

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

**Αξιολόγηση της Ανθεκτικότητας του Συνεργατικού
Ελέγχου Πορείας: Χειρισμός Κορεσμού της
εισόδου ελέγχου και Στοχαστικών διαταραχών
καθυστέρησης της εισόδου μέσω
προσομοίωσης.**



Διπλωματική Εργασία

Μιχαήλ Αλακιοζίδης

Εξεταστική Επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής Νικόλαος Μπεκιάρης-Λυμπέρης

Καθηγητής Ευτύχιος Κουτρούλης

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής Παναγιώτης Α.Καραφώτης

Technical University of Crete

School of Electrical & Computer Engineering

Simulation-based assessment of robustness of predictor feedback cooperative adaptive cruise control to saturation of control input and input delay perturbations.



Thesis

Michail Alakiozidis

Thesis Committee:

Associate Professor Nikolaos Bekiaris-Liberis

Professor Eftychios Koutroulis

Postdoctoral Researcher Panagiotis Karafotis

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συμβολή ορισμένων ανθρώπων για αυτό και ήθελα να τους ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Θα ήθελα για αρχή να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μπεκιάρη-Λυμπέρη Νικόλαο για την προθυμία του να συνεργαστούμε, την καθοδήγηση και την βοήθεια του για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Κουτρούλη Ευτύχιο που δέχθηκε απευθείας να γίνει μέλος της τριμελούς επιτροπής και να συμμετάσχει στην επιτροπή αξιολόγησης αυτής της εργασίας.

Τον κ. Καραφώτη Παναγιώτη που παρά το τεράστιο φόρτο εργασίας του όποτε είχα οποιαδήποτε απορία ήταν πρόθυμος να με κατευθύνει και να με καθοδηγήσει. Οι συμβουλές και οι παρατηρήσεις ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τις αμέτρητες στιγμές γέλιου που περάσαμε όλοι μαζί έχοντας όλοι τον ίδιο στόχο.

Τέλος περισσότερο από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου από την αρχή, και στα εύκολα και στα δύσκολα που αν μη τι άλλο περιείχε αυτή η σταδιοδρομία και ολοκληρώνεται επιτυχώς. Η υπομονή και η υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών ήτανε πολύ σημαντική.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες ο ρυθμός ανάπτυξης των μέσων μεταφοράς αλλά και η ευρεία χρήση από τους πολίτες έχει δημιουργήσει αναρίθμητα προβλήματα στις ζωές των ανθρώπων είτε λόγο ατυχημάτων που συμβαίνουν στους δρόμους είτε λόγο χαμένου χρόνου εξαιτίας της υπερβολικής κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων που έχουν ως στόχο την καλυτέρευση του οδικού δικτύου αλλά και την εξέλιξη των συστημάτων αυτόματου ελέγχου οδήγησης. Αφού σχολιάστηκαν τα πιο παλαιά συστήματα, επικεντρώθηκε στο πιο εξελιγμένο (Cooperative Adaptive Cruise Control) έχοντας ως στόχο την σταθερότητα και την ανθεκτικότητα μιας συμβολοσειράς αυτοκινήτων. Έτσι αναφέρθηκε στη χρήση του συστήματος ελέγχου predictor feedback Cooperative Adaptive Cruise Control σε ομογενή συστήματα. Κάθε αυτοκίνητο περιγράφεται από ένα γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξεως το οποίο σχετίζεται με την ζητούμενη επιτάχυνση, η οποία μεταφέρεται από αυτοκίνητο σε αυτοκίνητο και προέρχεται μόνο από το προπορευόμενο όχημα καθώς και με την απόσταση δύο αυτοκινήτων. Οι αποδείξεις βασίζονται στον συνδυασμό προσέγγισης εισόδου-εξόδου και στην παραγωγή εκτιμήσεων σε σαφείς, κλειστού βρόχου λύσεις, υπό συγκεκριμένες, επαρκείς συνθήκες που προκύπτουν από αρχικές συνθήκες και παραμέτρους του βασικού ελεγκτή Constant time headway (CTH). Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάστηκαν παραδείγματα μέσω προσομοιώσεων τα οποία επιδεικνύουν την ανθεκτικότητα και την σταθερότητα μιας συμβολοσειράς καθώς και την αποφυγή συγκρούσεων κάτω

από ορισμένες συνθήκες με τη χρήση του συστήματος ελέγχου predictor feedback Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC).

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα

Πρόλογος	4
Περίληψη	6
Περιεχόμενα	8
Συντομογραφίες	10
Πίνακας Γραφημάτων	11
1 Εισαγωγή	14
2 Εξέλιξη συστημάτων αυτόματου ελέγχου οδήγησης	17
2.1 Cruise Control	17
2.2 Adaptive Cruise Control	18
2.3 Cooperative Adaptive Cruise Control	20
2.3.1 Αρχιτεκτονική ελέγχου και τοπολογία ροής πληροφοριών CACC	22
2.4 Επικοινωνία	27
3 Predictor feedback CACC για ομογενή γραμμικά συστήματα με καθυστέρηση	

ενεργοποιητή.....	29
3.1 Predictor feedback CACC Design.....	30
3.2 Collision avoidance and non-overshooting response Predictor feedback CACC 31	
3.3 String Stability Robustness of Predictor feedback CACC	33
4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	34
4.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για πέντε οχήματα	36
4.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων για δέκα οχήματα.....	41
4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με προσθήκη κορεσμού στο control input 44	
4.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με μεταβολή καθυστερήσεων	52
4.5 Τελικός Σχολιασμός	55
5 Συμπεράσματα.....	57
6 Μελλοντική Εργασία.....	58
7 Βιβλιογραφία	59

Συντομογραφίες

ACC Adaptive Cruise Control

CACC Cooperative Adaptive Cruise Control

CAV Connected Automated Vehicles

CTH Constant Time Headway

V2V Vehicle – to - Vehicle

DSRC Dedicated Short Range Communications

Πίνακας Γραφημάτων

Εικόνα 2.1: Γενική δομή ελέγχου για ένα συμβατικό σύστημα Cruise Control [1].	18
Εικόνα 2.2: Γενικευμένο διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος Adaptive Cruise Control (ACC).....	19
Εικόνα 2.3: Γενική δομή ελέγχου για ένα σύστημα με Adaptive Cruise Control.....	20
Εικόνα 2.4: Γενικευμένη δομή ελέγχου οχήματος με CACC.	21
Εικόνα 2.5: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)	23
Εικόνα 2.6: Τοπολογία ροής πληροφοριών : a) predecessor following, b) predecessor-leader following, c) two predecessor-following, d) two predecessor-leader following, e) bidirectional.	25
Εικόνα 3.1 Σμήνος πέντε οχημάτων στο οποίο κάθε όχημα βασίζεται στο σύστημα (1),(2) με δικιά τους ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα και απόσταση από το προπορευόμενο όχημα.	30
Εικόνα 4.1 : Η ζητούμενη επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law	36
Εικόνα 4.2 : Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.....	38

Εικόνα 4.3: Η απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε συνάρτηση του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.....	39
Εικόνα 4.4: Η ζητούμενη επιτάχυνση σε συνάρτηση του χρόνου του Leader και εννέα ακόμα Vehicle με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.....	41
Εικόνα 4.5: Η ταχύτητα σε συνάρτηση του χρόνου του Leader και εννέα ακόμα Vehicle με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.....	42
Εικόνα 4.6: Η απόσταση μεταξύ των δέκα vehicles σε συνάρτηση του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.	43
Εικόνα 4.7 : Η ζητούμενη επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.....	45
Εικόνα 4.8 : Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.	46
Εικόνα 4.9: Η απόσταση μεταξύ των vehicles σε συνάρτηση του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο	47
Εικόνα 4.10: Η ζητούμενη επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.....	49
Εικόνα 4.11: Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.	50
Εικόνα 4.12: Η απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.....	51

Εικόνα 4.13: Η ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα, απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με καθυστέρηση $D=0.5$	53
Εικόνα 4.14: Η ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα, απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με καθυστέρηση $D=0.9$	54
Εικόνα 4.15: Η απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με καθυστέρηση $D=2.1$	55

1 Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων μεταφοράς έχει προσφέρει μεγάλη ευκολία στην καθημερινή ζωή, επιτρέποντας τόσο στους επιβάτες όσο και στα εμπορεύματα να μεταφέρονται εντός της χώρας αλλά και διεθνώς με πιο γρήγορο τρόπο. Εκτιμάται ότι περισσότερα από ένα δισεκατομμύριο οχήματα κυκλοφορούν σε όλο τον κόσμο, και αυτός ο αριθμός θα διπλασιαστεί ακόμα και μέσα σε μία ή δύο δεκαετίες. Για τον λόγο αυτό μία σειρά ζητημάτων σχετικά με τα συστήματα μεταφορών προκύπτουν από αυτόν τον τεράστιο αριθμό, ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια καθώς πάρα πολλοί άνθρωποι ανά τον κόσμο χάνουν κάθε μέρα τη ζωή τους, προβλήματα που αφορούν την κινητικότητα λόγω της αυξημένης κυκλοφοριακής συμφόρησης και γενικότερα την καθημερινή ζωή των ανθρώπων γεγονός που αποτελεί δείγμα χαμηλού βιοτικού επιπέδου.

