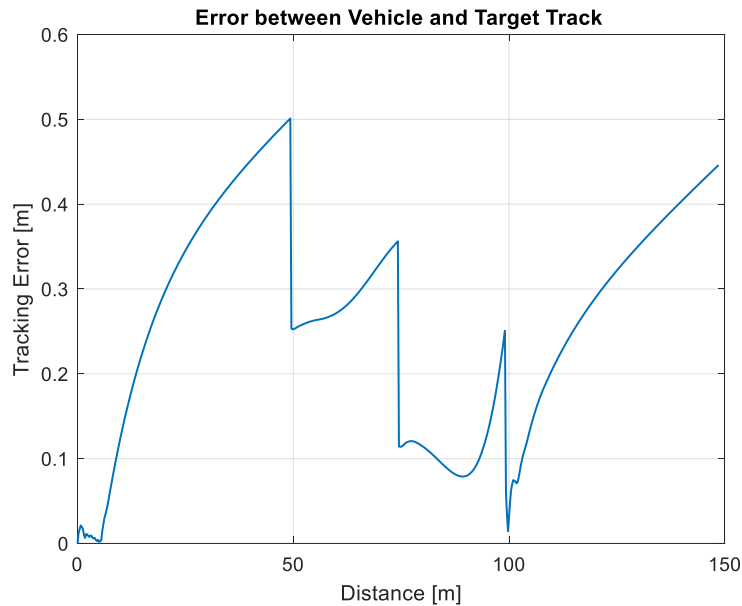
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το διάγραμμα από την παρακολούθηση της τροχιάς από το όχημα με βάση τις εντολές εισόδου από τον MPC – ελεγκτή:



ΣΧΗΜΑ 4-18: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ U-TURN ΚΑΙ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Από το κοινό διάγραμμα, παρατηρείται ότι το μοντέλο του οχήματος ακολουθεί ικανοποιητικά τα σημεία της τροχιάς. Για ολόκληρο το τμήμα εισόδου η παρακολούθηση είναι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-10, ακριβής με μία μικρή διακύμανση στην απόσταση των 100 m, της τάξης των 20cm. Στη συνέχεια, εκτελείται και πάλι ομαλά η παρακολούθηση της τροχιάς.

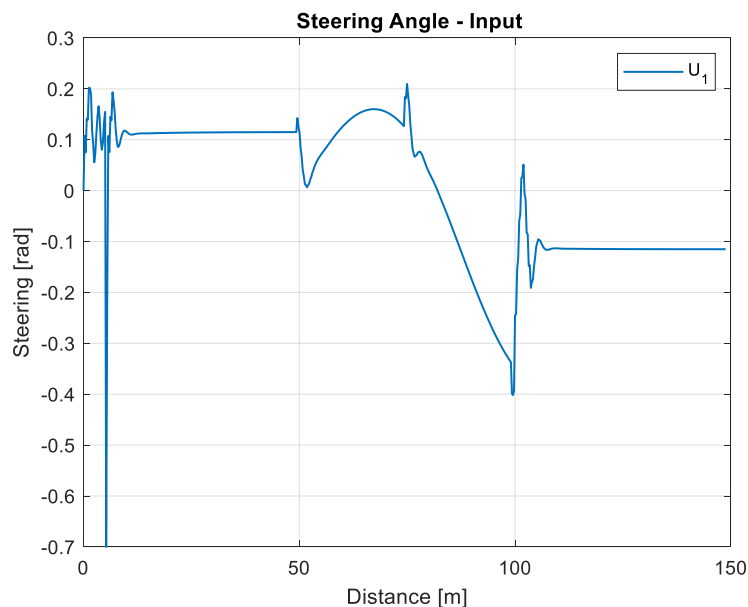
Η διακύμανση του σφάλματος τροχιάς με βάση τη διανύσιμη απόσταση παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 4-19: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

Από το διάγραμμα του σφάλματος τροχιάς, παρατηρείται ότι αυτό για το μεγαλύτερο τμήμα της τροχιάς είναι μικρότερο των 0.4 m. Το σφάλμα, λόγω της αλλαγής διεύθυνσεως, εμφανίζει διακυμάνσεις. Στο κέντρο της τροχιάς (κοντά στα 75 m) που συντελείται η έναρξη του τμήματος εξόδου, το σφάλμα είναι μικρό (λίγο πάνω από 0.1m) και στο εκατοστό μέτρο της τροχιάς φτάνει να μηδενίζεται. Κατόπιν, παρατηρείται μια αύξηση η οποία φτάνει λίγο πάνω από τα 0.4m.

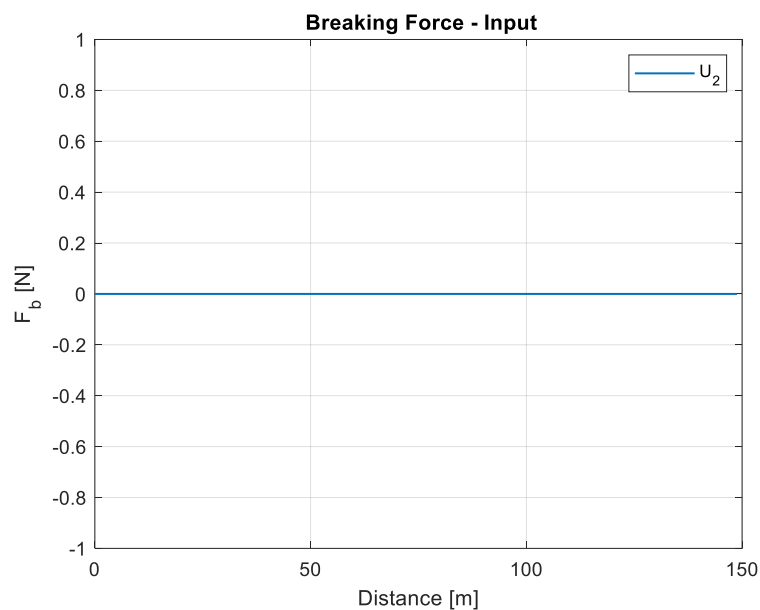
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εντολές εισόδου (διάνυσμα u_{opt}), όπως προκύπτουν από την εκτέλεση των υπολογισμών του MPC – ελεγκτή, με βάση τους οριζόντες Ελέγχου και Δράσης (H_c και H_p , αντίστοιχα):



ΣΧΗΜΑ 4-20: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_1 – STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από τη μορφή της διανυόμενης τροχιάς, οι μεταβολές ως προς την κατεύθυνση συντελούνται καθ' όλη τη διάρκεια της καμπύλης, λόγω της μορφής που έχει η τελευταία. Πάλι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι συνεχόμενες μικρές μεταβολές στην γωνία τιμονιού οφείλονται στα βέλτιστα που παράγει η συνάρτηση για τη βελτιστοποίηση. Από το διάγραμμα της εισόδου u_1 - steering, φαίνεται ότι οι μεταβολές στο σήμα παραμένουν εντοπισμένες σε μερικές περιοχές, ενώ κατά το μεγαλύτερο μέρος της τροχιάς εμφανίζονται μικρές μεταβολές. Οι μεταβολές του σήματος κυμαίνονται μεταξύ των επιτρεπτών ορίων της εισόδου u_1 , με μέγιστο 0.7rad . Στο τελικό τμήμα της καμπύλης, η κλίση του τιμονιού του οχήματος παραμένει σε μία μέση σταθερή τιμή γύρω στα -0.1rad .

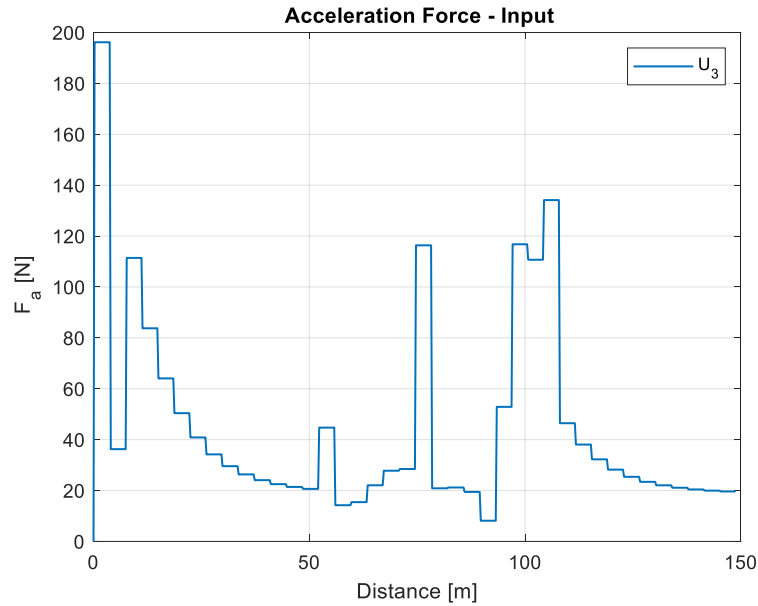
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_2 - Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-21: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_2 - BREAKING FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι ο MPC - ελεγκτής δεν χρησιμοποιεί καθόλου τη δυνατότητα πέδησης που προσφέρει το μοντέλο. Προφανώς αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παρακολούθηση της τροχιάς είναι ικανοποιητική και κατά συνέπεια δεν απαιτείται πέδηση για την παρακολούθηση της.

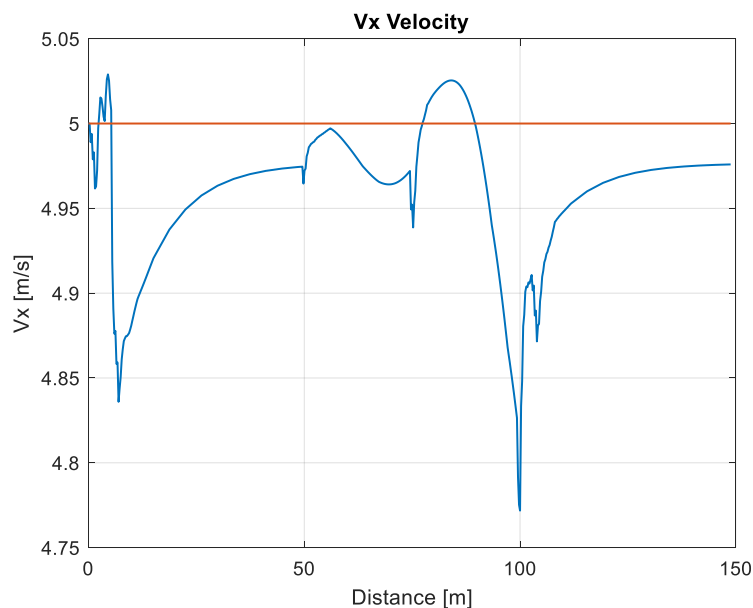
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_3 - Acceleration Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-22: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_3 – ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

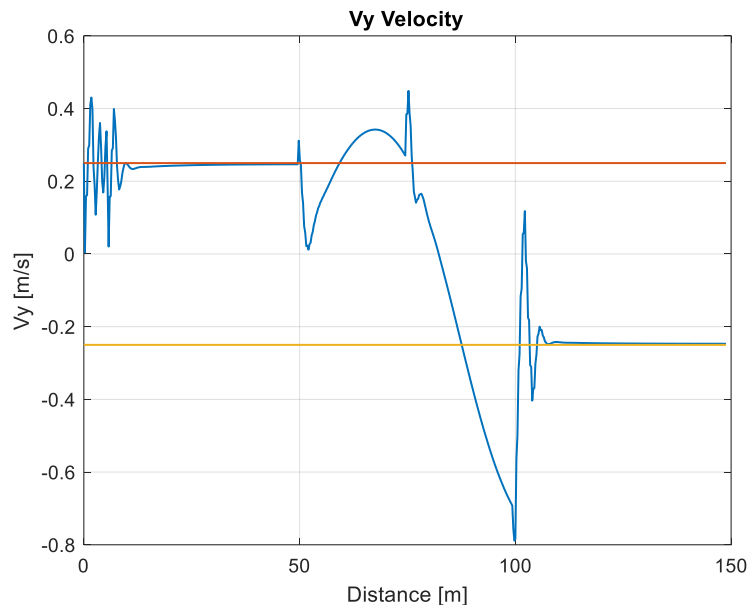
Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι κατά την είσοδο του οχήματος στο πρώτο τμήμα γίνεται χρήση επιτάχυνσης 195 Nt για τη διατήρηση ταχύτητας και πορείας και στη συνέχεια η επιτάχυνση μειώνεται. Στο σημείο που συντελείται η μέγιστη αλλαγή διεύθυνσης (75 m), υπάρχει μια αύξηση της F_a στα 115 Nt. Στο τμήμα εξόδου της καμπύλης η δύναμη επιτάχυνσης ανεβαίνει στα 135 Nt και συνεχίζει μειούμενη σε πολύ χαμηλά επίπεδα μέχρι το πέρας της καμπύλης. Οι επιταχύνσεις του οχήματος μέσω των εντολών του MPC – ελεγκτή συντελούνται διορθωτικά, δεδομένου ότι η τροχιά προκαλεί συνεχείς αλλαγές διευθύνσεων μέχρι την ολοκλήρωση της.

Μετάπειτα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ταχυτήτων κατά x και y του οχήματος, συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-23: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_x ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Σε αυτό το διάγραμμα το όχημα τείνει να διατηρήσει την ταχύτητα κίνησης του κατά x, κοντά στην τιμή επιθυμητή τιμή (φαίνεται με κόκκινο χρώμα), με μικρές διακυμάνσεις. Προς το τέλος της τροχιάς παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του οχήματος πέφτει κατά 0.2 m/s από την επιθυμητή, δηλαδή μια μεταβολή μικρότερη από το 5% της συνολικής ταχύτητας. Τα σημεία βυθίσεως της ταχύτητας αποτελούν και τα σημεία διέγερσης μέσω του σήματος u_3 για αποκατάσταση των επιπέδων ταχύτητας (Σχήμα 4-16).



ΣΧΗΜΑ 4-24: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_y ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ταχύτητα V_y διατηρείται με μικρές διακυμάνσεις εντός της συγκεκριμένης επιθυμητής ζώνης. Η αλλαγή της ταχύτητας συντελείται λίγο μετά τα 75 m. Στα 100 m της τροχιάς, συμβαίνει μία σχετικά σημαντική πτώση σε τιμή -0.8 m/s, οπότε και δικαιολογείται η εισαγωγή του σήματος επιτάχυνσης από τον MPC –ελεγκτή σε εκείνο το σημείο. Με την ολοκλήρωση του τμήματος εξόδου, η ταχύτητα έχει αποκατασταθεί στα επιθυμητά επίπεδα.

Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι $MSE=0.0871$.

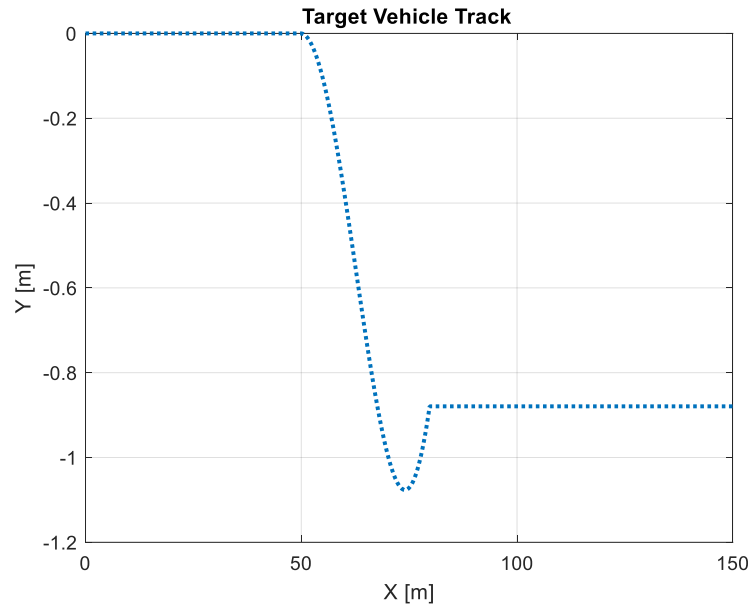
Mean Square Track Error

0.0871

ΣΕΝΑΡΙΟ #3 (ΤΡΧΟΙΑ FISH HOOK):

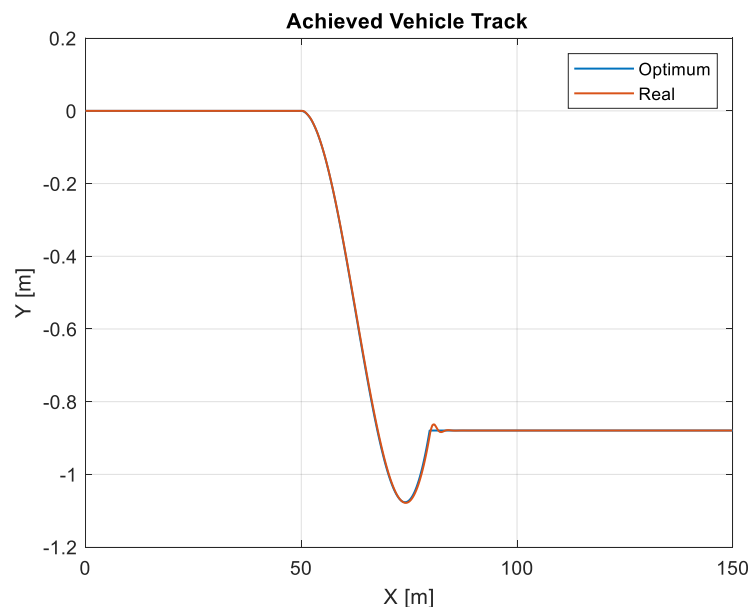
Στο συγκεκριμένο σενάριο, θα μελετηθεί η ικανότητα παρακολούθησης της τροχιάς Αγκιστριού (Fish Hook) από το συνολικό σύστημα του μοντέλου Οχήματος – MPC ελεγκτή. Η τροχιά αυτή αποτελείται από δύο διαδοχικά τμήματα καμπυλών με αλλαγή διεύθυνσεως από το τμήμα εισόδου στο τμήμα εξόδου και τελικό τμήμα με αποκατάσταση μηδενικής κλίσης

κίνησης του οχήματος. Στόχος είναι, να εξακριβωθεί η ικανότητα των απαιτούμενων αλλαγών διευθύνσεων, έτσι ώστε το όχημα να παρακολουθεί βέλτιστα την επιθυμητή καθορισμένη τροχιά (Target track). Η τροχιά παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 4-25: ΤΡΟΧΙΑ FISH HOOK

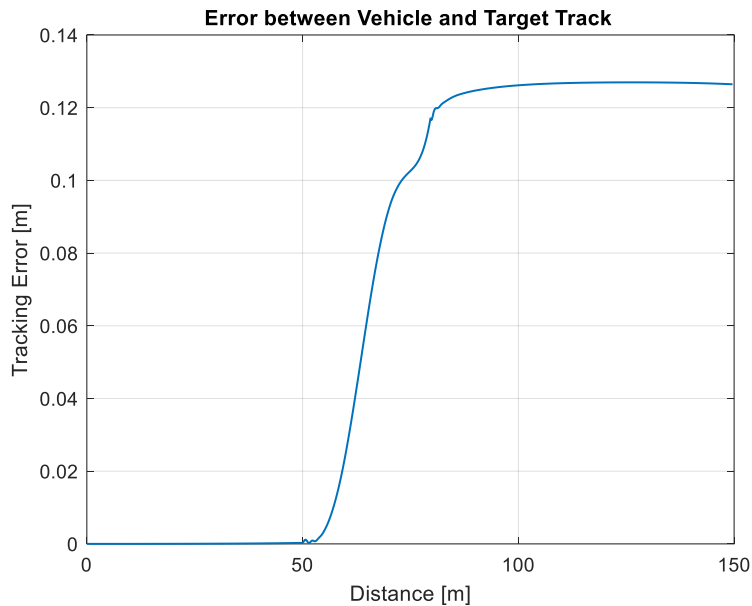
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το διάγραμμα από την παρακολούθηση της τροχιάς από το όχημα με βάση τις εντολές εισόδου από τον MPC – ελεγκτή:



ΣΧΗΜΑ 4-26: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ FISH HOOK ΚΑΙ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Από το κοινό διάγραμμα, φαίνεται ότι το όχημα παρακολουθεί ικανοποιητικά τα σημεία της τροχιάς. Για ολόκληρο το τμήμα εισόδου και εξόδου η παρακολούθηση είναι τέλεια, με τις διακυμάνσεις να είναι αμελητέες, όπως φαίνεται και από το επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 4-19).