Έτσι λοιπόν έχουν επιτευχθεί σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των συνδεδεμένων και αυτοματοποιημένων οχημάτων (CAV) την τελευταία δεκαετία έχουν στόχο την εξάλειψη ή έστω την μείωση των προαναφερθέντων προβλημάτων. Η συνδεσιμότητα και η αυτοματοποίηση ενσωματώνονται στα οχήματα, καθιστώντας τα ικανά όχι μόνο να οδηγούν από μόνα τους με αισθητήρες εντοπισμού αλλά και να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω (V2V) επικοινωνία. Το Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) είναι μία από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες, η οποία επεκτείνει την τεχνολογία του Adaptive Cruise Control (ACC) μέσω επικοινωνίας των οχημάτων. Στα συστήματα CACC, τα αυτοκίνητα μοιράζονται τις δικές τους παραμέτρους με τα υπόλοιπα στο δίκτυο μέσω επικοινωνιών V2V, το οποίο

πραγματοποιείται αυτόνομα χωρίς κεντρική διαχείριση. Δεδομένου ότι η εύρος ζώνης επικοινωνίας ενδέχεται να γίνει ανεπαρκές όταν το πλήθος των οχημάτων αυξάνεται σε ένα σύστημα CACC, οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας είναι περισσότερο αποδεκτές για τις επικοινωνίες V2V. Μέχρι στιγμής, το πιο κυρίαρχο πρωτόκολλο επικοινωνίας V2V είναι το Dedicated Short Range Communications (DSRC), και έχουν προταθεί και αναπτυχθεί και άλλα προηγμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας για τις επικοινωνίες V2V, όπως το LTE και το 5G. Το CACC εκμεταλλεύεται τις επικοινωνίες V2V για να επιτρέψει στα οχήματα να δημιουργούν σμήνη ή αλλιώς συμβολοσειρές και να κινούνται με συντονισμένες ταχύτητες με μικρότερα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους. Με το να μοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους όπως επιτάχυνση, ταχύτητα και θέση, τα αυτοκίνητα μπορούν να συνεργαστούν ώστε να αποκτήσουν τα ακόλουθα οφέλη:

- αυξημένη ασφάλεια οδήγησης καθώς ο χρόνος ενεργοποίησης μειώνεται σε σύγκριση με τη χειροκίνητη οδήγηση
- η χωρητικότητα του οδοστρώματος αυξάνεται λόγω της μείωσης των χρονικών/αποστάσεων μεταξύ οχημάτων
- η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές ρύπων μειώνονται λόγω της μείωσης των περιπτώσεων αλλαγών ταχύτητας και της αεροδυναμικής αντίστασης στα οχήματα που ακολουθούν.

Όταν αναφερόμαστε σε συμβολοσειρές αυτοκινήτων και γενικότερα σε διμοιρίες οχημάτων έχοντας ως στόχο την σταθερότητα και την αποφυγή συγκρούσεων δεν

μπορούμε αν μη τι άλλο να μη σχολιάσουμε τα συστήματα ελέγχου ACC (Adaptive Cruise Control) και CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) που θεωρούνται πυλώνες σε αυτόν τομέα. Παρ' όλα αυτά και τα δύο συστήματα έχουν ορισμένα μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να ελλοχεύουν κίνδυνοι ως προς την εγκυρότητα τους όταν εμφανίζονται καθυστερήσεις στον ενεργοποιητή, στον αισθητήρα αλλά και καθυστερήσεις επικοινωνίας. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν ορισμένοι σχεδιασμοί που μπορούν να εξαλείψουν αυτού του είδους τα προβλήματα και να αποδείξουν μέσω προσομοιώσεων την ασφάλεια και την εγκυρότητα που μπορούν να προσφέρουν.

Έτσι ο σχεδιασμός predictor feedback CACC εξασφαλίζει αποδεδειγμένα την σταθερότητα κάθε οχήματος ξεχωριστά χωρίς να επιβάλλει κάποιον περιορισμό στο μέγεθος της καθυστέρησης και ειδικότερα στο επιθυμητό χρονικό διάστημα (Constant Time Headway) σε αντίθεση με τον σχεδιασμό predictor feedback ACC ο οποίος έχει ορισμένες προϋποθέσεις λειτουργίας καθώς πρέπει να του εξασφαλίζεται ότι οι καθυστερήσεις θα είναι πάντα μικρότερες από το επιθυμητό χρονικό διάστημα (CTH) ώστε να εγγυηθεί σταθερότητα συμβολοσειράς. Έτσι, αποδεικνύεται ότι για οποιοδήποτε μέγεθος καθυστέρησης και επιθυμητό χρονικό διάστημα, ο σχεδιασμός predictor feedback CACC διασφαλίζει την ασφάλεια του σμήνους, εγγυώμενος τη σταθερότητα των μεμονωμένων οχημάτων, την αποφυγή συγκρούσεων και την σταθερότητα της συμβολοσειράς ακόμα και στην περίπτωση η συμβολοσειρά έχει το ελάχιστο δυνατό μέγεθος. Υπάρχουν τα ετερογενή γραμμικά συστήματα τρίτης τάξεως τα οποία περιλαμβάνουν περισσότερους παράγοντες και θα μπορούσε να πει κανείς ότι είναι πιο ρεαλιστικά καθώς εμπλέκονται ακόμα και παράγοντες που σχετίζονται με τη δυναμική του κινητήρα του αυτοκινήτου. Σε αυτή

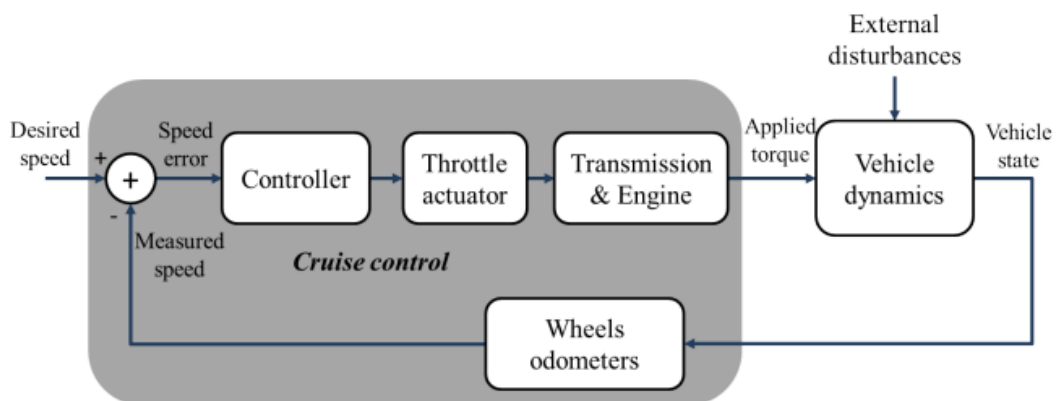
τη διπλωματική όμως θα ασχοληθούμε με ομογενή γραμμικά συστήματα δεύτερης τάξεως τα οποία είναι πιο κατανοητά και μπορούν να παρουσιάσουν την κύρια ιδέα του σχεδιασμού. Θα αποδείξουμε μέσω προσομοιώσεων με ορισμένα δεδομένα στοιχεία όλα αυτά που προαναφέρθηκαν ώστε να αποφανθεί η χρησιμότητα τους.

2 Εξέλιξη συστημάτων αυτόματου ελέγχου οδήγησης

2.1 Cruise Control

Ένα από τα πρώτα συστήματα αυτοματοποίησης που εφαρμόστηκε σε πραγματικά οχήματα είναι το σύστημα Cruise Control. Σήμερα, τα περισσότερα αυτοκίνητα διαθέτουν αυτό το σύστημα ή και πιο εξελιγμένα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω, αποτελώντας το αρχικό σημείο για τη μελέτη εφαρμογών ακολουθίας οχημάτων. Το σύστημα αυτό δίνοντάς σου τη δυνατότητα να διατηρήσεις μία επιλεγμένη σταθερή ταχύτητα παρέχει μεγάλες ευκολίες στον οδηγό του οχήματος. Αυτό όχι μόνο θα μειώσει την κόπωση του οδηγού και θα αυξήσει την άνεση, αλλά θα βελτιστοποιήσει επιπλέον και την κατανάλωση ενέργειας. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα συστήματα cruise control μπορούν να βελτιώσουν τον τρόπο χρήσης της ενέργειας, παρέχοντας εξοικονόμηση καυσίμων από 1.1 έως 10.7%. Δεν θα επεκταθούμε στα οφέλη αυτού του συστήματος καθώς έχουν ήδη αναφερθεί πιο πάνω. Θα προχωρήσουμε σε μία σύντομη ανάλυση αυτού του συστήματος με τα τέσσερα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται:

- Αισθητήρας ταχύτητας οχήματος: ενσωματωμένος στους τροχούς για τη μέτρηση της ταχύτητας του οχήματος.
- Περιβάλλον επικοινωνίας με το χρήστη: μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει το σύστημα αλλά και να ορίσει την επιθυμητή ταχύτητα.
- Μονάδα ελέγχου: Αυτή η μονάδα λαμβάνει τα δεδομένα από τον αισθητήρα ταχύτητας και τις εντολές από τη διεπαφή με τον χρήστη. Υπολογίζει την απαραίτητη εντολή γκαζιού για να διατηρηθεί η επιθυμητή ταχύτητα και στέλνει την εντολή στον ενεργοποιητή γκαζιού.
- Ενεργοποιητής γκαζιού: αυτός ο μηχανισμός λαμβάνει την εντολή από τη μονάδα ελέγχου και ενεργεί για την προώθηση του οχήματος ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή ταχύτητα.

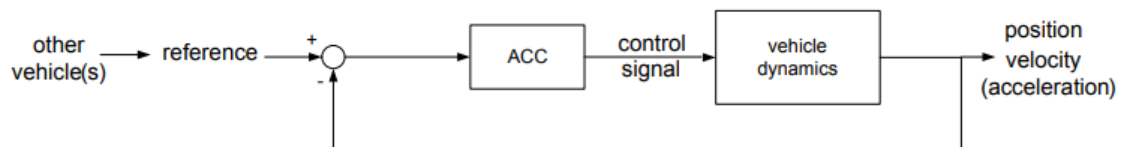


Εικόνα 2.1: Γενική δομή ελέγχου για ένα συμβατικό σύστημα Cruise Control [1].

2.2 Adaptive Cruise Control

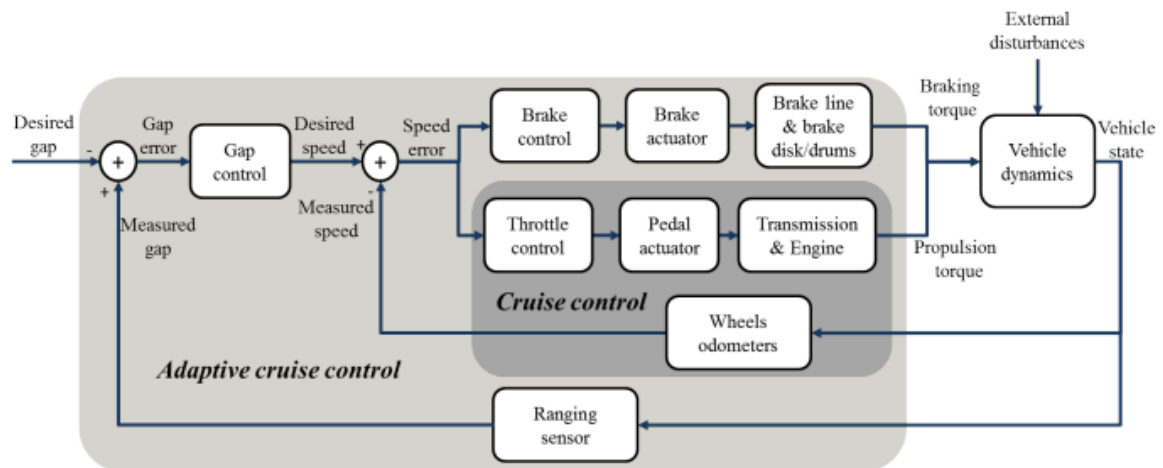
Το ACC είναι μία εξελιγμένη έκδοση του ξεπερασμένου πλέον cruise control. Όσο λοιπόν το συμβατικό cruise control διατηρεί σταθερή την επιθυμητή ταχύτητα

που έχει ορίσει ο οδηγός του οχήματος, το σύστημα ACC διατηρεί και την επιθυμητή σχετική απόσταση από το προπορευόμενο αυτοκίνητο. Έτσι ενσωματώνοντας έναν ενεργοποιητή για το πεντάλ του φρένου, σε περίπτωση που ανιχνεύσει ότι η επιθυμητή απόσταση που έχει οριστεί από τον οδηγό του οχήματος μειώνεται, τότε το όχημα επιβραδύνεται. Στη συνέχεια το όχημα θα ξανά κρατήσει την επιθυμητή απόσταση από το προπορευόμενο όχημα δημιουργώντας και πάλι ισορροπία στο σύστημα. Όλο αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αισθητήρα εμβέλειας (συνήθως ραντάρ, αλλά μπορεί επίσης να είναι κάμερα ή LiDAR) για τη μέτρηση της απόστασης και της σχετικής ταχύτητας σε σχέση με το προπορευόμενο όχημα. Αν δεν υπάρχει προπορευόμενο όχημα για να ακολουθήσει, δεν υπάρχει έλεγχος για τη απόσταση αλλά μόνο για την ταχύτητα. Μια γενικευμένη αναπαράσταση ενός οχήματος που εξοπλίζεται με ACC θα δούμε στην παρακάτω εικόνα από [2].



Εικόνα 2.2: Γενικευμένο διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος Adaptive Cruise Control (ACC).

Επιπλέον θα παρατηρήσουμε και μία δομή ελέγχου για το ACC ώστε να μπορέσουμε να δούμε και τις διαφορές με το συμβατικό Cruise Control στην Εικόνα 2.1: Γενική δομή ελέγχου για ένα συμβατικό σύστημα Cruise Control.



Εικόνα 2.3: Γενική δομή ελέγχου για ένα σύστημα με Adaptive Cruise Control.

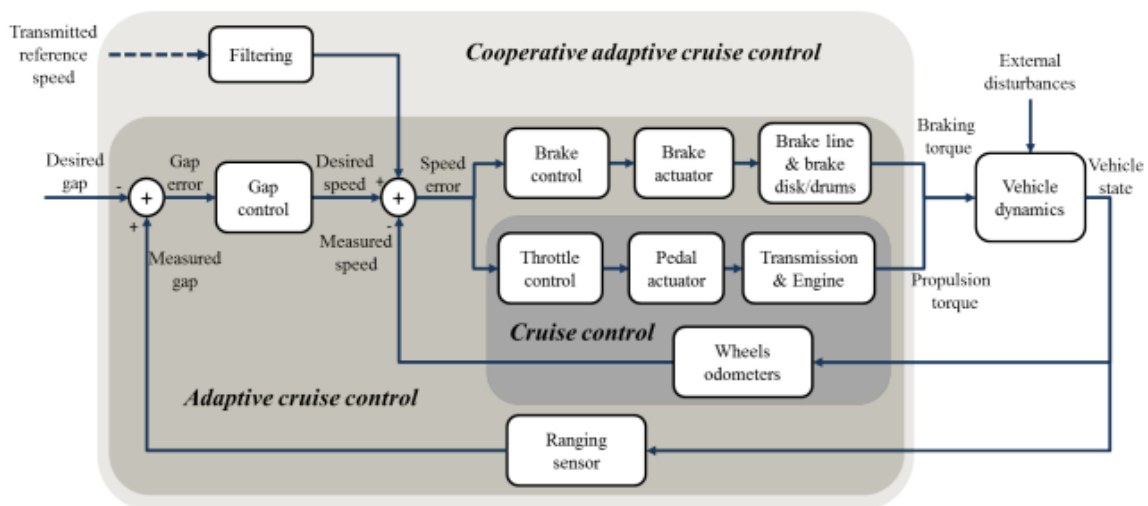
2.3 Cooperative Adaptive Cruise Control

Μέσα από την ταχύτατη και ευρεία διάδοση του συστήματος ACC με στόχο την ανάπτυξη του κλάδου αυτού, πρόοδοι οδήγησαν στην ιδέα ότι οι ασύρματες συνδέσεις μεταξύ των οχημάτων που εξοπλίζονται με ACC θα μπορούσαν να αυξήσουν σημαντικά τα οφέλη των συστημάτων ακολουθήσεως οχημάτων δημιουργώντας έτσι το CACC. Μέσω της επικοινωνίας V2V (vehicle-to-vehicle) η αξιοποίηση των δεδομένων μπορεί να προβλέψει και να αποτρέψει είτε αλλαγές είτε οτιδήποτε προκύψει πριν γίνει αντιληπτό από τους αισθητήρες των οχημάτων. Η ενσωμάτωση των συστημάτων CACC ασφάλειας μπορεί να προσφέρει αξιοσημείωτες λύσεις στα προβλήματα της κοινωνίας καθώς και πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Αύξηση της ροής κυκλοφορίας επιτρέποντας μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων στην ίδια λωρίδα, χωρίς να χάνεται η σταθερότητα της πορείας των οχημάτων.