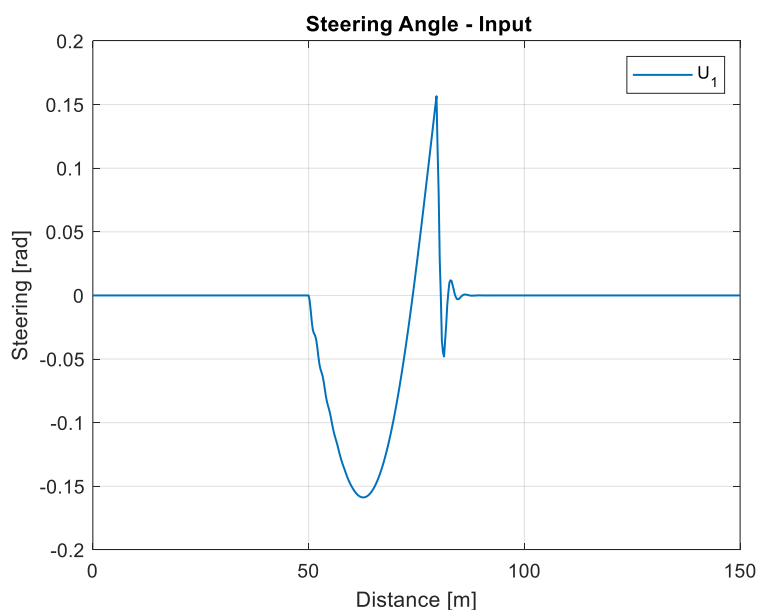
Η διακύμανση του σφάλματος τροχιάς με βάση τη διανυόμενη απόσταση παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 4-27: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

Από το διάγραμμα του σφάλματος τροχιάς παρατηρείται ότι αυτό, για ολόκληρο το τμήμα της τροχιάς, είναι μικρότερο των 0.12 m. Η τιμή της νόρμας αυξάνει, μέχρι που σταθεροποιείται μέχρι το τέλος της τροχιάς. Από το μέγεθος του σφάλματος, το οποίο παραμένει κοντά στο μηδέν, φαίνεται και η ανεμπόδιστη παρακολούθηση της τροχιάς από το όχημα.

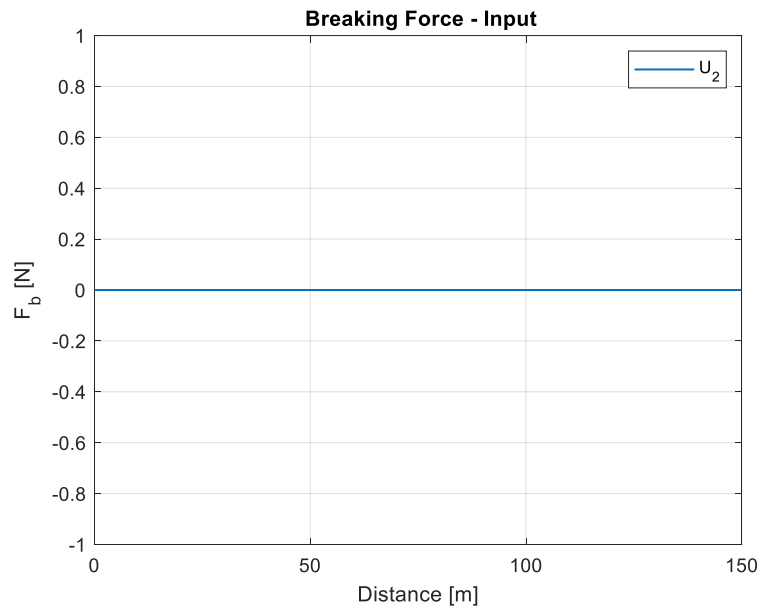
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι εντολές εισόδου (διάνυσμα u_{ort}), όπως προκύπτει από την εκτέλεση των υπολογισμών του MPC - ελεγκτή με βάση τους οριζόντες Ελέγχου και Πρόβλεψης (H_c και H_p αντίστοιχα):



ΣΧΗΜΑ 4-28: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_1 - STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από τη μορφή της διανυόμενης τροχιάς οι μεταβολές ως προς την κατεύθυνση συντελούνται στις αποστάσεις των 50, 75 και 85 m. Στα σημεία αυτά παρατηρούνται διακυμάνσεις στο σήμα διεύθυνσης από τον MPC – ελεγκτή με στόχο την παρακολούθηση της τροχιάς. Η μεταβολή του σήματος u_1 παραμένει εντός ορίων με βάση τους περιορισμούς. Στο τελικό τμήμα μηδενικής κλίσης, το σήμα u_1 μηδενίζεται.

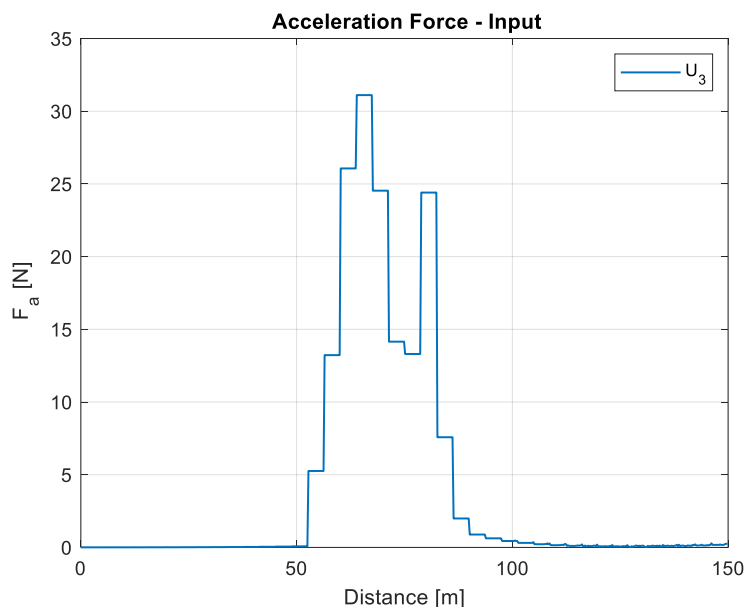
Έπειτα, παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-29: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_2 – BREAKING FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι ο MPC – ελεγκτής δε χρησιμοποιεί καθόλου τη δυνατότητα πέδησης που προσφέρει το μοντέλο. Προφανώς αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παρακολούθηση της τροχιάς είναι ικανοποιητική, και κατά συνέπεια δεν απαιτείται πέδηση για την παρακολούθηση της.

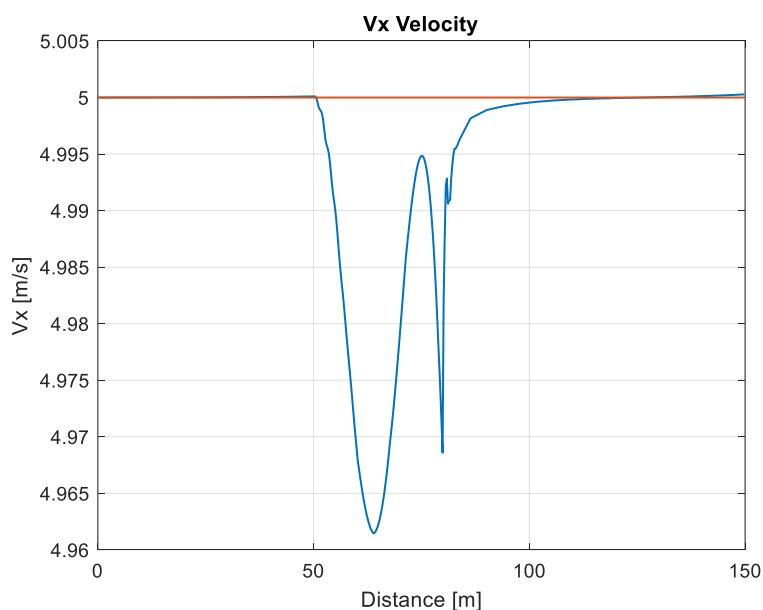
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_3 – Acceleration Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-30: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U3 – ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

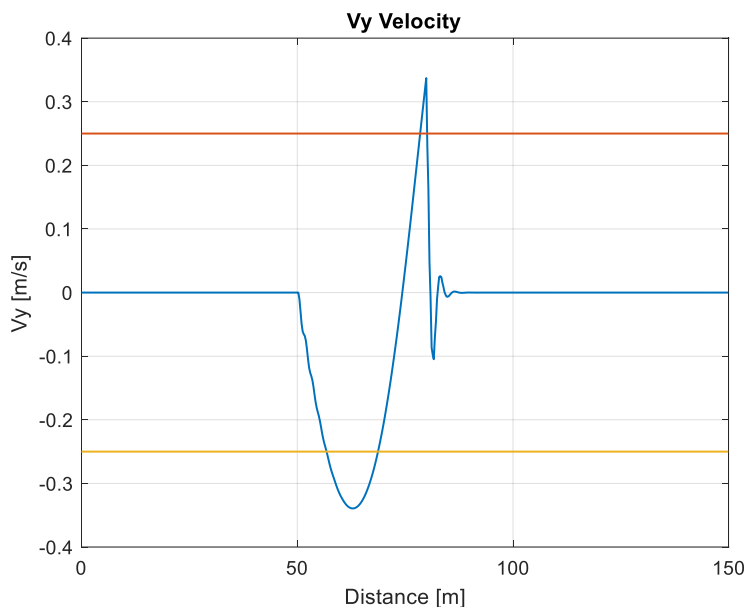
Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι στα σημεία αλλαγής της διεύθυνσης η κίνηση υποστηρίζεται από σήμα δύναμης επιτάχυνσης. Πιο συγκεκριμένα, λίγο μετά τα 50m αρχίζει να αναπτύσσεται μία μικρή δύναμη επιτάχυνσης, που φτάνει μέχρι τα 31 Nt. Για την αλλαγή της κατεύθυνσης στα 75m, η δύναμη αυτή έχει μειωθεί σε τιμή μικρότερη των 15 Nt. Στο τελικό σημείο εξόδου (μηδενική κλίση), και εφόσον το όχημα έχει φτάσει στην επιθυμητή ταχύτητα, όπως θα δούμε στα δύο επόμενα σχήματα (4-23 και 4-24) η δύναμη επιτάχυνσης είναι περιττή, οπότε και μηδενίζεται.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ταχυτήτων κατά x και y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-31: ΤΑΧΥΤΗΤΑ Vx ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ, ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, φαίνεται ότι το όχημα τείνει να διατηρήσει την ταχύτητα κίνησης του κατά x κοντά στην επιθυμητή τιμή με μικρές διακυμάνσεις. Οι μεταβολές ταχύτητας είναι αυτές που εξαναγκάζουν τον MPC – ελεγκτή στην εφαρμογή δύναμης επιτάχυνσης Fa, με στόχο την αποκατάσταση της. Η διακύμανση της ταχύτητας στην έξοδο της τροχιάς είναι μηδενική, κάτι το οποίο σχετίζεται με το Σχήμα 4-22.



ΣΧΗΜΑ 4-32: ΤΑΧΥΤΗΤΑ VY ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ, ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ταχύτητα Vy διατηρείται με ελάχιστες διακυμάνσεις εντός της συγκεκριμένης επιθυμητής ζώνης. Η αλλαγή της ταχύτητας συμβαίνει κατά την αλλαγή διεύθυνσης του οχήματος. Στα τμήματα μηδενικής κλήσης δεν υπάρχει διακύμανση, όπως αυτό είναι αναμενόμενο.

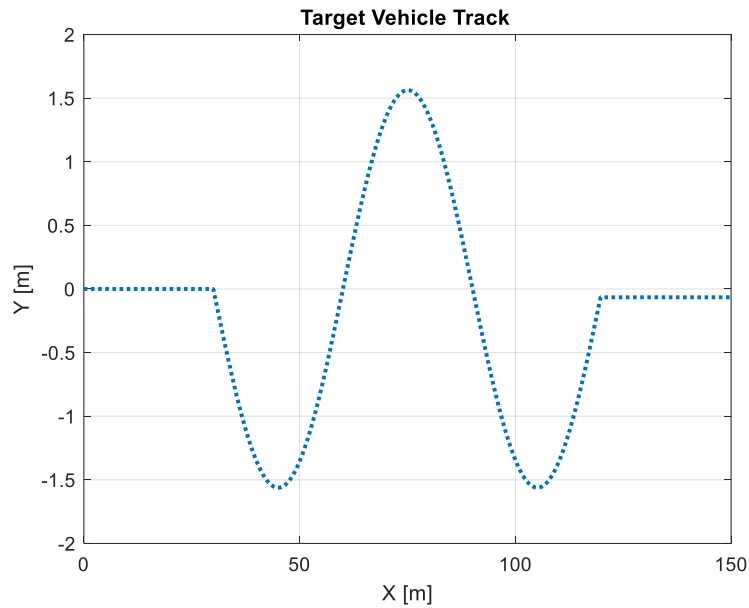
Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι MSE=0.0084.

Mean Square Track Error

0.0084

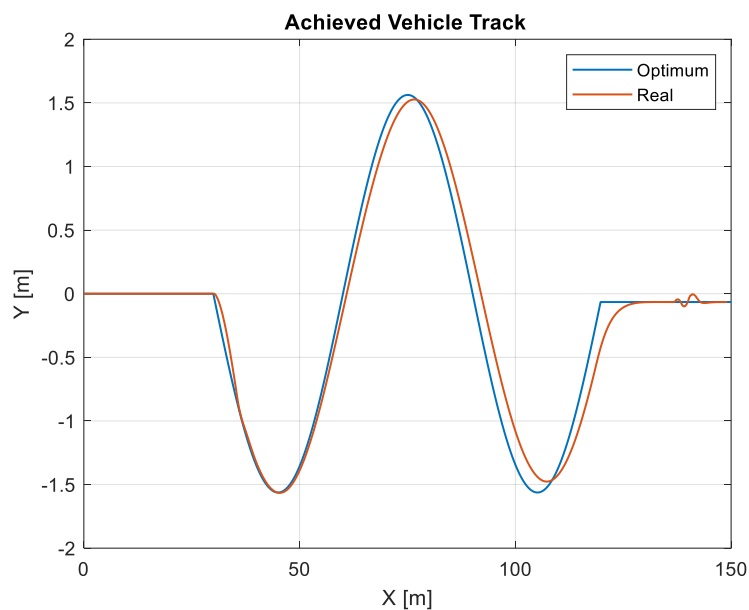
ΣΕΝΑΡΙΟ #4 (ΤΡΟΧΙΑ ΤΥΠΟΥ S):

Στο σενάριο αυτό, θα μελετηθεί η ικανότητα παρακολούθησης της τροχιάς τύπου S από το συνολικό σύστημα του μοντέλου Οχήματος – MPC ελεγκτή. Η τροχιά τύπου S αποτελείται από διαδοχικά και επάλληλα τμήματα αλλαγής διευθύνσεων για το όχημα, εξ' ου και το όνομά της. Σκοπός αυτής της διερεύνησης είναι να ελεγχθεί εάν το όχημα μπορεί να ανταπεξέλθει σε συνεχόμενες αλλαγές διεύθυνσης. Η τροχιά παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 4-33: ΤΡΟΧΙΑ ΤΥΠΟΥ S

Στη συνέχεια φαίνεται το διάγραμμα από την παρακολούθηση της τροχιάς από το όχημα, με βάση τις εντολές εισόδου από τον MPC – ελεγκτή:



ΣΧΗΜΑ 4-34: ΚΟΙΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΥΠΟΥ S ΚΑΙ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Από το κοινό διάγραμμα των δύο τροχιών (επιθυμητής και πραγματικής), παρατηρείται ότι το όχημα παρακολουθεί αρκετά ικανοποιητικά τα σημεία της τροχιάς. Για το τμήμα εισόδου και εξόδου, η παρακολούθηση είναι τέλεια, ενώ εμφανίζεται μία μικρή διακύμανση (μικρότερη του 0.1 m) στην φάση κίνησης στο τμήμα μηδενικής κλίσεως μετά την έξοδο. Οι διακυμάνσεις αυτές, συντελούνται στην προσπάθεια αποκατάστασης του MPC – ελεγκτή να συντηρήσει τα επίπεδα επιθυμητής ταχύτητας κίνησης για το όχημα.