- Μείωση του κινδύνου οπίσθιων συγκρούσεων, αυξάνοντας την ταχύτητα αντίδρασης στις αλλαγές των προπορευόμενων οχημάτων και την ικανότητα επικοινωνίας με αυτά.
- Βελτίωση της άνεσης του οδηγού μέσω μείωσης των διαταραχών αλλά και των μεταβολών του σμήνους.
- Μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, βελτιώνοντας τη ροή της κυκλοφορίας και την αεροδυναμική απόδοση όταν οι αποστάσεις είναι αρκετά κοντινές μεταξύ των οχημάτων(slipstream).

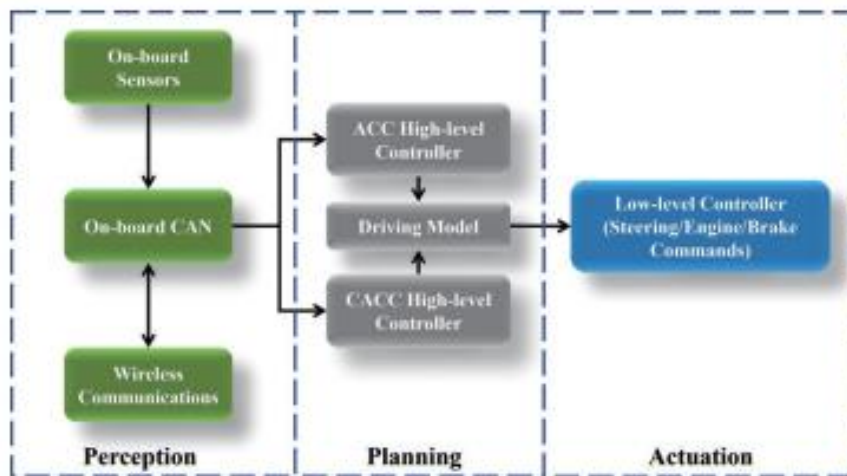
Παρακάτω θα δούμε μία γενικευμένη δομή ελέγχους ενός οχήματος εξοπλισμένου με CACC. Με αυτόν τρόπο θα μπορέσουμε να διαπιστώσουμε όλες τις διαφορές αλλά και την αυξημένη πολυπλοκότητα σε σύγκριση με το ACC αλλά και με το συμβατικό Cruise Control.



Εικόνα 2.4: Γενικευμένη δομή ελέγχου οχήματος με CACC.

2.3.1 Αρχιτεκτονική ελέγχου και τοπολογία ροής πληροφοριών CACC

Οι υλοποιήσεις CACC σε οχήματα παραγωγής αναπτύσσονται κυρίως ως επέκταση του συστήματος ACC. Τα οχήματα με CACC είναι επίσης εξοπλισμένα με αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί σε οχήματα με ACC όπως οδόμετρο, ραντάρ ή ακόμα και Lidar. Ο ACC ελεγκτής στέλνει εντολές στόχου ταχύτητας στους ενεργοποιητές του οχήματος. Η ίδια μεταβλητή ελέγχου είναι διαθέσιμη για το σύστημα CACC, αλλά χρειάζεται να λειτουργήσει μέσω του εμπορικού συστήματος που ελέγχει το γκάζι και το σύστημα πέδησης του οχήματος, δηλαδή τον Low-Level ελεγκτή. Αυτός ο περιορισμός περιορίζει κάπως τις επιλογές όταν πρόκειται για τον σχεδιασμό του ελεγκτή, αφού ο Low-Level ελεγκτής δεν θα μπορούσε να τροποποιηθεί, αλλά παρέχει επαρκές δυναμικό εύρος για τον έλεγχο του οχήματος κάτω από μη επείγουσες μεταβατικές συνθήκες. Το παρακάτω σχήμα από [3], δείχνει το διάγραμμα μπλοκ για την αρχιτεκτονική ελέγχου CACC του οχήματος. Αποτελείται από μια κλασική αρχιτεκτονική ελέγχου ρομποτικής που χωρίζεται σε τρία στάδια. Έτσι θα αναλύσουμε ξεχωριστά τι συμβαίνει και στα τρία στάδια.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)

Το Perception stage διακρίνεται από δύο πηγές από τις οποίες λαμβάνονται όλες οι πληροφορίες μέσω των αισθητήρων που έχουν εγκατασταθεί στο όχημα. Αρχικά, έχουμε το WSU σύστημα από το οποίο συλλέγονται όλες οι πληροφορίες από άλλα οχήματα της πλατφόρμας που σχετίζονται με την ταχύτητα, την επιτάχυνση, την απόσταση από τον προπορευόμενο όχημα, το χρονικό κενό που έχουν τα οχήματα μεταξύ τους και συμπεριλαμβάνονται στη δομή δεδομένων του CAN. Επιπλέον αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν ακόμα την ανίχνευση και την τοποθέτηση του οχήματος στην ακριβή θέση της πλατφόρμας, η οποία πραγματοποιείται από το WSU χρησιμοποιώντας το σύστημα GPS. Όσον αφορά το υπόλοιπο κομμάτι έχουμε τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τους αισθητήρες που βρίσκονται πάνω στο όχημα όπως οι μετρήσεις από τον lidar που είναι διαθέσιμες από το εργοστάσιο (απόσταση από το προηγούμενο όχημα), το οδόμετρο (τρέχουσα ταχύτητα) και η επιτάχυνση αλλά και πληροφορίες που

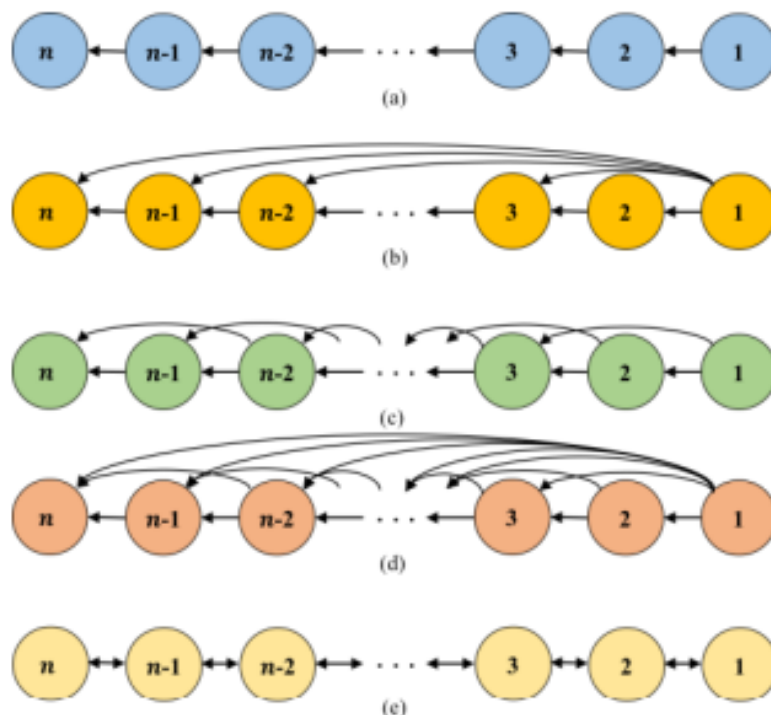
σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του οδηγού και του συστήματος. Δηλαδή ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του συστήματος μέσω πλήκτρων εντός της κονσόλας του οχήματος.

Το Planning stage περιλαμβάνει τους High-Level ελεγκτές όπου και οι δύο, δηλαδή το ACC και το εξελιγμένο σύστημα CACC, είναι διαθέσιμα κατά τις δοκιμές, έτσι ώστε ο οδηγός να μπορεί να μεταβεί από το ένα στο άλλο σε πραγματικό χρόνο. Για την αλλαγή αυτή, ο κώδικας ελέγχου διαβάζει τις πληροφορίες του δικτύου CAN που προέρχονται από την λειτουργία της μετάδοσης, δηλαδή λειτουργία οικονομικής οδήγησης, λειτουργία sport, κανονική λειτουργία ή λειτουργία χιονιού. Όταν επιλέγεται η λειτουργία sport, ο High-Level ελεγκτής θα λαμβάνει την έξοδο του ελεγκτή CACC. Όταν επιλέγεται οποιαδήποτε άλλη λειτουργία, η έξοδος του παραγωγής ACC ελεγκτή θα αποσταλεί στον Low-Level ελεγκτή. Ο κώδικας ελέγχου CACC έχει αναπτυχθεί σε MATLAB/Simulink και φορτώνεται στο όχημα χρησιμοποιώντας ένα dSpace MicroAutoBox, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το όχημα μέσω του δικτύου CAN, όπου αποστέλλονται οι εντολές ταχύτητας στόχου. Ο ελεγκτής CACC μπορεί να απενεργοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο με το ACC, είτε χρησιμοποιώντας τα κουμπιά στην κονσόλα του οδηγού είτε πιέζοντας το πεντάλ φρένου.

Το Actuation stage είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των εντολών που προέρχονται από το Planning stage. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, ο Low-Level ελεγκτής είναι αρμόδιος για τη μετατροπή των εντολών σε ενέργειες γκαζιού και φρένου, χρησιμοποιώντας τον εργοστασιακό ελεγκτή ACC.

Παρόλο που οι δομές συστημάτων των αυτόνομων αυτοκινήτων σε

διαφορετικά συστήματα CACC είναι παρόμοιες με την παραπάνω εικόνα , η ροή πληροφορίας διαφέρει ανάλογα με τις μεθοδολογίες. Για παράδειγμα η ροή πληροφορίας να μεταδίδεται από τον προκάτοχο και πίσω (Predecessor following), από τον προκάτοχο και τον πρώτο της ροής (Predecessor-leader following), και προς τις δύο κατευθύνσεις (bidirectional), από τον προκάτοχο και ανά δύο πίσω (two predecessor-following) και τέλος από τον από τον προκάτοχο, ανά δύο πίσω και από τον πρώτο(two predecessor-leader following). Έτσι έχουμε και μία εικόνα για να γίνει λίγο κατανοητότερη η ροή πληροφορίας μεταξύ των οχημάτων από [4] , με 1 να θεωρείται το πρώτο αυτοκίνητο του σμήνους και στη συνέχεια τα υπόλοιπα οχήματα που τον ακολουθούν.



Εικόνα 2.6: Τοπολογία ροής πληροφοριών : a) predecessor following, b) predecessor-leader following, c) two predecessor-following, d) two predecessor-leader following, e) bidirectional.

Μπορούμε να το επεκτείνουμε λίγο παραπάνω και να αναλύσουμε ορισμένες

τοπολογίες ροής που ίσως είναι πιο ευρεία διαδεδομένες και έχουν περισσότερες εφαρμογές. Έτσι λοιπόν έχουμε:

- **Predecessor following:** Η συγκεκριμένη τοπολογία ροής έχει ευρεία χρήση καθώς αποτελεί την πιο απλή δομή μετάδοσης πληροφορίας μεταξύ οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο η πληροφορία του αμέσως προηγούμενου οχήματος στην πλατφόρμα δηλαδή εάν θεωρούσαμε έναν δείκτη i , τότε το όχημα i θα επικοινωνούσε με το όχημα $i-1$ μετρώντας από τον αρχηγό της πλατφόρμας και προς τα πίσω. Λόγω της απλοϊκής αυτής λειτουργίας είναι κατάλληλη για μεγάλα σμήνη οχημάτων χωρίς να ενδιαφέρεται για το μέγεθος και χωρίς να δημιουργείται οποιαδήποτε υπολογιστική δυσκολία. Επιπλέον, η συγκεκριμένη τοπολογία είναι πολύ χρήσιμη για την αποφυγή συγκρούσεων με το μπροστινό όχημα καθώς ελέγχεται συνέχεια η απόσταση. Ωστόσο, σε περίπτωση που συμβεί κάτι πιο μπροστά από τον αρχηγό της πλατφόρμας η σύγκρουση θα είναι αναπόφευκτη.
- **Predecessor-leader following:** Η συγκεκριμένη τοπολογία ροής επιτρέπει τη μετάδοση πληροφορίας από το αμέσως προηγούμενο και τον αρχηγό της πλατφόρμας γεγονός που μειώνει τον χρόνο αντίδρασης σε οποιαδήποτε μεταβολή. Σε σύγκριση με την προηγούμενη τοπολογία σε περίπτωση που απαιτηθεί οποιαδήποτε μεταβολή πρέπει η πληροφορία να περάσει πρώτα από όλα τα προπορευόμενα οχήματα μέχρι να φτάσει παραδείγματος χάρη σε κάποιο από τα τελευταία με αντάλλαγμα την καθυστέρηση χρόνου. Σε αυτήν την περίπτωση κάθε όχημα επικοινωνεί κατευθείαν με τον αρχηγό της

πλατφόρμας εξαλείφοντας έτσι τον χρόνο αντίδρασης.

- **Bidirectional:** Η συγκεκριμένη τοπολογία ροής βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε όχημα υποστηρίζει ανταλλαγή πληροφοριών με το αμέσως προηγούμενο αλλά και επόμενο όχημα. Αυτή η τεχνική έχει στόχο να βελτιώσει τη σταθερότητα της ακολουθίας των αυτοκινήτων καθώς λαμβάνει υπόψιν περισσότερα οχήματα και παραμέτρους στον βρόχο που αφορά τον έλεγχο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της είναι ότι οι διαταραχές διαδίδονται και προς την μία και προς την άλλη κατεύθυνση της ακολουθίας γεγονός που δυσκολεύει και καθιστά περίπλοκη την ανάλυση της σταθερότητας της.

Ωστόσο είναι καλό να αναφερθεί ότι οι όλες οι τοπολογίες έχουν ανάλογα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να έχουν και αντίστοιχη πολυπλοκότητα στην ανάλυση τους.

2.4 Επικοινωνία

Υπάρχουν διάφορα είδη τεχνολογιών επικοινωνίας των οχημάτων με την κάθε μία να έχει και τα ανάλογα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα αλλά και τους διαφορετικούς σκοπούς και χρήσεις. Έτσι θα μελετήσουμε μερικές από αυτές και θα αναφέρουμε ορισμένα πράγματα για αυτές.

Vehicle-to-Vehicle: Η τεχνολογία V2V επιτρέπει στα οχήματα να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου κεντρικού σημείου είτε υποδομής. Για αυτό το λόγο η επικοινωνία είναι άμεση χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις και με αρκετά απλή υποδομή. Η τεχνολογία αυτή λοιπόν ενσωματώνεται στα συστήματα CACC. Χρησιμοποιεί συνήθως Dedicated Short – Range Communications(DSRC) με

αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα με τις αποστάσεις δηλαδή την εμβέλεια της επικοινωνίας. Η καθυστέρηση της πληροφορίας αποτελεί και το πιο σημαντικό πρόβλημα αυτής της τεχνολογίας γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει καταστροφικές συνέπειες ως προς την ασφάλεια και την σταθερότητα του σμήνους των οχημάτων. Επιπλέον μία ακόμα πρόκληση που εμφανίζεται είναι η ανεπτυγμένη τεχνολογία που χρειάζεται να έχει το κάθε όχημα ώστε να υπάρχει βέλτιστη απόδοση. Τέλος ο σκοπός και οι χρήσεις όλων των επικοινωνιών δεν διαφέρει πολύ με κυριότερες την βελτίωση της ασφάλειας και την ενίσχυση της συνεργατικής οδήγησης μεταξύ των χρηστών των οδικών δικτύων.