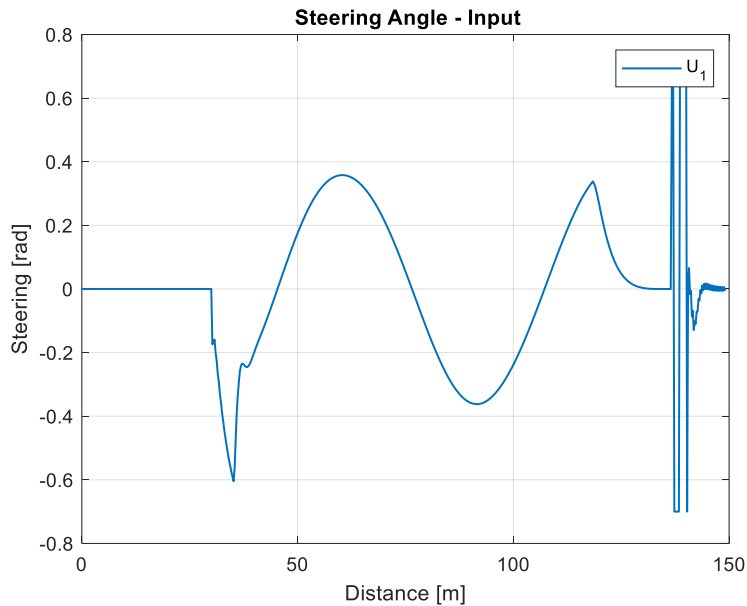
Η διακύμανση του σφάλματος τροχιάς με βάση τη διανυόμενη απόσταση παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 4-35: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

Από το διάγραμμα του σφάλματος τροχιάς, φαίνεται ότι αυτό, για το μεγαλύτερο τμήμα της τροχιάς, είναι μικρότερο του 1 m. Το παραπάνω σφάλμα, καθώς έχει υπολογιστεί με τη χρήση της νόρμας απόστασης για την πραγματική και την επιθυμητή τροχιά, συμπεριλαμβάνονται αποκλίσεις και κατά x και κατά y. Σε αυτήν την περίπτωση το σφάλμα είναι πιο αυξημένο από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, διότι η τροχιά που διανύει το όχημα προηγείται της βέλτιστης κατά x, όπως φαίνεται και στο κοινό διάγραμμα (Σχήμα 4-26). Οι διακυμάνσεις της νόρμας εμφανίζονται με τοπικά μέγιστα και μηδενισμούς. Στο τμήμα των διαδοχικών αλλαγών διευθύνσεων το σφάλμα συντηρείται κυμαινόμενο ενώ κατά την έξοδο τείνει να μηδενιστεί. Το τελευταίο τμήμα σφάλματος οφείλεται στην προσπάθεια του MPC – ελεγκτή να διατηρήσει την ταχύτητα κίνησης στα επιθυμητά επίπεδα.

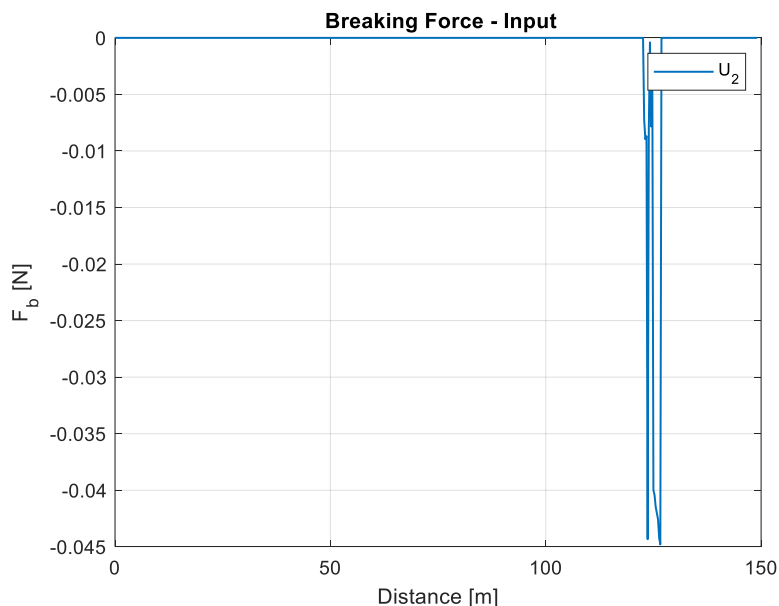
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εντολές εισόδου (διάνυσμα u_{opt}) όπως προκύπτει από την εκτέλεση των υπολογισμών του MPC – ελεγκτή με βάση τους ορίζοντες Ελέγχου και Πρόβλεψης (H_c και H_p αντίστοιχα).



ΣΧΗΜΑ 4-36: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_1 – STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από τη μορφή του σήματος εισόδου προκύπτει ότι αυτό παρακολουθεί με παρόμοιο τρόπο της μεταβολή της καμπύλης τύπου S. Οι μεταβολές του παραμένουν εντός επιτρεπτών ορίων. Η διακύμανση κατά την είσοδο στην καμπύλη μηδενικής κλίσης (τελικό τμήμα), προκύπτουν από την προσπάθεια διατήρησης της ταχύτητας κίνησης μετά την έξοδο από το τελευταίο καμπύλο τμήμα της τροχιάς.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_2 – Breaking Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:

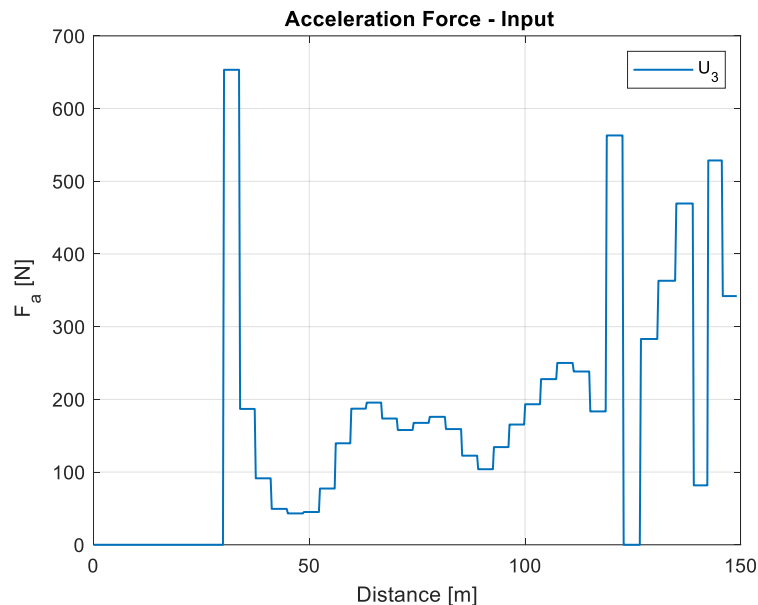


ΣΧΗΜΑ 4-37: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_2 – BREAKINGFORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε ότι ο MPC – ελεγκτής δεν κάνει χρήση της ικανότητας πέδησης για το μεγαλύτερο τμήμα της τροχιάς. Στη φάση εξόδου και σε απόσταση

γύρω στα 125 m γίνεται χρήση πέδησης στην προσπάθεια διατήρησης ταχύτητας και κατεύθυνσης, διότι όπως προαναφέρθηκε, το όχημα προπορευόταν της τροχιάς του. Έτσι, προκειμένου να διανυθεί η τροχιά στο προκαθορισμένο διάστημα κατέστη αναγκαία η χρήση πέδησης.

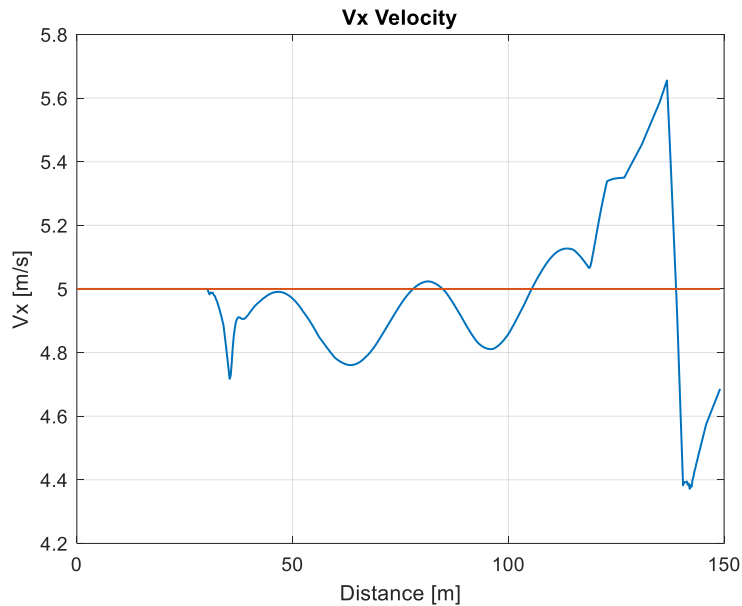
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα εισόδου u_3 - Acceleration Force συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-38: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_3 - ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

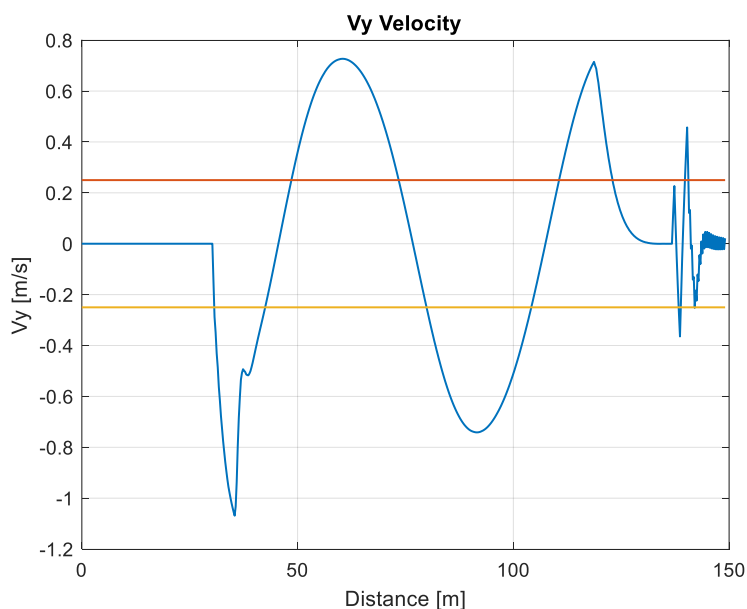
Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι λόγω της διαρκώς μεταβαλλόμενης τροχιάς τύπου S, γίνεται συχνή χρήση της ικανότητας επιτάχυνσης. Αυτό οφείλεται στις διαρκώς μεταβαλλόμενες διευθύνσεις και στην προσπάθεια του MPC - ελεγκτή να διατηρήσει τα επιθυμητά επίπεδα ταχύτητας. Η μέση τιμή του σήματος δύναμης επιτάχυνσης κυμαίνεται περί τα 300 Nt.

Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ταχυτήτων κατά x και y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-39: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_x ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το όχημα τείνει να διατηρήσει την ταχύτητα κίνησής του κατά x κοντά στην επιθυμητή τιμή με μικρές διακυμάνσεις. Οι μεταβολές ταχύτητας είναι αυτές που εξαναγκάζουν τον MPC – ελεγκτή στην εφαρμογή σημάτων δράσης $u(t)$ με στόχο την αποκατάσταση της. Η διακύμανση της ταχύτητας στην έξοδο της τροχιάς είναι αυτή που αναγκάζει τον ελεγκτή σε εφαρμογή σήματος επιτάχυνσης όπως παρατηρήθηκε και στο προηγούμενο διάγραμμα.



ΣΧΗΜΑ 4-40: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_y ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι η ταχύτητα μεταβάλλεται έντονα λόγω των αλλαγών διεύθυνσεως του οχήματος για την παρακολούθηση της βέλτιστης τροχιάς. Η μεταβολή της ταχύτητας εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά όπως οι μεταβολές της τροχιάς. Στην έξοδο στο τμήμα μηδενικής κλίσεως, η ταχύτητα εισέρχεται εντός των επιθυμητών ορίων, έχοντας όμως

μια μικρή και συνεχή αυξομείωση της τιμής της, όπως καταδεικνύεται και από το κοινό διάγραμμα των τροχιών.

Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι $MSE=1.3783$.

Mean Square Track Error

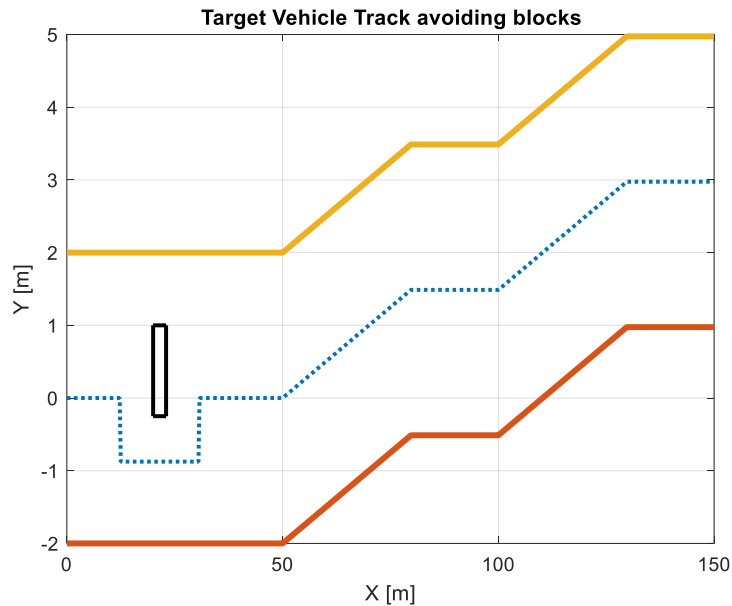
1.3783

4.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΕΜΠΟΔΙΩΝ ΣΕ ΤΡΟΧΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που αφορούν την αποφυγή εμποδίων. Αρχικά εξετάζεται το σενάριο του απλού εμποδίου, τοποθετημένου σε μια τμηματικά γραμμική τροχιά. Κατόπιν, εξετάζεται το σενάριο των δύο εμποδίων, τοποθετημένα κατά μήκος μιας ευθείας τροχιάς και τέλος, λαμβάνεται ως σενάριο η τοποθέτηση τριών εμποδίων σε μια τμηματικά γραμμική τροχιά.

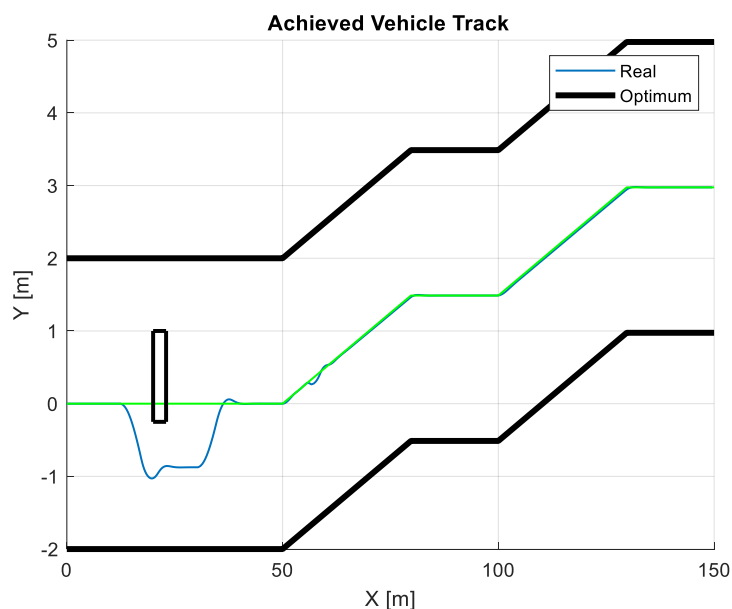
ΣΕΝΑΡΙΟ #1: (ΑΠΟΦΥΓΗ ΑΠΛΟΥ ΕΜΠΟΔΙΟΥ):

Στο συγκεκριμένο σενάριο (test case), θα μελετηθεί η ικανότητα του MPC – ελεγκτή της αποφυγής ενός εμποδίου, το οποίο έχει εισαχθεί πάνω σε μία Τμηματικά Γραμμική τροχιά. Για την αποφυγή του εμποδίου, διαμορφώνεται νέα τροχιά εκτροπής, εφόσον το εμπόδιο εισέρχεται στη βέλτιστη τροχιά κίνησης. Η εισαγωγή του εμποδίου, καθώς και η νέα προτεινόμενη τροχιά κίνησης, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 4-33: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΤΡΟΧΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΑΠΛΟΥ ΕΜΠΟΔΙΟΥ

Από το σχήμα φαίνεται πως προτείνεται μία νέα τροχιά αποφυγής του εμποδίου, η οποία παρεκκλίνει κατά ένα μέρος ανάλογο του μήκους του εμποδίου. Για το υπόλοιπο τμήμα η τροχιά διατηρείται εφόσον δεν υπεισέρχεται εμπόδιο σε κανένα σημείο της. Η νέα τροχιά αυτή προτείνεται ανάλογα με τη θέση του εμποδίου. Στη συνέχεια από τη διαδικασία προσομοίωσης προκύπτει η πραγματική τροχιά που επιτυγχάνεται από τη δράση του MPC – ελεγκτή:

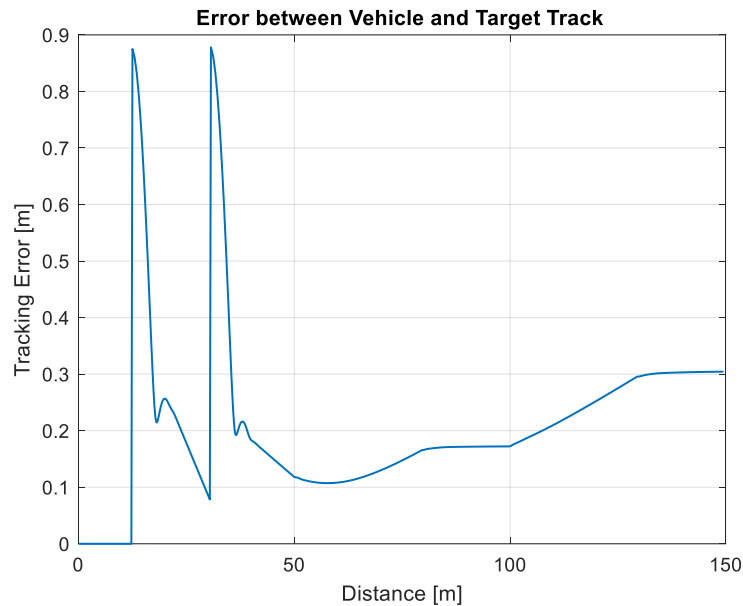


ΣΧΗΜΑ 4-34: ΑΡΧΙΚΗ ΤΡΟΧΙΑ – ΤΡΟΧΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΟΥ ΕΜΠΟΔΙΟΥ

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι το όχημα αποφεύγει επιτυχώς το εμπόδιο, αφήνοντας ταυτόχρονα μια απόσταση ασφαλείας από αυτό, όπως έχει ορισθεί στον κώδικα(Κεφάλαιο 3).

Αυτό γίνεται με ομαλό και συνεχή τρόπο, εκτελώντας μία βύθιση στην τροχιά για όλο το μήκος του εμποδίου. Στη συνέχεια ο MPC – ελεγκτής αποκαθιστά την κίνηση στην επιθυμητή τροχιά εκεί όπου δεν υπάρχουν εμπόδια. Επομένως, υπάρχει επιτυχία όσον αφορά την αποφυγή του εμποδίου από το συνολικό σύστημα.