Vehicle-to-Everything: Η τεχνολογία V2X περιλαμβάνει την επικοινωνία των οχημάτων με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Είτε δηλαδή με άλλα οχήματα (V2V), είτε με υποδομές (V2I), είτε με δίκτυα (V2N). Η τεχνολογία αυτή συνδυάζει την DSRC, C-V2X, LTE και 5G για την επίτευξη μίας ευρύτερης και πιο αξιόπιστης επικοινωνίας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία σαφώς είναι και πιο αποτελεσματική και αποδοτικότερη μίας και είναι αρκετά πιο πολύπλοκη. Όλο αυτό βέβαια την καθιστά και αρκετά πιο δύσκολη στην υλοποίηση της, μίας και πρέπει να συνεργαστούν πολλά περισσότερα συστήματα μεταξύ τους για τον συντονισμό αυτό. Τέλος ο σκοπός αυτής της τεχνολογίας είναι η δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου συστήματος που συνδέει τα οχήματα με τους πεζούς, τα δίκτυα αλλά και με υποδομές για την βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας της κυκλοφορίας.

3 Predictor feedback CACC για ομογενή γραμμικά συστήματα με καθυστέρηση ενεργοποιητή

Vehicle dynamics

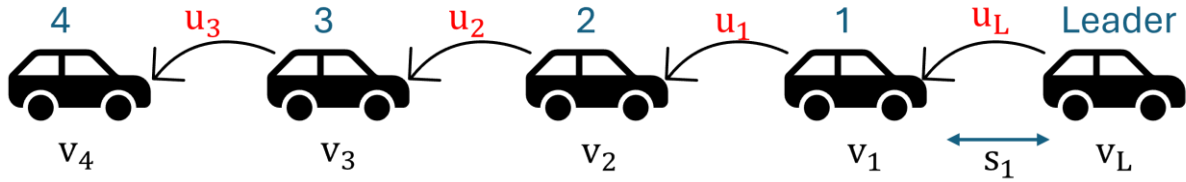
Έτσι Θεωρούμε μία ομογενή συμβολοσειρά αυτοκινήτων στην οποία το κάθε αυτοκίνητο ξεχωριστά χαρακτηρίζεται από ένα γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξεως.

- $\dot{s}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t)$ (1)

- $\dot{v}_i(t) = u_i(t - D)$ (2)

όπου το $i = 1, \dots, N$ συμβολίζει τη σειρά του αυτοκινήτου στη συμβολοσειρά, το s_i συμβολίζει την απόσταση του αυτοκινήτου i και του $i - 1$, το v_i συμβολίζει την ταχύτητα του αυτοκινήτου i , το u_i συμβολίζει την ζητούμενη επιτάχυνση του αυτοκινήτου i και D είναι η καθυστέρηση του ενεργοποιητή. Βλέπε παράδειγμα στην Εικόνα 3.1 Σμήνος πέντε οχημάτων στο οποίο κάθε όχημα βασίζεται στο σύστημα (1),(2) με δικιά τους ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα και απόσταση από το προπορευόμενο όχημα. Για να υπάρχει ισορροπία στο σύστημα θα πρέπει όλα τα οχήματα να έχουν

μηδενική επιτάχυνση και η ταχύτητα τους να καθορίζεται από την ταχύτητα του αρχηγού του σμήνους.



Εικόνα 3.1 Σμήνος πέντε οχημάτων στο οποίο κάθε όχημα βασίζεται στο σύστημα (1),(2) με δικιά τους ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα και απόσταση από το προπορευόμενο όχημα.

3.1 Predictor feedback CACC Design

Έτσι προκύπτουν οι ανάλογες εξισώσεις από [5] για το γραμμικό σύστημα (1),(2) :

$$\bullet \quad u_i(t) = \frac{a}{h} q_{i,1}(t) - (a + b)q_{i,2}(t) + bq_{i,3}(t) \quad (3)$$

$$\bullet \quad q_i(t) = e^{\Gamma D} x_i(t) + \int_{t-D}^t e^{\Gamma(t-D)} (B u_i(\theta) + B_1 u_{i-1}(\theta)) d\theta \quad (4)$$

$$\text{Όπου } q_i = \begin{bmatrix} q_{i,1} \\ q_{i,2} \\ q_{i,3} \end{bmatrix}, \quad x_i = \begin{bmatrix} s_i \\ v_i \\ u_{i-1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ και } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u_i(t) = a \left(\frac{s_i(t)}{h} - v_i(t) \right) + b(v_{i-1}(t) - v_i(t)) \quad (6)$$

Η (3) εφαρμόζει την καθυστέρηση D του Predictor ενώ προκύπτει η (3) που εφαρμόζει δεδομένα του προπορευόμενου οχήματος, όπως την ταχύτητα και την ζητούμενη επιτάχυνση. Όπως παρατηρούμε το ίδιο απαιτεί και η εξίσωση ελέγχου (3), ενώ δεν μπορούμε να ξεχάσουμε να αναφέρουμε ότι όλες αυτές οι πληροφορίες παρέχονται μέσω της επικοινωνίας (V2V) μέσω αισθητήρων πάνω στα οχήματα και έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες.

3.2 Collision avoidance and non-overshooting response

Predictor feedback CACC

Έτσι λοιπόν θεωρούμε μία πλατφόρμα πέντε αυτοκινήτων τα οποία χαρακτηρίζονται από τις εξισώσεις (1),(2) και υπακούν στην εξίσωση ελέγχου (3). Για το όχημα που οδηγεί το σμήνος ισχύει ότι : $v_{10} + \int_0^t u_1(s - d)ds > 0$ για $t > 0$. Όσον αφορά τις παραμέτρους p_1, p_2 ισχύει ότι :

$$\bullet \quad p_2 < p_1 < 0 \quad (7)$$

$$\bullet \quad 0 < -h p_1 p_2 - p_1 - p_2 \leq -p_2 \quad (8)$$

με $a = h p_1 p_2$ και $b = -h p_1 p_2 - p_1 - p_2$

Έτσι για οποιοδήποτε $D \geq 0, h > 0$ η πλατφόρμα είναι σταθερή και για το σύστημα ισχύει ότι $s_i(t) > 0, v_i(t) > 0$ για $i = 1, 2, \dots, N$, ουσιαστικά δηλαδή ότι τα αυτοκίνητα θα έχουν πάντα θετική απόσταση μεταξύ τους δηλαδή ότι θα αποφευχθεί

οποιαδήποτε σύγκρουση και θα έχουν θετική ταχύτητα. Για $t \geq 0$ και με δεδομένο ότι $s_{i0}, v_{i0}, u_{i0} \in \mathbb{R}$ και ότι $u_{i0}, u_{i-10} \in C[-D, 0], i = 1, 2, \dots, N$ ισχύουν τα παρακάτω:

$$\bullet \frac{v_{i0} + \int_{-D}^0 u_{i0}(s) ds}{s_{i0} + D(v_{i-10} - v_{i0}) + \int_{-D}^0 s a_{i0}(s) ds} \leq -p_2 \quad (9)$$

με $a_{i0} = u_{i0} - u_{i-10}$ και για $0 \leq t \leq D$

$$\bullet v_{i0} + \int_{-D}^{t-D} u_{i0}(s) ds > 0 \quad (10)$$

$$\bullet s_{i0} + t(v_{i-10} - v_{i0}) + \int_{-D}^{t-D} (D + s - t)(u_{i0}(s) - u_{i-10}(s)) ds > 0 \quad (11)$$

Επειδή η απόδειξη του θεωρήματος είναι αρκετά εκτενής και γεμάτη μαθηματικούς τύπους μπορεί να την βρει κανείς εδώ [6]. Είδαμε λοιπόν τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση των οχημάτων του σμήνους. Αναλυτικότερα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι δεν επιβάλλεται κανένα όριο στο CTH ενώ αντιθέτως οι μεταβλητές ελέγχου είναι αυστηρά περιορισμένες. Επιπλέον όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η (9) μας υποδεικνύει ότι η απόσταση μεταξύ των οχημάτων είναι θετική (αποφυγή σύγκρουσης) και η ταχύτητα τους είναι θετική όταν κατά τη χρονική στιγμή που ξεκινάει να υλοποιείται ο κλειστός βρόχος δηλαδή όταν ο χρόνος ισούται με D , η απόσταση είναι αρκετά πιο μεγάλη από τη σχετική ταχύτητα του αυτοκινήτου ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση. Η

συγκεκριμένη εξίσωση εξασφαλίζει τα προαναφερθέντα μετά το χρονικό διάστημα καθυστέρησης. Το πιο σημαντικό και δύσκολο κομμάτι ώστε να εξασφαλιστεί θετική απόσταση και ταχύτητα είναι κατά την διάρκεια της καθυστέρησης. Αυτό γίνεται μέσω των (10),(11). Στην περίπτωση που οι αρχικές συνθήκες επιτάχυνσης είναι μηδέν πρέπει απλά η αρχική απόσταση να είναι μεγαλύτερη από την απόσταση που θα μειωθεί μεταξύ των οχημάτων ώστε και πάλι να είναι θετική. Τέλος όταν η αρχική ταχύτητα του προπορευόμενου αυτοκινήτου είναι μεγαλύτερη, τότε οι συγκρούσεις θα αποφευχθούν σε όλες τις περιπτώσεις που υπάρχει θετική απόσταση των αυτοκινήτων σαν αρχική κατάσταση.