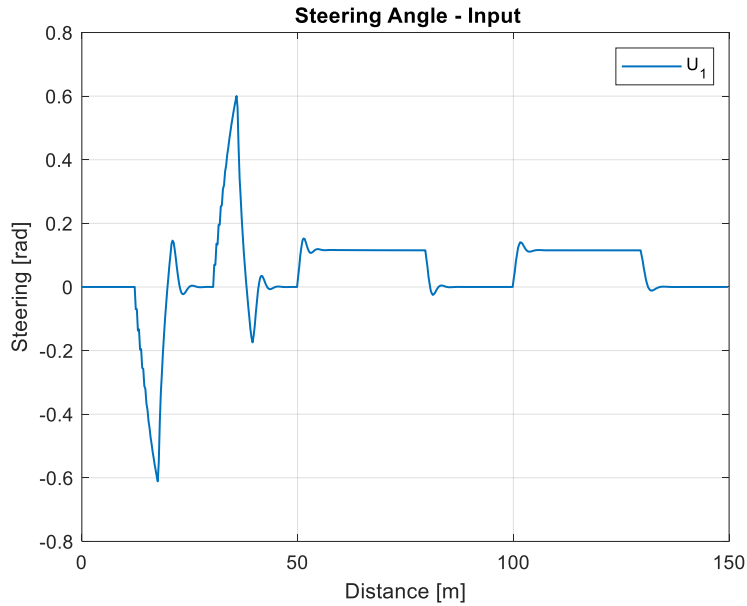
Η διακύμανση του σφάλματος φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



ΣΧΗΜΑ 4-41: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

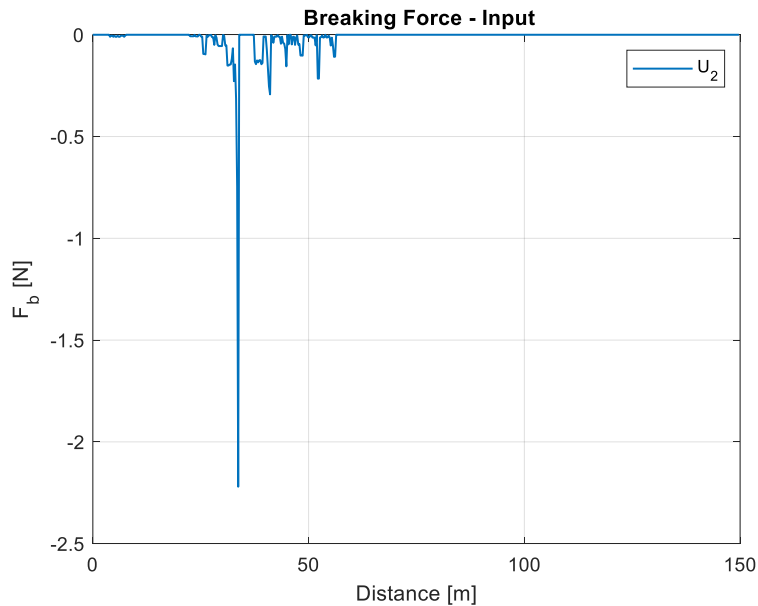
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι για το μεγαλύτερο τμήμα της τροχιάς, αυτό είναι μικρότερο των 0.3m, εκτός από δύο σημεία, όπου στιγμιαία υπάρχει αύξηση του σφάλματος. Αυτά τα σημεία βρίσκονται στη φάση της αποφυγής του εμποδίου και η επαναφορά του σφάλματος στα προηγούμενα χαμηλά επίπεδα είναι άμεση.

Παρακάτω φαίνεται η είσοδος u_1 συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-42: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_1 – STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

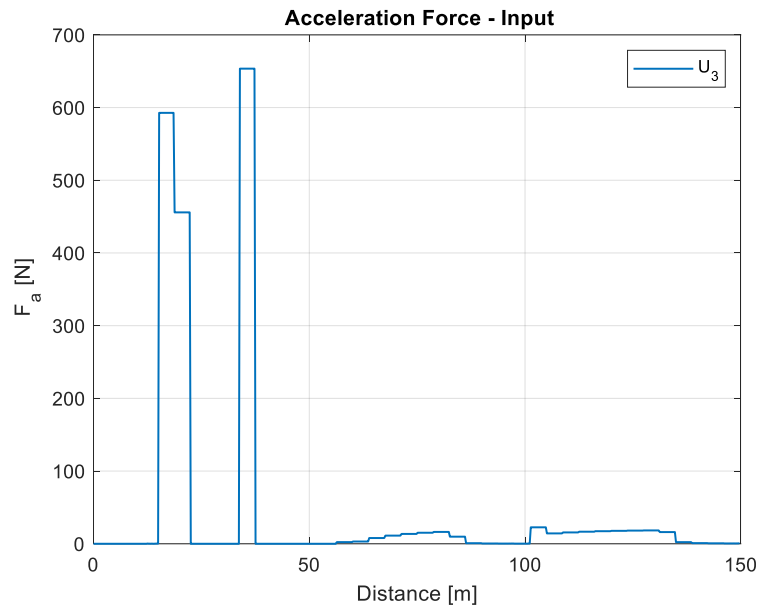
Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι στη φάση της αποφυγής εμποδίου το τιμόνι στρέφεται δεξιά και μετά αριστερά- κατά 0.6 rad και στις δύο περιπτώσεις, προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η αποφυγή του εμποδίου. Κατόπιν αυτού, το διάγραμμα ταυτίζεται με το αντίστοιχο διάγραμμα της ελεύθερης εμποδίων τροχιάς (Σχήμα 4-4). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της εισόδου u_2 συναρτήσεως της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-43: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_2 – BREAKING FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

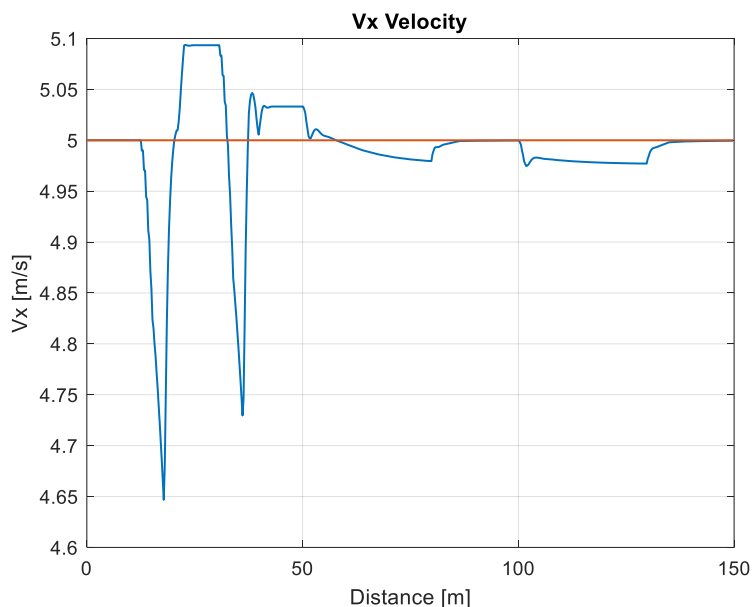
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η δύναμη πέδησης που εφαρμόζει ο ελεγκτής, στη φάση της αποφυγής του εμποδίου, προκειμένου αυτή να γίνει απρόσκοπτα. Όπως προκύπτει, η δύναμη πέδησης, μετά την επαναφορά του οχήματος στην αρχική του τροχιά, μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί.

Έπειτα, παρουσιάζεται το διάγραμμα της εισόδου u_3 , συνάρτησε της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



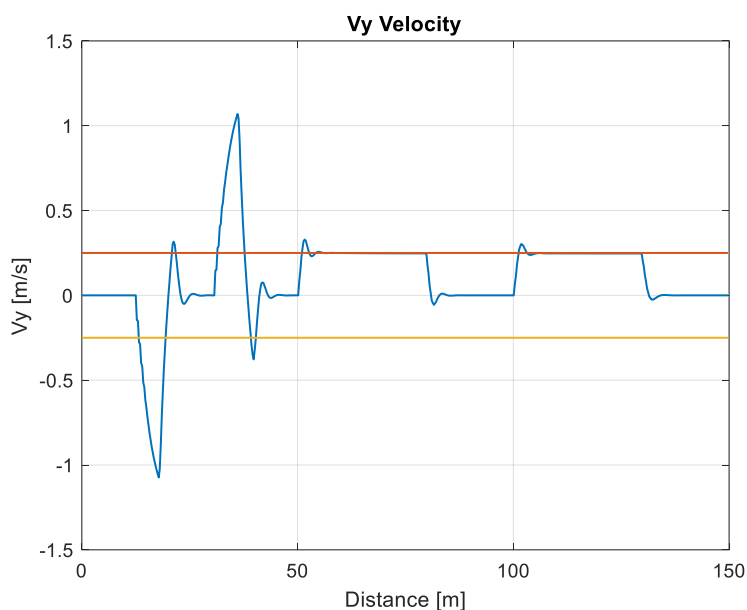
ΣΧΗΜΑ 4-44: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_3 – ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι στις θέσεις απόστασης όπου εισέρχεται το εμπόδιο υπάρχει μεταβολή της δύναμης επιτάχυνσης. Η μέγιστη δύναμη που παρατηρείται είναι της τάξης των 650 Nt. Να σημειωθεί ότι εάν συγκρίνουμε τα δύο διαγράμματα 4-35, 4-35, παρατηρούμε ότι το όχημα δεν χρησιμοποιεί δύναμη επιτάχυνσης και πέδησης ταυτόχρονα, λόγω φίλτρου που έχει χρησιμοποιηθεί για να αποφεύγεται αυτό το φαινόμενο (Παράρτημα Α).



ΣΧΗΜΑ 4-45: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_X ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο διάγραμμα, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας κατά τη φάση αποφυγής του εμποδίου, λόγω της δύναμης πέδησης που ασκήθηκε. Κατόπιν αυτού, η ταχύτητα αυξάνεται ξανά και επανέρχεται στα επιθυμητά επίπεδα.



ΣΧΗΜΑ 4-46: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_Y ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Στο διάγραμμα αυτό, η ταχύτητα V_y φαίνεται να κυμαίνεται ανάμεσα στις επιθυμητές τιμές +/- 0.25 m/s, όπως έχει οριστεί από την δημιουργία της επιθυμητής τροχιάς. Οι μόνες στιγμές που η ταχύτητα βγαίνει εκτός ορίων είναι κατά την φάση της αποφυγής του εμποδίου, αφού το όχημα βγαίνει εκτός της αρχικής του τροχιάς, προκειμένου να αποφύγει επιτυχώς το εμπόδιο.

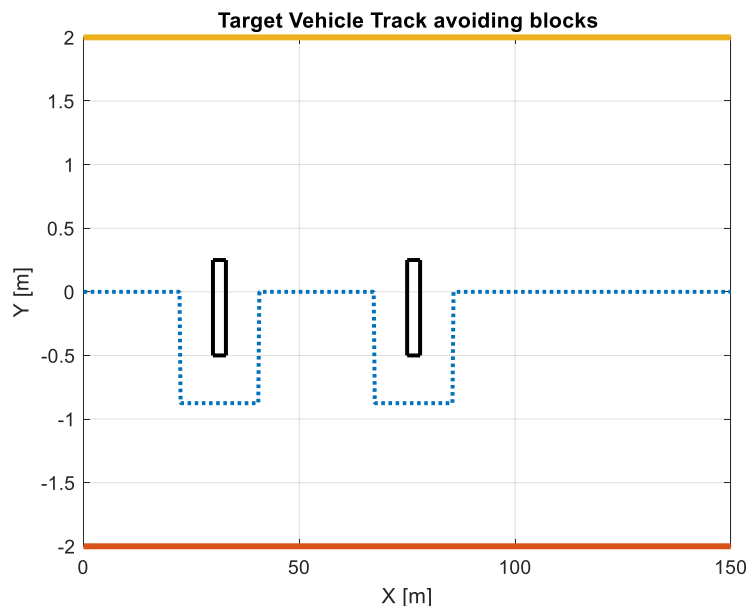
Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι $MSE=0.0783$.

Mean Square Track Error

0.0783

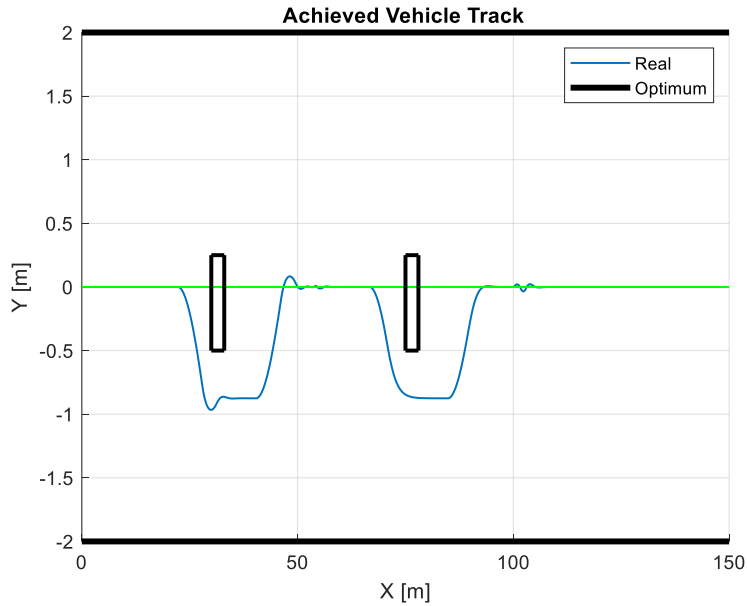
ΣΕΝΑΡΙΟ #2: (ΑΠΟΦΥΓΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ- ΕΥΘΕΙΑ ΤΡΟΧΙΑ)

Στο συγκεκριμένο σενάριο θα μελετηθεί η ικανότητα του MPC – ελεγκτή για την αποφυγή πολλαπλών εμποδίων, τα οποία έχουν εισαχθεί επί μίας ευθείας τροχιάς. Για την αποφυγή των εμποδίων διαμορφώνεται μια νέα τροχιά εκτροπής, εφόσον τα εμπόδια εισέρχονται στην επιθυμητή τροχιά κίνησης. Η εισαγωγή των εμποδίων καθώς και οι προτεινόμενες τροχιές κίνησης παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



ΣΧΗΜΑ 4-47: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΤΡΟΧΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ

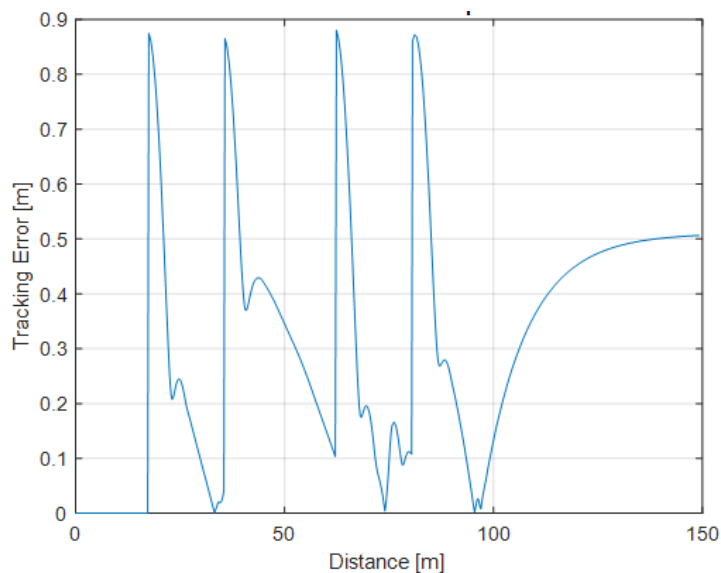
Από την προτεινόμενη τροχιά, παρατηρείται ότι προτείνεται απόκλιση για το πρώτο εμπόδιο. Στη συνέχεια, η τροχιά αποκαθίσταται στην αρχική και αρχίζει και πάλι εκτροπή καθώς πλησιάζει το δεύτερο εμπόδιο. Από την διαδικασία προσομοίωσης προκύπτει η τροχιά που επιτυγχάνεται μετά τη δράση του MPC – ελεγκτή:



ΣΧΗΜΑ 4-48: ΑΡΧΙΚΗ ΤΡΟΧΙΑ- ΤΡΟΧΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι ο MPC - ελεγκτής παρακολουθεί την τροποποιημένη τροχιά για την αποφυγή των δύο εμποδίων. Αυτό γίνεται με ομαλό και συνεχή τρόπο εκτελώντας μία βύθιση στην τροχιά για όλο το μήκος των εμποδίων. Μετά την αποφυγή των εμποδίων ο MPC - ελεγκτής αποκαθιστά την κίνηση στην επιθυμητή τροχιά. Επομένως παρατηρούμε την επιτυχή αποφυγή των πολλαπλών εμποδίων από το συνολικό σύστημα.

Η διακύμανση του σφάλματος φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

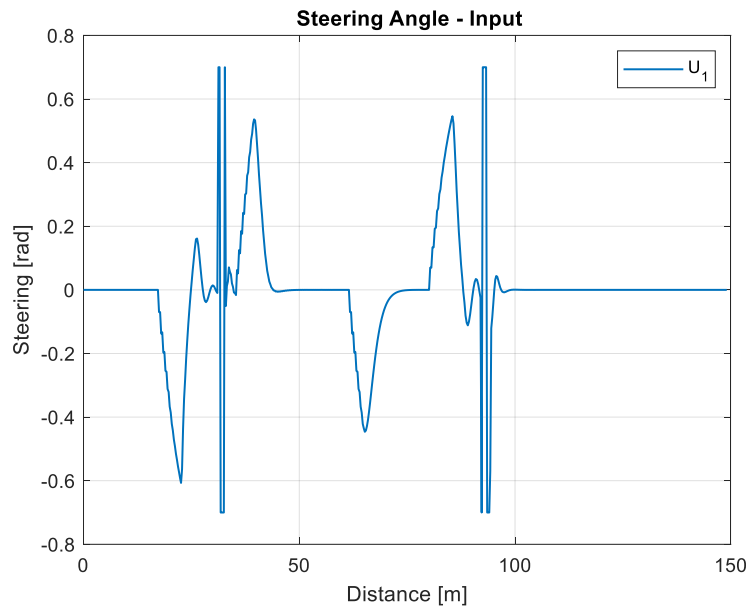


ΣΧΗΜΑ 4-49: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι το σφάλμα αυξάνεται στιγμιαία στα σημεία που το όχημα παρεκκλίνει της πορείας του προκειμένου να αποφύγει τα δύο εμπόδια. Στα

σημεία αυτά το σφάλμα είναι της τάξης των 0.85m. Στα υπόλοιπα σημεία της τροχιάς το σφάλμα παραμένει σε επίπεδα χαμηλότερα των 0.5m.

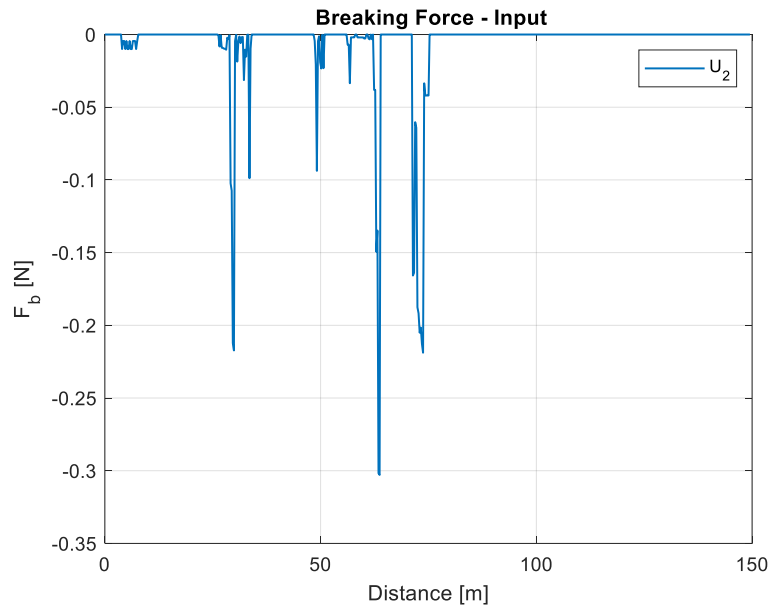
Παρακάτω φαίνεται η είσοδος u_1 συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-50: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_1 - STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι το σήμα εισόδου, που προέκυψε από τη συνάρτηση βελτιστοποίησης, στις φάσεις αποφυγής των δύο εμποδίων παρουσιάζει μεταβολές που οφείλονται στην αλλαγή κατεύθυνσης του οχήματος. Οι ακραίες στιγμιαίες τιμές που λαμβάνει το u_1 οφείλονται στην προσπάθεια της συνάρτησης βελτιστοποίησης να πετύχει το ελάχιστο σκορ, χωρίς προφανώς να γνωρίζει το ποιο μέγεθος αφορά η είσοδος αυτή.

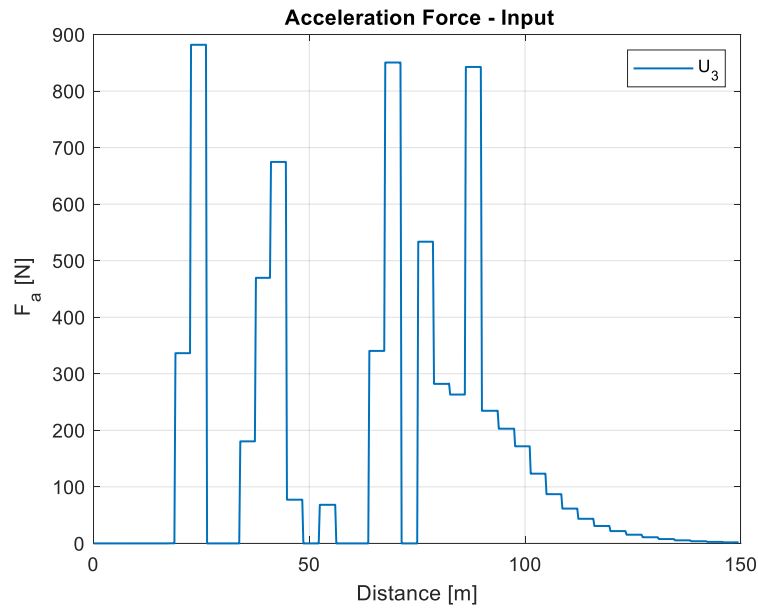
Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα της εισόδου u_2 συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-51: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U_2 – BREAKING FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η δύναμη πέδησης u_2 που εφαρμόζεται στο παραπάνω σενάριο. Όπως φαίνεται, η δύναμη πέδησης εφαρμόζεται κατά τις φάσεις αποφυγής των δύο εμποδίων από το όχημα. Αυτό συμβαίνει, κατά την αποφυγή του πρώτου εμποδίου και κατόπιν η δύναμη αυτή μηδενίζεται, όταν το όχημα επιστρέφει στην αρχική του τροχιά. Επίσης, κατά την αποφυγή του δεύτερου εμποδίου, αναπτύσσεται ξανά δύναμη πέδησης, η οποία μηδενίζεται και πάλι όταν το όχημα επιστρέψει στην τροχιά του.

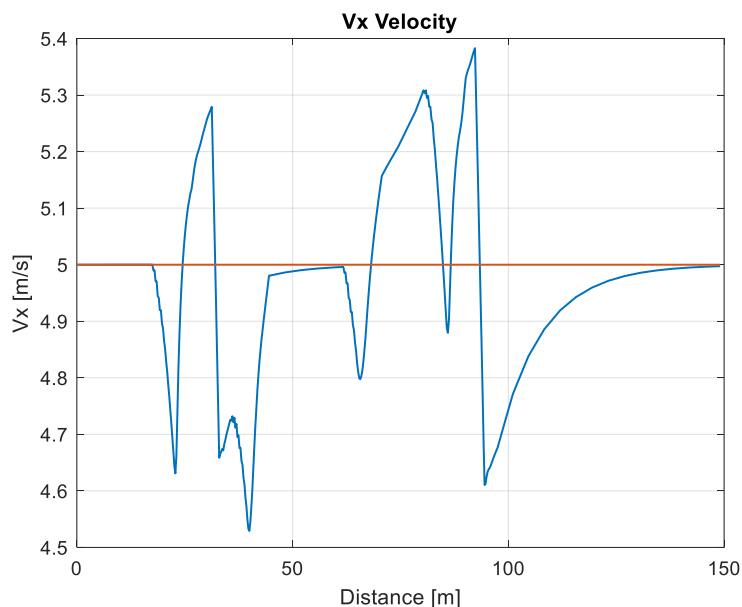
Έπειτα, παρουσιάζεται το διάγραμμα της εισόδου u_3 , συναρτήσεως της διανυόμενης απόστασης από το όχημα:



ΣΧΗΜΑ 4-52: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U₃ - ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι στις θέσεις απόστασης όπου εισέρχονται τα εμπόδια στην τροχιά, υπάρχει μεταβολή της δύναμης επιτάχυνσης. Η μέγιστη δύναμη που παρατηρείται είναι της τάξης των 900 Nt. Όταν το όχημα ξεπεράσει και τα δύο εμπόδια και εισέλθει στο ελεύθερο τμήμα της τροχιάς, η δύναμη τείνει να μηδενιστεί. Σημειώνεται ότι όπως και στο προηγούμενο σενάριο, δεν χρησιμοποιείται από το όχημα δύναμη επιτάχυνσης και πέδησης ταυτόχρονα.

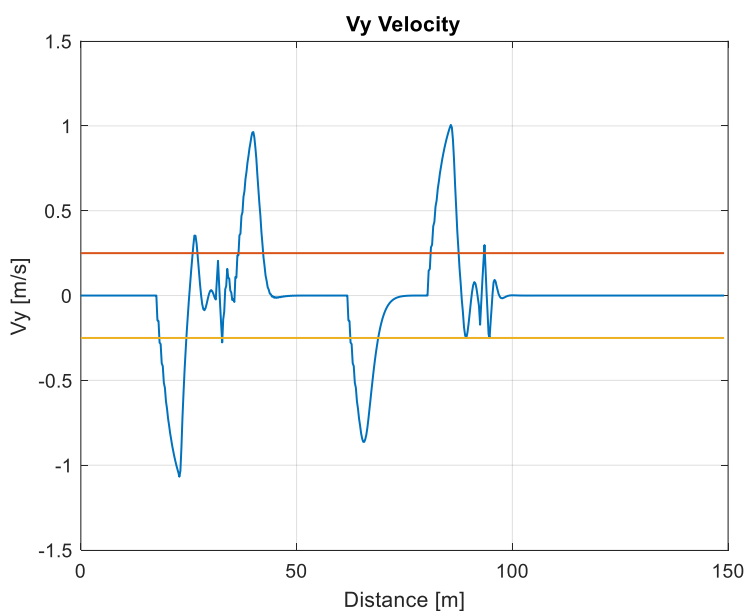
Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της ταχύτητας V_x συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-53: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_X ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο διάγραμμα, παρατηρείται αυξομείωση της ταχύτητας κατά τις φάσεις αποφυγής των δύο εμποδίων. Στην ενδιάμεση φάση, αλλά και στο τέλος της τροχιάς, η ταχύτητα προσεγγίζει την επιθυμητή ταχύτητα των 5m/s.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η ταχύτητα V_y συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



ΣΧΗΜΑ 4-54: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_Y ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Στο διάγραμμα αυτό, η ταχύτητα V_y φαίνεται να είναι μηδέν, εκτός από τα τέσσερα σημεία όπου η πορεία του οχήματος αλλάζει για να αποφευχθούν τα εμπόδια. Σε αυτές τις φάσεις,

αφού το όχημα στρίβει η ταχύτητα αυξάνει ή μειώνεται, ανάλογα με την κατεύθυνση του τιμονιού. Μόλις τα εμπόδια αποφευχθούν, και το όχημα επιστρέψει ξανά στην τροχιά του, η V_y θα μηδενιστεί, καθώς η τροχιά είναι ευθεία.

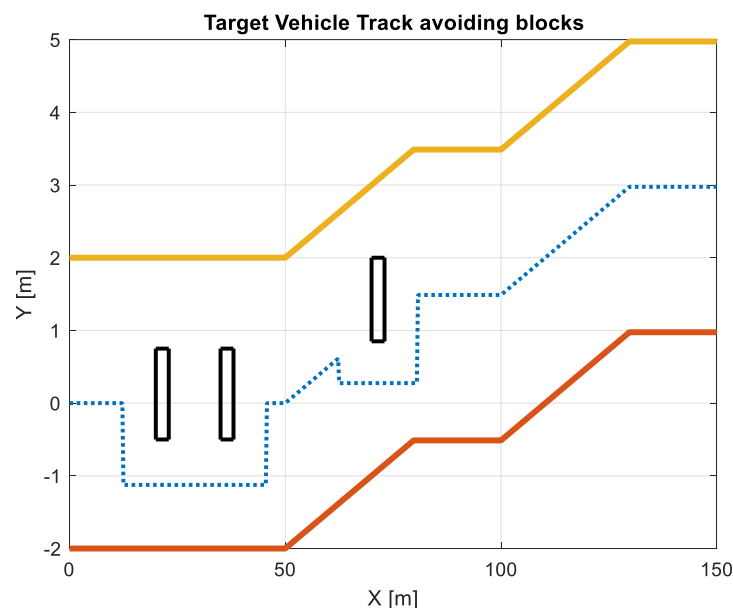
Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι $MSE=0.2685$.

Mean Square Track Error

0.2685

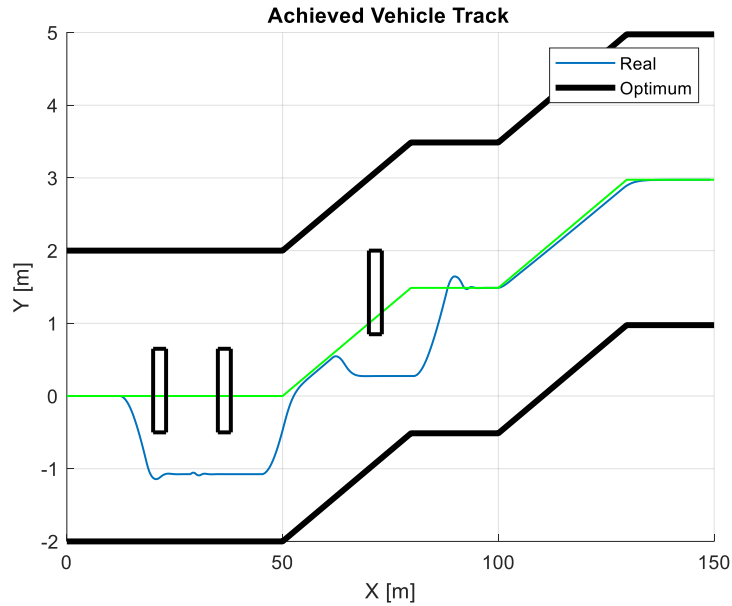
ΣΕΝΑΡΙΟ #3:(ΑΠΟΦΥΓΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ- ΤΡΟΧΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ):

Οι διαφορές αυτού του σεναρίου από το προηγούμενο είναι η τοποθέτηση των εμποδίων στην Τροχιά Γραμμικών Τμημάτων και η προσθήκη ενός ακόμη (τρίτου) εμποδίου. Για την αποφυγή των εμποδίων διαμορφώνεται και πάλι, νέα τροχιά εκτροπής, εφόσον τα εμπόδια εισέρχονται στη αρχική τροχιά κίνησης. Η εισαγωγή των εμποδίων καθώς και η προτεινόμενη τροχιά κίνησης παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



4-55: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΤΡΟΧΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΜΠΟΔΙΩΝ

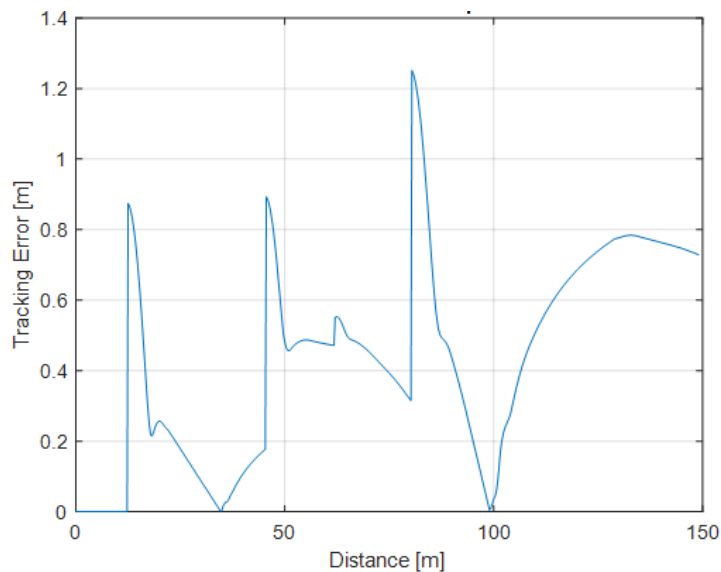
Από την προτεινόμενη τροχιά, παρατηρείται ότι προτείνεται απόκλιση για όλο το μήκος και των δύο αρχικών εμποδίων στην πρώτη φάση. Στη συνέχεια, η τροχιά αποκαθίσταται στην αρχική και αρχίζει και πάλι εκτροπή καθώς πλησιάζει το τρίτο εμπόδιο. Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι το τρίτο εμπόδιο έχει εισαχθεί στο τμήμα γραμμικής κλίσης επί της τροχιάς (όχι στο τμήμα μηδενικής κλίσης). Στη συνέχεια από την διαδικασία προσομοίωσης προκύπτει η τροχιά που επιτυγχάνεται από το όχημα, μετά τη δράση του MPC - ελεγκτή:



4-56: ΑΡΧΙΚΗ ΤΡΟΧΙΑ- ΤΡΟΧΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται ότι το όχημα είναι σε θέση να αποφύγει περισσότερα από ένα εμπόδια με επιτυχία (τα οποία εμπίπτουν στην αρχική γραμμική τροχιά). Αυτό γίνεται με ομαλό και συνεχή τρόπο, εκτελώντας μία βύθιση στην τροχιά για όλο το μήκος των εμποδίων. Τα δύο πρώτα εμπόδια αντιμετωπίζονται ως ένα συνεχόμενο (ενιαίο) εμπόδιο, ενώ το τρίτο εμπόδιο ως ένα μεμονωμένο εμπόδιο. Μετά την αποφυγή των εμποδίων αποκαθιστάται η κίνηση του οχήματος στην αρχική τροχιά.