3.3 String Stability Robustness of Predictor feedback CACC

Θεωρούμε ξανά ένα σμήνος πέντε οχημάτων το οποίο χαρακτηρίζεται από τις (1),(2) κάτω από την εξίσωση ελέγχου (3) με τη διαφορά ότι αντικαθιστούμε την καθυστέρηση D με D_r αναφερόμενοι έτσι στην πραγματική καθυστέρηση του συστήματος. Εάν ισχύει ότι $a + 2b - \frac{2}{h} > 0$, τότε υπάρχει μία θετική σταθερά κ για την οποία $|\Delta D| = |D_r - D| < \kappa$ με $D, D_r \geq 0, h > 0$, το σμήνος είναι ανά δύο σταθερό. Επιπλέον, για μια σταθερή ταχύτητα του πρώτου οχήματος του σμήνους, κάθε μεμονωμένο σύστημα οχημάτων είναι ασυμπτωτικά σταθερό και επιτυγχάνονται μηδενικά σφάλματα που σχετίζονται με στην απόσταση και την ταχύτητα σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Η απόδειξη αυτού του θεωρήματος βρίσκεται εδώ [6].

4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Οι αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των προσομοιώσεων ώστε να αποδειχθούν οι ασφαλείς προδιαγραφές του CTH predictor-feedback CACC είναι οι εξής. Θεωρήσαμε ένα σενάριο στο οποίο τέσσερα αυτοκίνητα θα ακολουθούν τον πρώτο αυτοκίνητο του σμήνους, δηλαδή συνολικά ένα γκρουπ πέντε αυτοκινήτων. Το πρώτο και το αμέσως επόμενο όχημα απέχουν $s_{10} = 13.55\text{m}$, τα υπόλοιπα απέχουν $s_{i0} = h v_{i0} = 0.75 * 15 = 11.25\text{m}$ για $i = 2,3,4$ μεταξύ τους, με αρχική ταχύτητα $v_{10} = 10 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ για αυτόν και $v_{i0} = 15 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ για το υπόλοιπο σμήνος, ενώ τέλος είχαν μηδενική ζητούμενη επιτάχυνση $u_{i0} = 0$. Επιπλέον έχοντας καθυστέρηση $D = 0.7$ και desired time headway $h = 0.75$ με $p_1 = -0.1, p_2 = -1.5$. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουμε κάποιο περιορισμό μεταξύ του D και του h σε σύγκριση παραδείγματος χάρη με το predictor-feedback ACC που πρέπει το $D < h$ ώστε να μπορέσει να εγγυηθεί σταθερότητα. Έτσι οι παρακάτω προσομοιώσεις θα παραχθούν από κώδικα Matlab κάτω από τις παραπάνω συνθήκες που περιεγράφηκαν προηγουμένως.

Παρατηρώντας τις αρχικές συνθήκες της υλοποίησης, το παράδειγμα θα μπορούσε να αναφέρεται σε ένα όχημα το οποίο εισχωρεί σε ένα γκρουπ αυτοκινήτων μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου. Αφού περνάει ένα μικρό χρονικό διάστημα και το σμήνος βρίσκεται σε ισορροπία, το πρώτο αυτοκίνητο του σμήνους επιχειρεί μία απότομη επιβράδυνση και στη συνέχεια επιτάχυνση ώστε να φανεί η αποτελεσματικότητα του Predictor feedback CACC. Από τα δεδομένα της υλοποίησης μπορούμε να σχολιάσουμε ότι ικανοποιούνται οι συνθήκες (7),(8) και ότι

εφόσον η αρχική ζητούμενη επιτάχυνση του σμήνους είναι μηδενική και οι ταχύτητες θετικές και ίδιες για τα οχήματα $i = 2,3,4$ έχουμε ορισμένες αλλαγές στις (9),(10),(11).

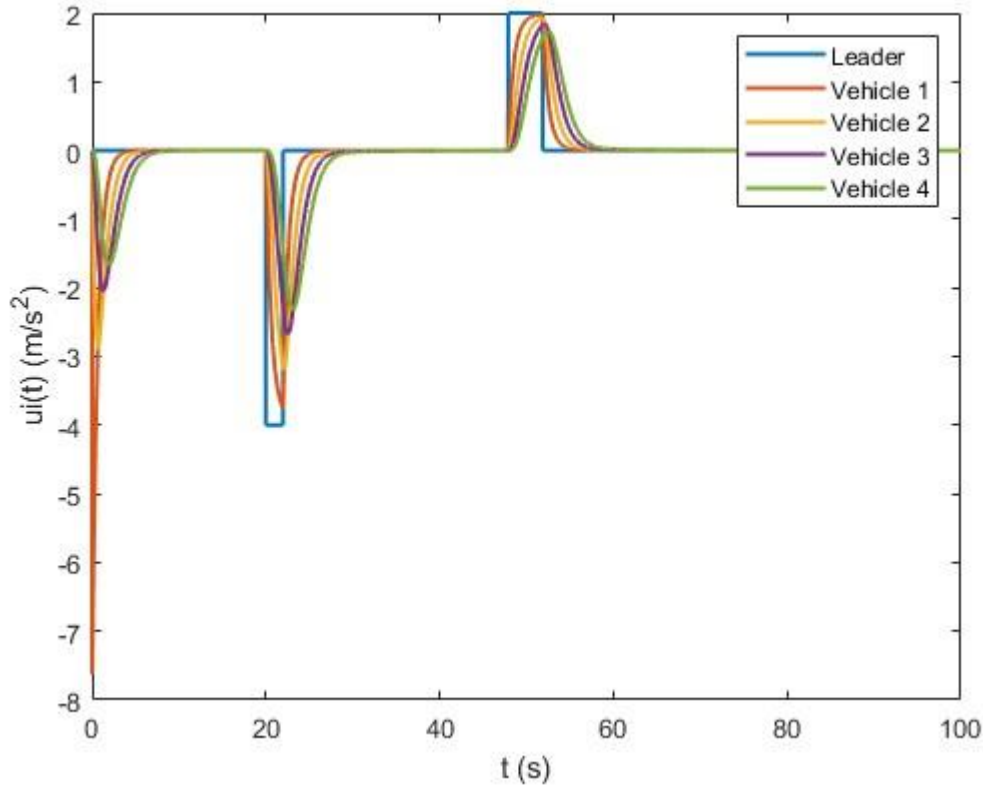
Αν προχωρήσουμε στις πράξεις θα δούμε ότι οι συνθήκες αυτές μετατρέπονται σε:

$$\bullet \quad v_{i0} \leq -p2s_{i0} \text{ για } i = 2,3,4 \quad (12)$$

$$\bullet \quad v_{10} \leq -p2(s_{10} - \frac{D}{3}v_{10}) \quad (13)$$

Θα αναφέρουμε στη συνέχεια σε τι μεταφράζεται και τι μπορούμε να αντλήσουμε από τις συνθήκες αυτές. Ας ξεκινήσουμε με τις προσομοιώσεις και ας αναλύσουμε ξεχωριστά ένα-ένα τα αποτελέσματα.