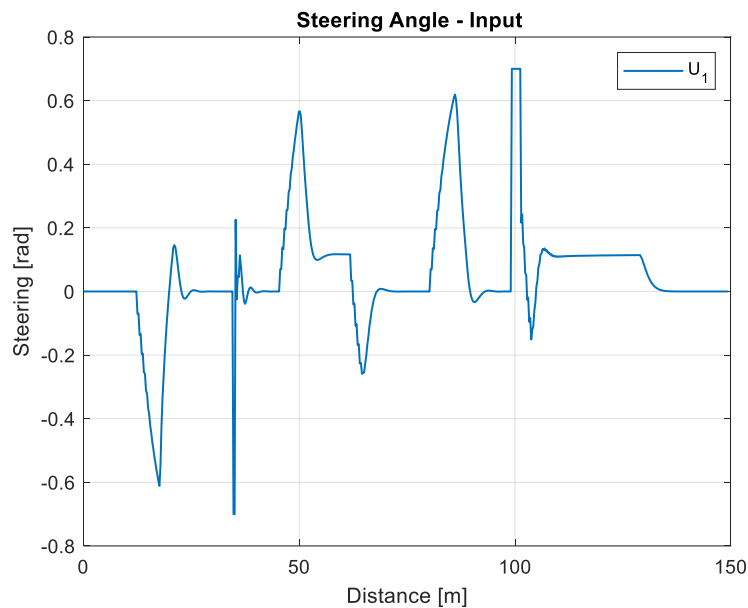
Παρακάτω φαίνεται το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής τροχιάς και της πραγματικής τροχιάς του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



4-57: ΣΦΑΛΜΑ ΤΡΟΧΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΧΗΜΑ

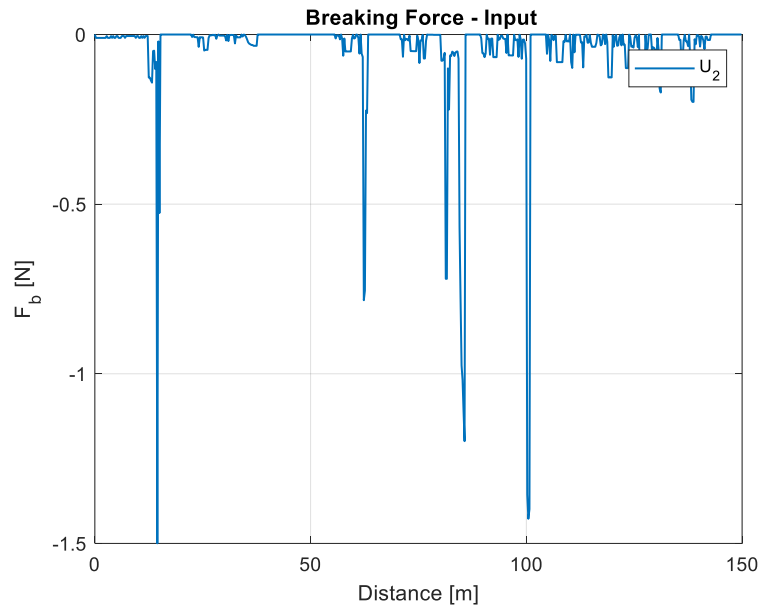
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το σφάλμα αυξάνεται ακαριαία στα σημεία όπου το όχημα ξεκινάει την αλλαγή της πορείας του για να αποφύγει το κάθε εμπόδιο, καθώς και στην επιστροφή του προς την αρχική τροχιά. Το σφάλμα φαίνεται σε δύο σημεία να ξεπερνάει τα 0.8m και σε ένα τα 1.2m, παρ' όλα αυτά ελαττώνεται κατευθείαν. Το ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι το όχημα καταφέρνει να αποφύγει επιτυχώς και τα τρία εμπόδια που συνάντησε στην τροχιά του.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η είσοδος u_1 συναρτήσει της απόστασης που διανύεται:



4-58: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ u_1 – STEERING ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

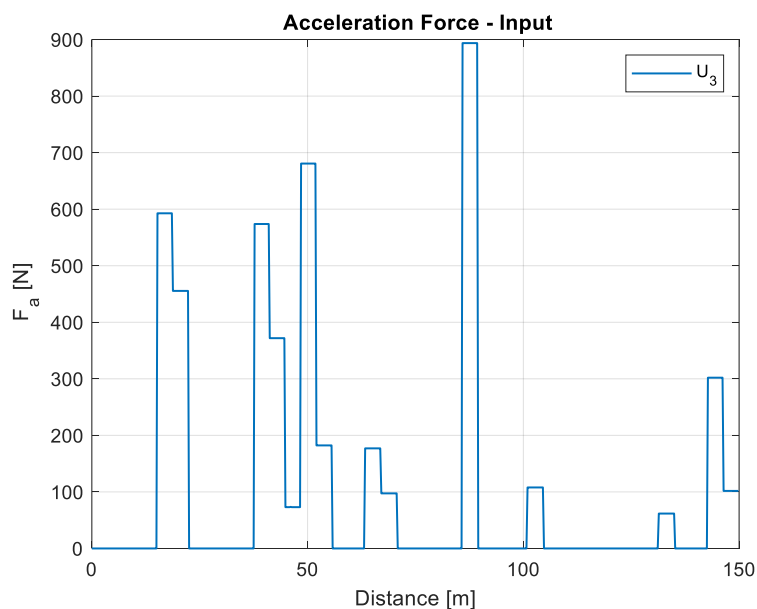
Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει ότι η γωνία του τιμονιού αλλάζει ανάλογα με τις αλλαγές πορείας που είναι απαραίτητο να πραγματοποιήσει το όχημα, προκειμένου να αποφύγει με επιτυχία τα εμπόδια που εμφανίζονται στην πορεία του. Στα σημεία που το όχημα βγαίνει εκτός πορείας, αλλά και στα σημεία που εισέρχεται ξανά σε αυτήν, παρατηρείται αλλαγή στην κατεύθυνση της πορείας του.



4-59: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U₂ – BREAKING FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το διάγραμμα της δύναμης φρεναρίσματος, προκύπτει ότι το όχημα κάνει χρήση αυτής όταν κατά τη φάση αποφυγής του τρίτου εμποδίου, και όταν η ταχύτητά του είναι αυξημένη, όπως φαίνεται από το διάγραμμα της ταχύτητας παρακάτω (Σχήμα 4-51). Επίσης, σε σύγκριση με το Σχήμα 4-50, φαίνεται ότι η χρήση πέδησης και επιτάχυνσης δεν γίνεται ταυτόχρονα.

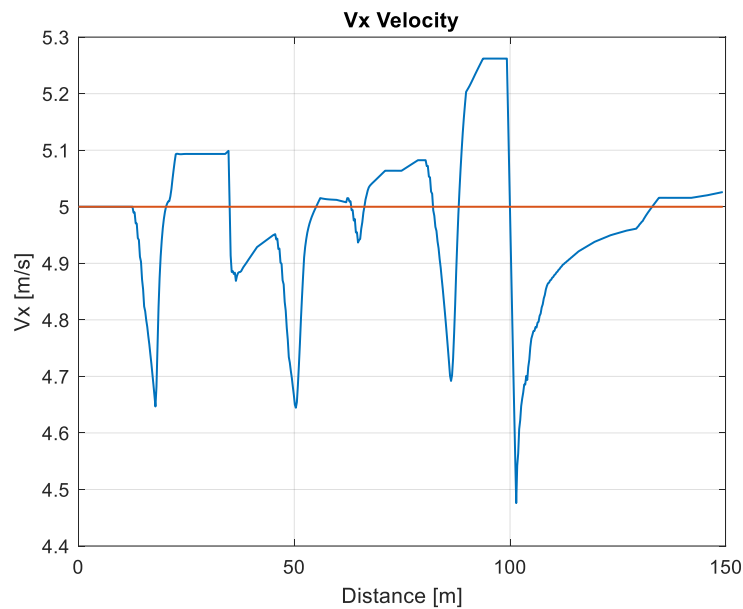
Το επόμενο σχήμα αφορά την μεταβολή της εισόδου u_1 σε σχέση με την διανυόμενη απόσταση:



4-60: ΣΗΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ U₃ – ACCELERATION FORCE ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας στις φάσεις αποφυγής των εμποδίων. Η δύναμη αυτή φθίνει καθώς το όχημα επανέρχεται στην αρχική του τροχιά, μέχρι που μηδενίζεται στο τέλος αυτής.

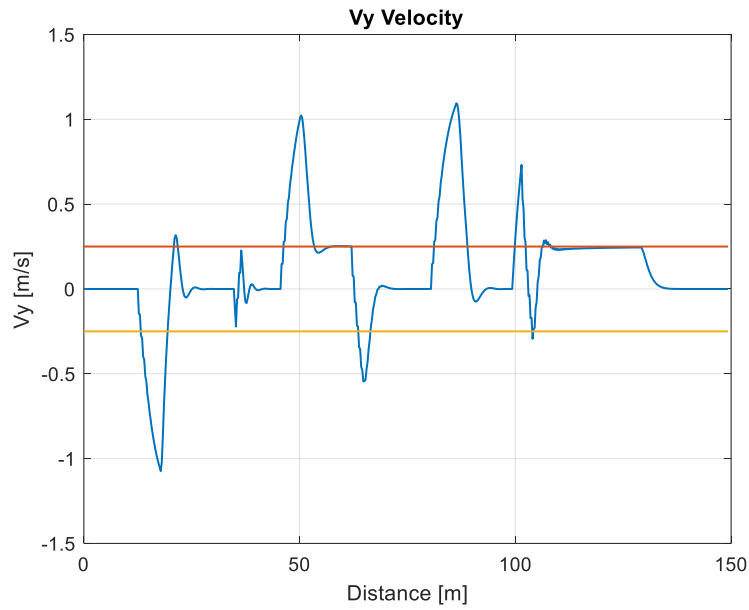
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της ταχύτητας V_x σε συνάρτηση με τη διανυόμενη απόσταση:



4-61: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_x ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μια μεταβολή της ταχύτητας από την αρχική, της τάξης των ± 0.3 m/s. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα μειώνεται στις φάσεις όπου το όχημα εξέρχεται της τροχιάς του και εισέρχεται πάλι σε αυτήν. Στα υπόλοιπα σημεία της τροχιάς η ταχύτητα προσεγγίζει την επιθυμητή.

Το επόμενο διάγραμμα παρατίθεται η ταχύτητα V_y του οχήματος συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης:



4-62: ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_y ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η ταχύτητα παραμένει μεταξύ των επιθυμητών επιπέδων, εκτός από τα σημεία όπως το όχημα αλλάζει πορεία για να αποφύγει τα εμπόδια. Στα τμήματα της τροχιάς όπου το όχημα δεν στρίβει η ταχύτητα V_y είναι προφανώς μηδενική.

Σημείωση: Σε αυτό το test case το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι MSE=0.2768.

Mean Square Track Error

0.2768

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, παρουσιάστηκε και υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Matlab®, ένα μοντέλο οχήματος. Ο έλεγχος κίνησης του οχήματος πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός προβλεπτικού ελεγκτή MPC (Model Predictive Control). Ο MPC – ελεγκτής που υλοποιήθηκε, είναι μη γραμμικός. Η εφαρμογή του βέλτιστου ελέγχου απαιτεί διατύπωση μιας συνάρτησης κόστους (cost function), η οποία συμπεριλαμβάνει νόρμες των μεγεθών της απόστασης από μία επιθυμητή τροχιά καθώς και τις αντίστοιχες νόρμες για το διάνυσμα εισόδου $u(t)$ του συστήματος. Η συνάρτηση κόστους απαιτεί την ελαχιστοποίηση μιας τιμής (score), που προκύπτει από την εφαρμογή αλγορίθμων για τον εντοπισμό των σημάτων διέγερσης $u(t)$ που επιτυγχάνουν το ελάχιστο κόστος (minimum cost). Έτσι, η πλοήγηση του οχήματος γίνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους, με στόχο το όχημα να πετύχει την επιθυμητή απόκριση ως προς την τροχιά και την ταχύτητα κίνησης του. Το μοντέλο των εξισώσεων κίνησης του οχήματος, καθώς και η συνάρτηση κόστους, είναι μη γραμμικές συναρτήσεις. Για τον μαθηματικό υπολογισμό των ελαχίστων της συνάρτησης κόστους, χρησιμοποιήθηκε η προσφερόμενη συνάρτηση από το περιβάλλον Matlab® για ελαχιστοποίηση, `fmincon()`. Τα αποτελέσματα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης παράγουν την τροχιά κίνησης του οχήματος και δίνουν τη δυνατότητα του ελέγχου για ελάχιστα σφάλματα τροχιάς και ταχύτητας.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η επίδραση των Οριζόντων Ελέγχου και Δράσης για τη λειτουργία του MPC – ελεγκτή. Αποδεικνύεται ότι για καλή παρακολούθηση των τροχιών απαιτούνται μικρές τιμές του Οριζοντα Ελέγχου, οι οποίες είναι επίσης κοντά-ή ίσες- με τις τιμές που επιλέχθηκαν για τον Οριζοντα Πρόβλεψης. Μεγάλες τιμές του Οριζοντα Ελέγχου οδηγούν σε περισσότερους υπολογισμούς και συμπερίληψη μελλοντικών σημείων τροχιάς. Το τελευταίο, οδηγεί σε σήματα ελέγχου που κινούνται μελλοντικά για τις επόμενες θέσεις. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, ειδικά σε απαιτητικές τροχιές γρήγορης μεταβολής διευθύνσεων, η παραγόμενη τροχιά κίνησης να μην είναι κοντά στην επιθυμητή. Επίσης, εξακριβώθηκε ότι μεγάλη διαφορά τιμών μεταξύ των Οριζόντων Ελέγχου και Δράσης οδηγεί το σύστημα σε μη ικανοποιητική συμπεριφορά για την παρακολούθηση τροχιάς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης και αναζήτησης βέλτιστων εισόδων για το σύστημα με χρήση του οριζοντα ελέγχου, τα υπόλοιπα σημεία του οριζοντα δράσης χρησιμοποιούν την τελευταία παραχθείσα βέλτιστη εντολή ελέγχου. Κατά συνέπεια, όταν οι τροχιές έχουν σχετικά γρήγορες μεταβολές διευθύνσεων, η επιλογή των σημάτων ελέγχου για το υπόλοιπο τμήμα του παραθύρου δεν είναι βέλτιστη, και οδηγεί σε μη καλή προσαρμογή στην επιθυμητή τροχιά.

Για τον έλεγχο των επιδόσεων του συνολικού συστήματος οχήματος – ελεγκτή, διαμορφώθηκαν δύο τύποι σεναρίων. Στον πρώτο τύπο, στόχος ήταν η παρακολούθηση

τροχιών με μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά διεύθυνσης/κλίσης, ενώ στο δεύτερο τύπο σεναρίων, ελέγχθηκε η ικανότητα του συστήματος στην αποφυγή εμποδίων (block avoidance) που βρίσκονται σε καθορισμένα σημεία της τροχιάς κίνησης του οχήματος.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τις γενικές διαδικασίες και τη μελέτη των σεναρίων.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ

Για τον έλεγχο διατήρησης της τροχιάς χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σενάρια: Τροχιά Γραμμικών Τμημάτων, Τροχιά U-Turn, Τροχιά Fish Hook και Τροχιά τύπου S. Σε όλα τα σενάρια διατηρήθηκαν σταθερά τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι τόσο του οχήματος όσο και του MPC – ελεγκτή. Ως κριτήρια ελέγχου των αποτελεσμάτων κάθε σεναρίου, χρησιμοποιήθηκαν τα παραγόμενα γραφήματα από την επιθυμητή τροχιά σε σχέση με την τροχιά που επιτυγχάνει το όχημα υπό τον έλεγχο του MPC. Επιπλέον, μία εκτιμήτρια για τον έλεγχο των επιδόσεων τροχιάς, είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Mean Square Error – MSE) το οποίο υπολογίζεται κατά τη διάρκεια παρακολούθησης σε κάθε σημείο της τροχιάς. Τα αποτελέσματα των σεναρίων κατέδειξαν ικανοποιητική δράση του MPC – ελεγκτή για όλους τους τύπους τροχιάς πετυχαίνοντας καλή παρακολούθηση με χαμηλό Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα για τις τιμές οριζόντων που επιλέχθηκαν. Το σφάλμα τροχιάς κυμαινόταν σταθερά μεταξύ κάποιων μέγιστων τιμών και μηδενισμού. Οι ταχύτητες κίνησης του οχήματος, με την υποβοήθηση των σημάτων εισόδου, επίσης διατηρήθηκαν σε ικανοποιητικά επίπεδα. Οι περιορισμοί για τα σήματα εισόδου τηρήθηκαν σε όλα τα σενάρια. Επιπρόσθετα οι γραφικές παραστάσεις τροχιάς του οχήματος κατέδειξαν ταύτιση των καμπυλών κίνησης και της επιθυμητής τροχιάς προς παρακολούθηση. Οι διαφορετικοί τύποι των καμπυλών παρακολούθησης διασφάλισαν τον επιτυχή έλεγχο τροχιάς για μία πληθώρα καμπυλών διαφορετικών τύπων και συνθηκών.

Τα αποτελέσματα των τεσσάρων σεναρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1 που ακολουθεί:

Πίνακας 5-1: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Απόστασης για κάθε τύπο Τροχιάς

Τύπος Τροχιάς	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
Τμηματικά Γραμμική	0.0184
Αναστροφής	0.0871
Αγκιστριού	0.0084
Τύπου S	1.3783

Όπως παρατηρείται από τον πίνακα, τα σφάλματα απόστασης παραμένουν χαμηλά σε όλα τα σενάρια.

Τέλος, καταδείχτηκε ότι η χρήση του MPC – ελεγκτή με τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων, οδηγεί σε ικανοποιητικό έλεγχο του οχήματος.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΜΠΟΔΙΩΝ

Σε συνέχεια της προηγούμενης σειράς προσομοιώσεων, μελετήθηκαν τρία σενάρια για την αποφυγή εμποδίων. Σε κάθε σενάριο εισήχθησαν εμπόδια σε καθορισμένες θέσεις της τροχιάς του οχήματος. Εφόσον κάποιο εμπόδιο βρίσκεται επί της τροχιάς κίνησης του οχήματος, το μοντέλο προσομοίωσης προβλέπει τοπική μεταβολή της τροχιάς, με στόχο την αποφυγή του. Μετά την αποφυγή του εμποδίου η τροχιά οδηγείται στις συντεταγμένες που προέβλεπε η αρχική – μη εκτραπέισα τροχιά που είχε ορισθεί από τον χρήστη.

Τα σενάρια για την αποφυγή εμποδίων (block avoidance), κατέδειξαν ότι ο MPC – ελεγκτής αποφεύγει ικανοποιητικά μεμονωμένα ή πολλαπλά εμπόδια. Οι εκτροπές από την τροχιά είναι ανάλογες των διαστάσεων των εμποδίων.

Αξίζει να σημειωθεί με βάση τις παραμέτρους της προσομοίωσης, ότι η επεξεργασία του ελέγχου τροχιάς αφορά σε σημεία χρονικής απόστασης των 50 ms (βάση του ορισμένου $dt = 0.05$ για τα σενάρια), χρόνος ο οποίος είναι πολύ μικρός σε σχέση με τα αντανακλαστικά που διαθέτει ένας μέσος οδηγός (της τάξης των 200 ms).

5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από τη μελέτη του συνολικού συστήματος (μοντέλο οχήματος και MPC – ελεγκτή) για όλα τα σενάρια, φαίνεται ότι ο έλεγχος συμπεριφέρεται ικανοποιητικά. Η παρακολούθηση τροχιάς με μεταβλητές κλίσεις και κατευθύνσεις δίνει ρεαλιστικά πρότυπα δρόμων για την μελέτη της κίνησης οχήματος. Επιπλέον, η αποφυγή εμποδίων δρα επικουρικά στον έλεγχο του οχήματος, διευκολύνοντας την πλοήγηση όταν εμφανίζονται.

Ο έλεγχος που εφαρμόστηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, είναι μη γραμμικός (NMPC) και στοχεύει στον έλεγχο ενός μη γραμμικού συστήματος (μοντέλο οχήματος). Όπως παρουσιάστηκε και στις προηγούμενες ενότητες, είναι σημαντική η κατάλληλη εκλογή των παραμέτρων του MPC – ελεγκτή που αφορά τους Ορίζοντες Ελέγχου και Πρόβλεψης. Η εκλογή τους επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία και τις επιδόσεις του συνολικού συστήματος (οχήματος – ελεγκτή) και μεταβάλλει σημαντικά τον όγκο των απαιτούμενων αριθμητικών υπολογισμών. Μεγάλα παράθυρα ελέγχου συνεπάγονται σημαντική αύξηση του υπολογιστικού φόρτου. Ο υπολογιστικός φόρτος για την ικανοποίηση του και την επίτευξη αποτελεσμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα, απαιτεί με τη σειρά του, εξελιγμένα και γρήγορα επεξεργαστικά συστήματα (micro-processors) για να επιτευχθεί η λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο (Real Time εφαρμογές). Ο υπολογιστικός φόρτος των αλγορίθμων αυτού του τύπου, είναι ένα σημαντικό θέμα για την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου ελέγχου. Επίσης σημαντική είναι η συνάρτηση κόστους, που θα χρησιμοποιηθεί για την αναζήτηση βέλτιστης λύσης. Σύνθετα και πολύπλοκα προβλήματα, με πολλαπλούς περιορισμούς, και συναρτήσεις κόστους με πολλές παραμέτρους, μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση του υπολογιστικού φόρτου και του χρόνου αναζήτησης, καθώς και σε προβλήματα εντοπισμού των βέλτιστων λύσεων για το πρόβλημα.

Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και τα σενάρια που επιλέχθηκαν αφορούν προκαθορισμένες τροχιές τις οποίες το όχημα καλείται να ακολουθήσει. Θα αποτελούσε πρόκληση η δημιουργία ενός ελεγκτή, ο οποίος θα μπορούσε να πλοηγήσει το όχημα σε πραγματικό χρόνο και σε ρεαλιστικές συνθήκες οδήγησης. Επίσης, ο συγκεκριμένος MPC ελεγκτής θα μπορούσε να εφαρμοσθεί και σε διαφορετικούς τύπους οχημάτων.

Σημαντική επίσης είναι και η εκλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για την εύρεση των βέλτιστων μίας πολύπλοκης συνάρτησης. Για αυτόν τον λόγο η βιβλιογραφία, που αφορά τα προβλήματα αναζήτησης βέλτιστου είναι πλούσια σε τεχνικές αναζήτησης και επίλυσης. Τέτοιες τεχνικές αφορούν σε μεθόδους όπως το Simulated Annealing (Προσομοιωμένη Ανόπτηση), οι Genetic Algorithms (Γενετικοί Αλγόριθμοι), σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης Particle Swarm, κ.ο.κ. Η επιλογή των κατάλληλων αλγορίθμων ανάλογα με τον τύπο και τη φύση του προβλήματος μεταβάλλει σημαντικά τα αποτελέσματα αναζήτησης των βέλτιστων λύσεων. Η επίδραση της εκλογής του αλγορίθμου επίλυσης επιδρά και ως προς τον χρόνο εντοπισμού τους και την ακρίβεια τους. Άρα, η επιλογή αυτών των αλγορίθμων είναι σημαντική για την επίτευξη καλών αποτελεσμάτων σε προβλήματα που αφορούν μη γραμμικό έλεγχο βελτιστοποίησης.

Από πρακτικής πλευράς, ο έλεγχος ενός οχήματος αποτελεί ένα τύπο ελέγχου κάτω από δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση αφορά στην υποβοήθηση του οδηγού του οχήματος, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στον αποκλειστικό και αυτόνομο έλεγχο του οχήματος από το σύστημα ελέγχου. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η εφαρμογή ενός τέτοιου ελέγχου βασίζεται σε μεγέθη τηλεμετρίας τα οποία πρέπει να είναι δυναμικά στο χρόνο και να βασίζονται στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα δρόμο κίνησης. Σε άλλη περίπτωση, ο έλεγχος μπορεί να βασιστεί μόνο σε τοπικά δεδομένα και μπορεί απλά να υποβοηθήσει τον οδηγό χωρίς να μπορεί να αναλάβει εξ' ολοκλήρου την πλοήγηση του οχήματος. Οι σύγχρονες τάσεις εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία δείχνουν ότι ο βοηθητικός έλεγχος πλοήγησης (με χρήση των συστημάτων αυτόνομης οδήγησης, αποφυγής εμποδίων, παρκαρίσματος κλπ) τείνει να εξελιχθεί προς την εξολοκλήρου αυτόνομη πλοήγηση του οχήματος.

Για το λόγο αυτό, είναι σημαντική και η συνεισφορά των δικτύων μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων. Τα δεδομένα τηλεμετρίας αποστέλλονται και διανέμονται σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που απαιτεί αξιοπιστία και ταχύτητα για ένα δίκτυο μετάδοσης δεδομένων. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) καθώς και οι μετεξελίξεις τους αποτελούν μία βάση για την ανάπτυξη δικτύων κορμού όπου θα διανέμει και επεξεργάζεται τα δεδομένα πλοήγησης.

Κατά συνέπεια, το πρόβλημα της ασφαλούς και ακριβούς πλοήγησης ενός οχήματος συνδυάζει ένα μεγάλο σύνολο από επιστήμες και τεχνικές επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων, το οποίο τείνει να εξελιχθεί παράλληλα με την εξέλιξη και τις βελτιώσεις των συγκεκριμένων τεχνολογιών και των τεχνικών ελέγχου στο άμεσο μέλλον.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-ΚΩΔΙΚΑΣ

5.4.1 A-1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

```
function [xn,fx,fy,ey]=vdyna(x,u,dt)

%*****%                               Model Parameters Definition
%*****%

m = 2050;           %the mass of the vehicle
Jz = 3344;         %yaw inertia of the vehicle
lf = 1.43;         %distance from the vehicle center of gravity to the front
lr = 1.47;         %distance from the vehicle center of gravity to the rear
sigma = 0.7;       %constant (vehicle dependant) distribution parameter
wt = 1.63;         %disturbance vectors
mu = 1;           %the friction coefficient

B1 = -10.5;        %tire parameters calibrated using experimental data
B2 = -10.5;
B3 = -12.7;
B4 = -12.7;
C1 = 0.5;
C2 = 0.5;
C3 = 0.5;
C4 = 0.5;

g = 9.81;         %gravity accelerator
Fz1 = (lr*m*g)/(2*(lr+lf)); %vertical forces
Fz2 = (lr*m*g)/(2*(lr+lf));
Fz3 = (lf*m*g)/(2*(lr+lf));
Fz4 = (lf*m*g)/(2*(lr+lf));

Rs = 5;          %radius of curvature
c = 1.77;        %vehicle width
a = 2.12;        %distances of the center of gravity from the front and rear vehicle bumpers
b = 2.66;

alpha_min=-4/180*pi;
alpha_max=4/180*pi;

ey_min=-2.5;
ey_max=2.5;

P_dist=0.75;     % Power distribution factor on axis (0<=P_dist<=1)

%*****%
%                               Model Calculations
%*****%

%The tire slip angles
alpha1 = (x(2)+lf*x(3))/(x(1)-(wt/2)*x(3))-u(1);
alpha2 = (x(2)+lf*x(3))/(x(1)+(wt/2)*x(3))-u(1);
alpha3 = (x(2)-lr*x(3))/(x(1)-(wt/2)*x(3));
alpha4 = (x(2)-lr*x(3))/(x(1)+(wt/2)*x(3));

% COnstraints on alpha parameter
if(alpha1<alpha_min)
```

```

    alpha1=alpha_min;
elseif (alpha1>alpha_max)
    alpha1=alpha_max;
end

if (alpha2<alpha_min)
    alpha2=alpha_min;
elseif (alpha2>alpha_max)
    alpha2=alpha_max;
end

if (alpha3<alpha_min)
    alpha3=alpha_min;
elseif (alpha3>alpha_max)
    alpha3=alpha_max;
end

if (alpha4<alpha_min)
    alpha4=alpha_min;
elseif (alpha4>alpha_max)
    alpha4=alpha_max;
end

%Pedal braking, distributes braking forces according to the following relation
fx1 = sigma*(u(2)/2);
fx2 = sigma*(u(2)/2);
fx3 = (1-sigma)*(u(2)/2);
fx4 = (1-sigma)*(u(2)/2);
fx = [fx1;fx2;fx3;fx4];

%computed using a simplified version of the Pacejka magic tire formula
% if (((mu*Fz1)^2 - (fx1)^2*sin(atan(B1*alpha1)))>0)
    fy1 = sqrt((mu*Fz1)^2 - (fx1)^2*sin(atan(B1*alpha1)));
% else
%     fy1=0;
% end
% if (((mu*Fz2)^2 - (fx2)^2*sin(atan(B2*alpha2)))>0)
    fy2 = sqrt((mu*Fz2)^2 - (fx2)^2*sin(atan(B2*alpha2)));
% else
%     fy2=0;
% end
% if (((mu*Fz3)^2 - (fx3)^2*sin(atan(B3*alpha3)))>0)
    fy3 = sqrt((mu*Fz3)^2 - (fx3)^2*sin(atan(B3*alpha3)));
% else
%     fy3=0;
% end
% if (((mu*Fz4)^2 - (fx4)^2*sin(atan(B4*alpha4)))>0)
    fy4 = sqrt((mu*Fz4)^2 - (fx4)^2*sin(atan(B4*alpha4)));
% else
%     fy4=0;
% end
fy = [fy1;fy2;fy3;fy4];

Fx1 = fx1*cos(u(1))-fy1*sin(u(1));
Fx2 = fx2*cos(u(1))-fy2*sin(u(1));
Fx3 = fx3;
Fx4 = fx4;
Fx = [Fx1;Fx2;Fx3;Fx4];

```



```

Fy1 = fx1*sin(u(1))+fy1*cos(u(1));
Fy2 = fx1*sin(u(1))+fy2*cos(u(1));
Fy3 = fy3;
Fy4 = fy4;
Fy = [Fy1;Fy2;Fy3;Fy4];

```

% Front and Raer Dstribution of acceleration

```

Pf=P_dist*u(3);
Pr=(1-P_dist)*u(3);

```

%compute four vehicle corners from the lane centerline

```

ey1 = x(5)+(c/2)+(a*sin(x(4)));
ey2 = x(5)-(c/2)+(a*sin(x(4)));
ey3 = x(5)+(c/2)-(b*sin(x(4)));
ey4 = x(5)-(c/2)-(b*sin(x(4)));

```

% Constraints on ey

```

if (ey1<ey_min)
    ey1=ey_min;
elseif (ey1>ey_max)
    ey1=ey_max;
end

```

```

if (ey2<ey_min)
    ey2=ey_min;
elseif (ey2>ey_max)
    ey2=ey_max;
end

```

```

if (ey3<ey_min)
    ey3=ey_min;
elseif (ey3>ey_max)
    ey3=ey_max;
end

```

```

if (ey4<ey_min)
    ey4=ey_min;
elseif (ey4>ey_max)
    ey4=ey_max;
end

```

```

ey = [ey1;ey2;ey3;ey4];

```

%compute from differential equations to describe the vehicle motion within the lane

```

phidot_s = (1/(Rs-x(5)))*(x(1)*cos(x(4))-x(2)*sin(x(4)));

```

```

xn(1) = x(1) + dt*(x(2)*x(3) + (1/m)*(Fx1+Fx2+Fx3+Fx4)) + (1/m)*dt*(Pf+Pr);
xn(2) = x(2) + dt*(-x(1)*x(3) + (1/m)*(Fy1+Fy2+Fy3+Fy4)) + (1/m)*dt*(Pf*u(1));
xn(3) = x(3) + dt*((lf/Jz)*(Fy1+Fy2+Pf*u(1)) - (lr/Jz)*(Fy3+Fy4) + (wt/(2*Jz))*(-Fx1+Fx2-Fx3+Fx4));
x(4) = x(4) + dt*(x(3) - phidot_s);
xn(5) = x(5) + dt*(x(2)*cos(x(4)) + x(1)*sin(x(4)));

```

end

```

clc;
clear all;
close all;

%*****
%      Internal Parameters Definition
%*****

tf=30;          % time frame of this simulation
dt=0.05;        % time interval for one step
t=0:dt:tf;      % time vector

Tc=0.75;        % Time Control Horizon for NMPC (Hc=Tc/dt)
Tp=0.75;        % Time Horizon for NMPC (Hp=Tp/dt)
K1=1.00;        % Gain for u(1) - steering
K2=1.00;        % Gain for u(2) - breaking
K3=0.5;         % Gain for u(3) - acceleration

% NMPC Switches
nmpc_cont_actv='n'; % NMPC enabled on every cycle (y) otherwise NMPC activated once every Hp
Horizon interval
nmpc_use_lastc='n'; % NMPC copies last optimized input command u for whole Hp horizon (y),otherwise
alters input u commands estimated on every cycle (n)

sel_track=1;    % Selects among tracks (1-5)
blocks_enable='n'; % Enables blocks on track (y/n)

b_xstart=[20 35 70];
b_xstop =[23 38 73];
b_ystart=[-0.5 -0.5 0.85];
b_ystop =[0.25 0.25 2];

s_plot='y';     % Enables plots vs distance instead of time (y/n)

%*****
%      Track Definition
%*****
opt_Vx=5;
opt_Vy=0.25;

dx=opt_Vx*dt;
dy=opt_Vy*dt;

if (sel_track==1)

    pt1=floor(length(t)/3);
    pt2=floor(length(t)/3)+floor(length(t)/5);
    pt3=2*floor(length(t)/3);
    pt4=2*floor(length(t)/3)+floor(length(t)/5);
    pt5=length(t);

    % Target Track#1
    % Linear Segments track

    for i=1:1:length(t)
        opt_track(1,i)=(i-1)*dx;
        if (i<=pt1)

```

```

    opt_track(2,i)=0;
elseif ((i>pt1) && (i<=pt2))
    opt_track(2,i)=opt_track(2,pt1)+(i-pt1-1)*dy;
elseif ((i>pt2) && (i<=pt3))
    opt_track(2,i)=opt_track(2,pt2);
elseif ((i>pt3) && (i<=pt4))
    opt_track(2,i)=opt_track(2,pt3)+(i-pt3-1)*dy;
else
    opt_track(2,i)=opt_track(2,pt4);
end
end

elseif (sel_track==2)

pt1=floor(length(t)/3);
pt2=floor(length(t)/3)+floor(length(t)/5);
pt3=2*floor(length(t)/3);
pt4=2*floor(length(t)/3)+floor(length(t)/5);
pt5=length(t);

% Target Track#2
% (only for obstacles)
for i=1:1:length(t)
    opt_track(1,i)=(i-1)*dx;

    opt_track(2,i)=0;
end

elseif (sel_track==7)

pt1=floor(length(t)/3);
pt2=floor(length(t)/3)+floor(length(t)/6);
pt3=2*floor(length(t)/3);
pt4=length(t);

% Target Track#4
% U turn

for i=1:1:length(t)
    opt_track(1,i)=(i-1)*dx;
end;

for i=1:1:length(t)
    if (i<=pt1)
        opt_track(2,i)=(i-1)*dy;
    elseif ((i>pt1) && (i<=pt3))
        opt_track(2,i)=opt_track(2,pt1)+100*dy*sin(2*pi*(i-pt1-1)/(2*length(t)/3));
    else
        opt_track(2,i)=opt_track(2,pt3)-(i-pt3-1)*dy;
    end;
end;

elseif (sel_track==4)

pt1=floor(length(t)/3);
pt2=floor(length(t)/3)+floor(length(t)/5);
pt3=2*floor(length(t)/3);
pt4=2*floor(length(t)/3)+floor(length(t)/5);

```

```

pt5=length(t);

% Target Track#4
% Fish Hook Segments of track deviation

for i=1:1:length(t)
    opt_track(1,i)=(i-1)*dx;
    if (i<=pt1)
        opt_track(2,i)=0;
    elseif ((i>pt1) && (i<=pt2))
        opt_track(2,i)=opt_track(2,pt1)-(i-pt1-1)*dy*sin(2*pi*(i-pt1)/(length(t)/2));
    else
        opt_track(2,i)=opt_track(2,pt2);
    end
end

elseif (sel_track==5)

pt1=floor(length(t)/5);
pt2=2*floor(length(t)/5);
pt3=3*floor(length(t)/5);
pt4=4*floor(length(t)/5);
pt5=length(t);

% Target Track#5
% S track

for i=1:1:length(t)
    opt_track(1,i)=(i-1)*dx;
    if (i<=pt1)
        opt_track(2,i)=0;
    elseif ((i>pt1) && (i<=pt4))
        opt_track(2,i)=opt_track(2,pt1)-150*dy*sin(2*pi*(i-pt1-1)/(2*length(t)/5));
    else
        opt_track(2,i)=opt_track(2,pt4);
    end
end

end

init_opt_track=opt_track;
rwidth=2;
for r=1:1:length(t)
    road_d_edge(2,r)=init_opt_track(2,r)-rwidth;
    road_u_edge(2,r)=init_opt_track(2,r)+rwidth;
end

%*****
%      Blocks insertion on track
%*****

if (blocks_enable=='y')
    for b=1:1:length(b_xstart)
        bx_h(b)=(opt_Vx/2)*(b_xstop(b)-b_xstart(b));
        by_h(b)=1.0*(b_ystop(b)-b_ystart(b));
        for p=1:1:length(t)-1
            if ((opt_track(1,p)>=b_xstart(b)-bx_h(b)) && (opt_track(1,p)<=b_xstop(b)+bx_h(b)))
                if ((opt_track(2,p)>b_ystop(b)+by_h(b)) || (opt_track(2,p)<b_ystart(b)-by_h(b)))
                    opt_track(2,p)=opt_track(2,p);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

else
    if (opt_track(2,p)>b_ystart(b)-by_h(b))
        opt_track(2,p)=b_ystart(b)-by_h(b)/2;
    elseif (opt_track(2,p)<b_ystop(b)+by_h(b))
        opt_track(2,p)=b_ystop(b)+by_h(b)/2;
    end
end
end
end
end
end

%*****
%      Time recursion
%*****

track(1:2,1)=opt_track(1:2,1);
Vx0=(opt_track(1,2)-opt_track(1,1))/dt;
Vy0=(opt_track(2,2)-opt_track(2,1))/dt;

x(1:5,1)=[Vx0; Vy0; 0; 0; 0]; % vx, vy, phidot(the turning rate), ephi(vehicle orientation), ey(lateral
position)
u(1:3,1)=[0; 0; 0]; % Initial u values

Hp=floor(Tp/dt);
Hc=floor(Tc/dt);
if (Hp<Hc)
    disp(' Illegal definiton of Hc orizon! ');
    return;
end

% Iterations through time
for i=1:1:length(t)-1

    [x(:,i+1),fx(:,i+1),fy(:,i+1),ey(:,i+1)]=vdyna(x(:,i),u(:,i),dt);

    %compute the position of vehicle
    track(1,i+1)=track(1,i)+dt*x(1,i+1);
    track(2,i+1)=track(2,i)+dt*x(2,i+1);

    Vx0=(opt_track(1,i+1)-opt_track(1,i))/dt;
    Vy0=(opt_track(2,i+1)-opt_track(2,i))/dt;

%*****
%      NMPC Definition
%*****

    vdist(i)=[(x(1,i+1)-Vx0)^2+(x(2,i+1)-Vy0)^2]^0.5;
    vxdist(i)=(x(1,i+1)-Vx0);
    vydist(i)=(x(2,i+1)-Vy0);
    A=[];
    B=[];
    Aeq=[];
    Beq=[];
    if (vxdist(i)>0.25 && vydist(i)>0.1)
        lb=[-0.7, -20111, 0];
        ub=[ 0.7, 0, 0];
    else
        lb=[-0.7, 0, 1600*vdist(i)];
    end
end

```

```

ub=[ 0.7, 0, 20000];
end

temp_cost=0;
toggle=0;
nmpc_actv=0;

if (nmpc_cont_actv=='y')
    nmpc_actv=1;
elseif ((nmpc_cont_actv=='n') && (mod(i,Hp)==1))
    nmpc_actv=1;
end

if (nmpc_actv==1)    % Activate NMPC once every HP cycles
    for h=1:1:Hc

        % Creation of vectors for Horizon
        if (i+h<=length(t))
            uh0=u(1:3,i+h-1);
            xh0=x(1:5,i+h-1);
            trackh0=track(1:2,i+h-1);
            opt_trackh0=opt_track(1:2,i+h);
        else
            uh0=u(1:3,end);
            xh0=x(1:5,end);
            trackh0=track(1:2,end);
            opt_trackh0=opt_track(1:2,end);
        end

        [u_opt,fval(i)]=fmincon(@(uh0)Cost(Hp,temp_cost,uh0,xh0,trackh0,opt_trackh0,Vx0,Vy0,dt),uh0,A,B,Aeq,Beq,lb,ub);
        temp_cost=temp_cost+fval(i);

        if (nmpc_use_lastc=='y')    % Copy last u command for all Horizon cycles
            for hh=1:1:h
                u(1,i+hh)=K1*u_opt(1);
                u(2,i+hh)=K2*u_opt(2);
                u(3,i+hh)=K3*u_opt(3);
            end
        else    % Use different commands for every Horizon cycle
            u(1,i+h)=K1*u_opt(1);
            u(2,i+h)=K2*u_opt(2);
            u(3,i+h)=K3*u_opt(3);
        end

        % Calculate new track position according U obtained from fmincon
        [x(:,i+h),fx(:,i+h),fy(:,i+h),ey(:,i+h)]=vdyna(x(:,i+h-1),u(:,i+h-1),dt);
        track(1,i+h)=track(1,i+h-1)+dt*x(1,i+h);
        track(2,i+h)=track(2,i+h-1)+dt*x(2,i+h);

        % Real-Time Display Progress
        clc;
        toggle=toggle+1;
        if (sel_track==1)
            disp(' Linear Track ');
        elseif (sel_track==2)
            disp(' U turn Track ');
        elseif (sel_track==3)

```

```

    disp(' Fish Hook Track ');
elseif (sel_track==4)
    disp(' S Track ');
end
disp(' Current Vehicle Speed Vx - Vy (m/s) ');
temp_v(1)=x(1,i);
temp_v(2)=x(2,i);
disp(temp_v);
if (nmpc_cont_actv=='y')
    disp(' NMPC activated on every cycle ');
else
    disp(' NMPC activated once every Hp cycles ');
end
temp_h(1)=Hc;
temp_h(2)=Hp;
if (mod(toggle,2)==0)
    disp(' Hc and Hp Calculation Horizon (points) ');
    disp(temp_h);
    disp(' NMPC Calculation Progress on Track (%) .... /');
else
    disp(' Hc and Hp Calculation Horizon (points) ');
    disp(temp_h);
    disp(' NMPC Calculation Progress on Track (%) .... \');
end
disp(100*i/length(t));

end
end

for hh=Hc+1:1:Hp % Copy last Hc command on Hc+1 -> Hp cycles
    u(1,i+hh)=K1*u_opt(1);
    u(2,i+hh)=K2*u_opt(2);
    u(3,i+hh)=K3*u_opt(3);
end

end

clc;

% Calculate Track distance
for i=1:1:length(t)
    s(i)=(track(1,i)^2+track(2,i)^2)^0.5;
end

% Calculate Tracking Error
for i=1:1:length(t)-1
    track_err(i)=((track(1,i)-opt_track(1,i))^2+(track(2,i)-opt_track(2,i))^2)^0.5;
end

%*****
% Plot Results
%*****

figure(1)
plot(opt_track(1,:),opt_track(2,:),'LineWidth',2);
if (blocks_enable=='y')
    hold on;
    plot(opt_track(1,:),road_d_edge(2:,:),'LineWidth',3);
    plot(opt_track(1,:),road_u_edge(2:,:),'LineWidth',3);

```

```

bdx=0.01;
bdy=0.01;
for b=1:1:length(b_xstart)
    i=0;
    j=0;
    clear pbx pby1 pby2 pby pbx1 pbx2;
    for xx=b_xstart(b):bdx:b_xstop(b)
        i=i+1;
        pbx(i)=xx;
        pby1(i)=b_ystart(b);
        pby2(i)=b_ystop(b);
    end
    plot(pbx,pby1,'k','LineWidth',2);
    plot(pbx,pby2,'k','LineWidth',2);
    for yy=b_ystart(b):bdy:b_ystop(b)
        j=j+1;
        pby(j)=yy;
        pbx1(j)=b_xstart(b);
        pbx2(j)=b_xstop(b);
    end
    plot(pbx1,pby,'k','LineWidth',2);
    plot(pbx2,pby,'k','LineWidth',2);
end
hold off;
end
grid;
xlabel('X [m]');
ylabel('Y [m]');
if (blocks_enable=='n')
    title(' Target Vehicle Track ');
else
    title(' Target Vehicle Track avoiding blocks');
end

figure(2)
plot(track(1,:),track(2,:),','LineWidth',2);
hold on;
plot(opt_track(1,:),road_d_edge(2:),'LineWidth',3);
plot(opt_track(1,:),road_u_edge(2:),'LineWidth',3);
if (blocks_enable=='y')
    hold on;
    bdx=0.01;
    bdy=0.01;
    for b=1:1:length(b_xstart)
        i=0;
        j=0;
        clear pbx pby1 pby2 pby pbx1 pbx2;
        for xx=b_xstart(b):bdx:b_xstop(b)
            i=i+1;
            pbx(i)=xx;
            pby1(i)=b_ystart(b);
            pby2(i)=b_ystop(b);
        end
        plot(pbx,pby1,'k','LineWidth',2);
        plot(pbx,pby2,'k','LineWidth',2);
        for yy=b_ystart(b):bdy:b_ystop(b)
            j=j+1;
            pby(j)=yy;
            pbx1(j)=b_xstart(b);

```



```

        pbx2(j)=b_xstop(b);
    end
    plot(pbx1,py,'k','LineWidth',2);
    plot(pbx2,py,'k','LineWidth',2);
    end
hold off;
end
grid;
xlabel('X [m]');
ylabel('Y [m]');
if (blocks_enable=='n')
    title(' Vehicle Track ');
else
    title(' Vehicle Track avoiding blocks ');
end

figure(3)
plot(opt_track(1,:),opt_track(2:),'LineWidth',1);
hold on;
plot(track(1,:),track(2:),'LineWidth',1);
plot(opt_track(1,:),road_d_edge(2:),'k','LineWidth',3);
plot(opt_track(1,:),road_u_edge(2:),'k','LineWidth',3);
if (blocks_enable=='y')
    plot(init_opt_track(1,:),init_opt_track(2:),'g','LineWidth',1);
end
if (blocks_enable=='y')
    hold on;
    bdx=0.01;
    bdy=0.01;
    for b=1:1:length(b_xstart)
        i=0;
        j=0;
        clear pbx pby1 pby2 py pbx1 pbx2;
        for xx=b_xstart(b):bdx:b_xstop(b)
            i=i+1;
            pbx(i)=xx;
            pby1(i)=b_ystart(b);
            pby2(i)=b_ystop(b);
        end
        plot(pbx,pby1,'k','LineWidth',2);
        plot(pbx,pby2,'k','LineWidth',2);
        for yy=b_ystart(b):bdy:b_ystop(b)
            j=j+1;
            pby(j)=yy;
            pbx1(j)=b_xstart(b);
            pbx2(j)=b_xstop(b);
        end
        plot(pbx1,pby,'k','LineWidth',2);
        plot(pbx2,pby,'k','LineWidth',2);
    end
end
hold off;
end
hold off;
grid;
xlabel('X [m]');
ylabel('Y [m]');
title(' Achieved Vehicle Track ');
if (blocks_enable=='y')
    legend('Real','Target');
end

```

```

else
    legend(Target,'Real');
end

figure(4)
if (s_plot=='n')
    plot(t(1:length(t)-1),track_err,'LineWidth',1);
    xlabel('Time [s]');
else
    plot(s(1:length(t)-1),track_err,'LineWidth',1);
    xlabel('Distance [m]');
end
grid;
ylabel('Tracking Error [m]');
title(' Error between Vehicle and Target Track ');

figure(5)
if (s_plot=='n')
    plot(t,u(1,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Time [s]');
else
    plot(s,u(1,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Distance [m]');
end
ylabel('Steering [rad]');
grid on
title(' Steering Angle - Input');
legend('U_1');

figure(6)
if (s_plot=='n')
    plot(t,u(2,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Time [s]');
else
    plot(s,u(2,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Distance [m]');
end
ylabel('F_b [N]');
grid on
title(' Breaking Force - Input');
legend('U_2');

figure(7)
if (s_plot=='n')
    plot(t,u(3,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Time [s]');
else
    plot(s,u(3,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Distance [m]');
end
ylabel(' F_a [N] ');
grid on
title(' Acceleration Force - Input');
legend('U_3');

figure(8)
if (s_plot=='n')
    plot(t,x(1,1:length(t)),'LineWidth',1)
    xlabel('Time [s]');

```

```

else
    plot(s,x(1,1:length(t)), 'LineWidth',1)
    xlabel('Distance [m]');
end
hold on;
for i=1:1:length(t)
    opt_Vx_vec(i)=opt_Vx;
end
if (s_plot=='n')
    plot(t,opt_Vx_vec, 'LineWidth',1)
else
    plot(s,opt_Vx_vec, 'LineWidth',1)
end
hold off;
ylabel('Vx [m/s]');
grid on;
title('Vx Velocity');

figure(9)
if (s_plot=='n')
    plot(t,x(2,1:length(t)), 'LineWidth',1)
    xlabel('Time [s]');
else
    plot(s,x(2,1:length(t)), 'LineWidth',1)
    xlabel('Distance [m]');
end
hold on;
for i=1:1:length(t)
    opt_Vy_vec(i)=opt_Vy;
end
if (s_plot=='n')
    plot(t,opt_Vy_vec, 'LineWidth',1)
    plot(t,-opt_Vy_vec, 'LineWidth',1)
else
    plot(s,opt_Vy_vec, 'LineWidth',1)
    plot(s,-opt_Vy_vec, 'LineWidth',1)
end
hold off;
ylabel('Vy [m/s]');
grid on;
title('Vy Velocity');

disp('-----')
disp(' Simulation Results ');
disp('-----')
if (sel_track==1)
    disp(' Linear Track ');
elseif (sel_track==2)
    disp(' U turn Track ');
elseif (sel_track==3)
    disp(' Fish Hook Track ');
elseif (sel_track==4)
    disp(' S Track ');
end
if (nmpc_cont_actv=='y')
    disp(' Continuous Operation of NMPC on every cycle of track ');
else
    disp(' Operation of NMPC once every Hp cycles of track ');

```

```

end
if (nmpc_use_lastc=='y')
    disp(' Same U optimized command used for all Hp cycles ');
else
    disp(' U optimized commands altered per cycle ');
end
disp('-----')
disp(' Horizon Cycles Hc - Hp ');
disp('-----')
disp(temp_h);
disp('-----')
disp(' Mean Square Track Error ');
disp('-----')
disp(mse(track_err));

```

5.6 A-3 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

```

function z_val=Cost(Hp,tcost,u,x0,track0,opt_track0,Vx0,Vy0,dt)

rho=10^6;
epsl=1;

x(1:5,1)=x0;
track(1:2,1)=track0;
opt_track(1:2,1)=opt_track0;

[xn,fxn,fyn,eyn]=vdyna(x,u,dt);

posx=track(1,1)+dt*xn(1);
posy=track(2,1)+dt*xn(2);

dist=((posx-opt_track(1,1))^2+(posy-opt_track(2,1))^2)^0.5;
vdist=((Vx0-xn(1))^2+(Vy0-xn(2))^2)^0.5;
u_norm=(u(1)^2+u(2)^2+u(3)^2)^0.5;

z_val=rho*epsl*(dist^2)+u_norm^2+tcost;

end

```

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1]<https://www.heliev.gr/wp-content/uploads/2021/03/%CE%97-%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CE%B1%CF%8D%CF%81%CE%B9%CE%BF-%CE%86%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%BF-2-ocx.pdf>
- [2]<https://www.nea-acropoli-athens.gr/arthra/oikologia/1154-o-kinhmatografos-tou-hrwnos>
- [3]<https://www.caranddriver.gr/eidiseis/arthro/aytonomi odigisi ola osa tha prepei na gno rizete video-7737337/>
- [4] <https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/www/#>
- [5] <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-PROMETHEUS-project-launched-in-1986-Pioneering-autonomous-driving.xhtml?oid=13744534>
- [6] <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/autonomous/>
- [7]<https://www.cnbc.com/2020/12/09/gms-cruise-begins-testing-autonomous-vehicles-without-human-drivers-in-san-francisco.html>
- [8]<https://www.continental.com/en/products-and-innovation/innovation/automated-driving>
- [9] <https://www.bosch.com/stories/autonomous-driving-interview-with-moritz-dechant/>
- [10]<https://www.nissanusa.com/experience-nissan/news-and-events/self-driving-autonomous-car.html>
- [11] <https://www.investopedia.com/articles/investing/052014/how-googles-selfdriving-car-will-change-everything.asp>
- [12] <https://www.tesla.com/support/autopilot>
- [13] <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>
- [14] <https://www.verizonconnect.com/resources/article/connected-vehicle-technology-v2v-v2i-v2x/>

- [15] <https://www.greece-is.com/news/worlds-successful-driverless-bus-pilot-trikala/>
- [16] https://www.ethnos.gr/ellada/53119_ta-leoforeia-horis-odigo-epistrefoyn-sta-trikala
- [17] <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/gb/en/news/2021/02/11/ford-teams-up-with-hermes-to-make-online-shopping-smarter--faste.html>
- [18] Gray A., Ali M. , Gao Y., Hendrick K., Borrelli F. Semi-Autonomous Vehicle Control for Road Departure and Obstacle Avoidance (2012)
- [19] Gao Yiqi. Model Predictive Control for Autonomous and Semi autonomous Vehicles, Berkeley (2014)
- [20] Rajesh Rajamani. "Vehicle Dynamics and Control, 1st ed." In:Springer US(2005).
- [21] FEEDBACK INSTRUMENTS LTD, Control and Instrumentation, Modular Servo System Ms150 DC, Synchro & AC Basic Assignments.
- [22] Pontryagin, L. S., Boltyanskii, V. G., Gamkrelidze, R. V. and E. F. Mishchenko. 1962. The mathematical theory of optimal processes. New York: Interscience Publishers, Inc. 9782881240775.
- [23] Αναστάσιος Πουλιέζος, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα-kallipos, «Σύγχρονη θεωρία ελέγχου», 2015
- [24] Καψάλης Δημήτριος, «Υποβέλτιστος έλεγχος μη-γραμμικού συστήματος», Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών (2017)
- [25] Αναστάσιος Πουλιέζος, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα-kallipos, «Σύγχρονη θεωρία ελέγχου», 2015
- [26] Pontryagin, L. S., Boltyanskii, V. G., Gamkrelidze, R. V. and E. F. Mishchenko. 1962. The mathematical theory of optimal processes. New York: Interscience Publishers, Inc. 9782881240775.
- [27] Floudas, C. A., & Pardalos, P. M. (2001). Encyclopedia of optimization. Springer Science & Business Media
- [28] Γιαννάκογλου, Κ. Χ. (2006). Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική. Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ.

- [29] Diamantis E. Autonomous robotic vehicle pedestrian detection using artificial intelligence and deep learning techniques.(2018)
- [30] FLORIAN CURINGA, Autonomous racing using model predictive control (2018)
- [31] Vehicle Dynamics Reza N. Jazar Second Edition Theory and Application, Springer
- [32] Pacejka Tire and Vehicle Dynamics (2005)
- [33] Cerone V., Combined Automatic Lane-Keeping and Driver's Steering Through a 2-DOF Control Strategy (2009)
- [34] Paolo Falcone, MPC-Based yaw and lateral stabilization via active front steering and braking (2008)
- [35]Guo H. Simultaneous Trajectory Planning and Tracking Using an MPC Method for Cyber-Physical Systems: A Case Study of Obstacle Avoidance for an Intelligent Vehicle (2018)
- [36] Lee J. Analysis of explicit model predictive control for path-following control (2018)
- [37] Reda A. Model Predictive Control for Automated Vehicle Steering (2020)
- [38] G. De Nicolao, L. Magi, Allgöwer F., Zheng A. Progress in Systems and Control Theory
- [39] Lars Grune, Jurgen Pannek. Nonlinear Model Predictive Control Theory and Algorithms
- [40] Rolf Findeisen, Allgower Frank, Biegler Lorenz. Assessment and Future Directions of Nonlinear MPC (2007)
- [41] Allgöwer F., Zheng A. (2000). Nonlinear Model Predictive Control. Birkhäuser, Berlin.
- [42] Paraskevopoulos P. N. Modern Control Engineering, Control Engineering Series
- [43] Camacho E., Bordons C. Model Predictive Control, Springer
- [44] Liuping Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®, Springer
- [45] [1] Garcia, C. E., Prett, D. M., & Morari, M. (1989). Model predictive control: theory and practice—a survey. *Automatica*, 25(3), 335-348

[46] [1] Garcia, C. E., Prett, D. M., & Morari, M. (1989). Model predictive control: theory and practice—a survey. *Automatica*, 25(3), 335-348

[47] http://bwrce.eecs.berkeley.edu/Classes/icdesign/ee141_s03/Project/Project1_solutions/fmincon.pdf

[48] https://www.researchgate.net/publication/315787201_Probleptikos_Elenchos_Mia_kath_emerine_arche_pou_epharmozetai_ste_biomechania

[49] H. Pacejka, E. Bakker, L. Nyborg. Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies. SAE Paper No. 870421.

[50] <http://www-cdr.stanford.edu/dynamic/bywire/tires.pdf>

[51] <https://el.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

[52] https://www.researchgate.net/publication/342132643_Complex-Track_Following_in_Real-Time_Using_Model-Based_Predictive_Control

[53] https://www.researchgate.net/profile/Mohamed_Mourad_Lafifi/post/any_one_have_an_idea_of_longitudinal_and_lateral_state_space_model/attachment/59d64def79197b80779a75f3/AS%3A490374658564099%401493925837969/download/Chapter2a+Vehicle+Dynamics+Modeling.pdf

[54] https://en.wikipedia.org/wiki/Interior-point_method

[55] <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>

[56] <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html>

[57] <https://www.europarl.europa.eu/news/el/headlines/society/20190410ST036615/tanathanaifora-trochaia-atuchimata-stin-ee-me-arithmous-grafima>

[58] <http://gun.teipir.gr/DSAELAB/Ergastiriakes/pidtutorial.pdf>