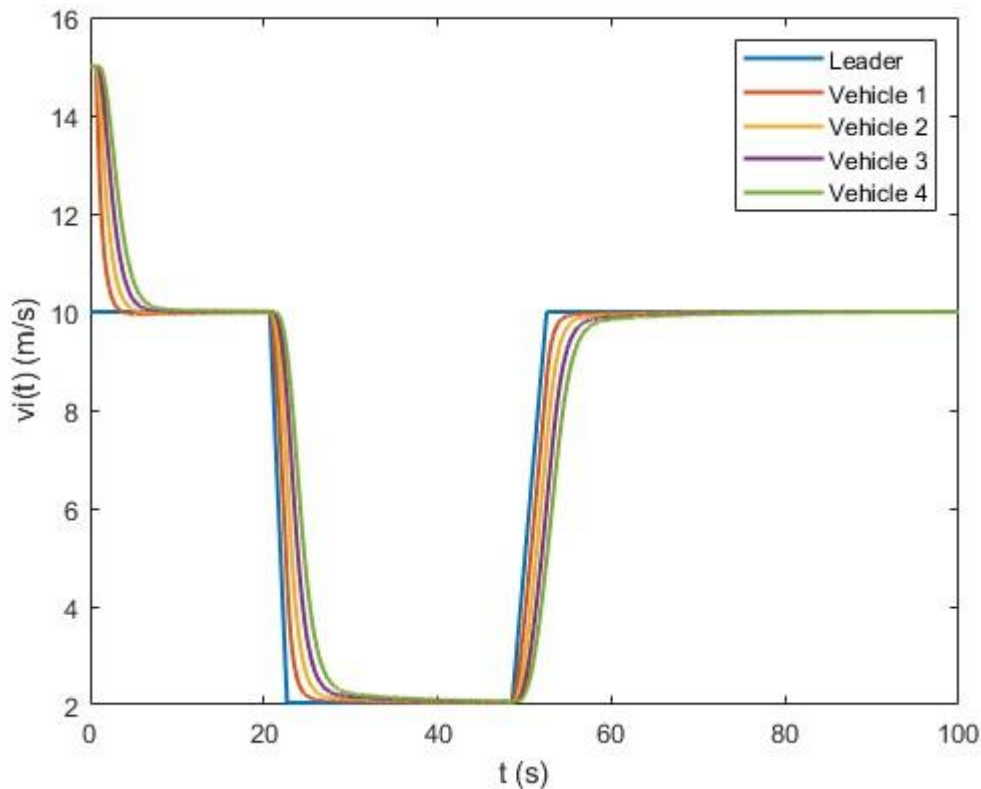
4.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για πέντε οχήματα



Εικόνα 4.1 : Η ζητούμενη επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law

Παρατηρώντας τη συγκεκριμένη εικόνα η οποία αναφέρεται στο Control variable ή αλλιώς στη ζητούμενη επιτάχυνση σε συνάρτηση με το χρόνο για κάθε αυτοκίνητο, έχουμε να επισημάνουμε τα εξής. Αρχικά το πρώτο όχημα, όντας αυτό που ορίζει τη ροή της συμβολοσειράς, έχει κυματομορφή σταθερή με τετραγωνικούς παλμούς αρχικά για δύο δευτερόλεπτα με μέγιστη τιμή $-4 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ με σκοπό την επιβράδυνση της συμβολοσειράς και αργότερα για τέσσερα δευτερόλεπτα με μέγιστη τιμή $2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ με σκοπό την επιτάχυνση της. Στα υπόλοιπα διαστήματα έχει τιμή μηδέν. Επομένως έχοντας αυτό σαν δεδομένο σε συνάρτηση με το γεγονός ό,τι το πρώτο

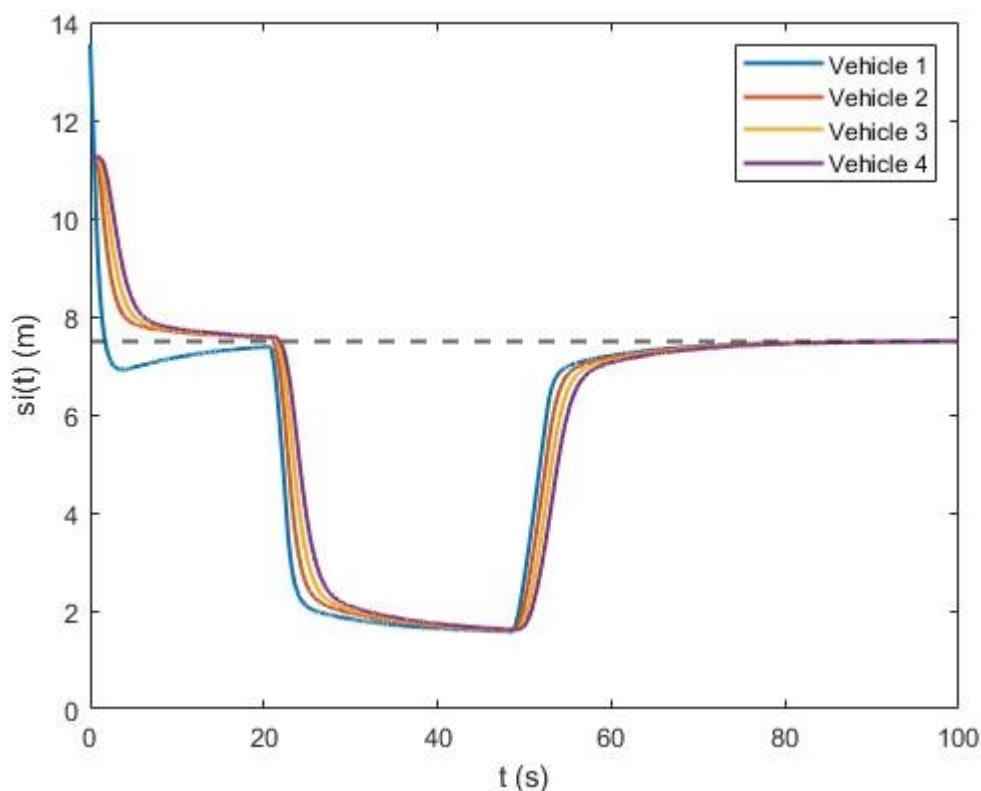
είναι αυτό που καθορίζει τη ροή του γκρουπ, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τα υπόλοιπα ζητούμενα variables. Αντίστοιχα θα κινηθούν και τα υπόλοιπα αυτοκίνητα που ακολουθούν τη ροή με βάση τη θέση τους και την απόσταση από τον πρώτο. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι όλες οι κυματομορφές παρουσιάζουν ημιτονοειδή χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα και ενώ όλα τα αυτοκίνητα ξεκινούν με την ίδια αρχική τιμή, είναι εμφανές ότι αυτά που βρίσκονται σε πιο μπροστινή θέση (δηλαδή πιο κοντά στον πρώτο) φτάνουν σε πιο υψηλές τιμές είτε επιβραδύνοντας είτε επιταχύνοντας με μικρότερη απόκλιση όσο περνάει ο χρόνος. Επιπλέον παρατηρούμε ότι τα πιο απομακρυσμένα αυτοκίνητα εκτελούν πιο ημιτονοειδή κυματομορφή σε σύγκριση με τα οχήματα που βρίσκονται σε πιο μπροστινή θέση τα οποία υπόκεινται σε πιο απότομες μεταβολές.



Εικόνα 4.2 : Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.

Παρατηρώντας τη συγκεκριμένη Εικόνα η οποία αναφέρεται στην ταχύτητα σε συνάρτηση με το χρόνο για κάθε όχημα, έχουμε να επισημάνουμε τα εξής. Αρχικά το πρώτο αυτοκίνητο, τα πρώτα είκοσι δευτερόλεπτα έχει σταθερή ταχύτητα $10 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς όπως είδαμε στην προηγούμενη Εικόνα το control variable έχει τιμή μηδέν αντίστοιχα τα πρώτα είκοσι δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια επιβραδύνει μέχρι τα $2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ και αργότερα επιταχύνει και καταλήγει να κινείται με $10 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ δηλαδή την αρχική τιμή του, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται αφού προηγουμένως αναλύσαμε το ζητούμενη επιτάχυνση του πρώτου και είδαμε αρχικά την μείωση και στη συνέχεια την αύξηση της ταχύτητας. Όσον αφορά τα υπόλοιπα

αυτοκίνητα, ξεκίνησαν με αρχική τιμή $15 \left(\frac{m}{s}\right)$ δηλαδή μεγαλύτερη από την τιμή του προπορευόμενου με αποτέλεσμα να υποστούν απότομη μείωση έως ότου σταθεροποιηθεί για λίγα δευτερόλεπτα στα $10 \left(\frac{m}{s}\right)$. Στη συνέχεια οι κυματομορφές και των υπόλοιπων οχημάτων ακολουθούν την πορεία του πρώτου με τη διαφορά ότι έχουν πιο ομαλές μεταβολές. Επιπλέον τα πιο απομακρυσμένα αυτοκίνητα έχουν μία μικρή καθυστέρηση στο χρόνο όμως καταλήγουν να ακολουθούν και αυτά τη ροή με τις αντίστοιχες επιβραδύνσεις και επιταχύνσεις.

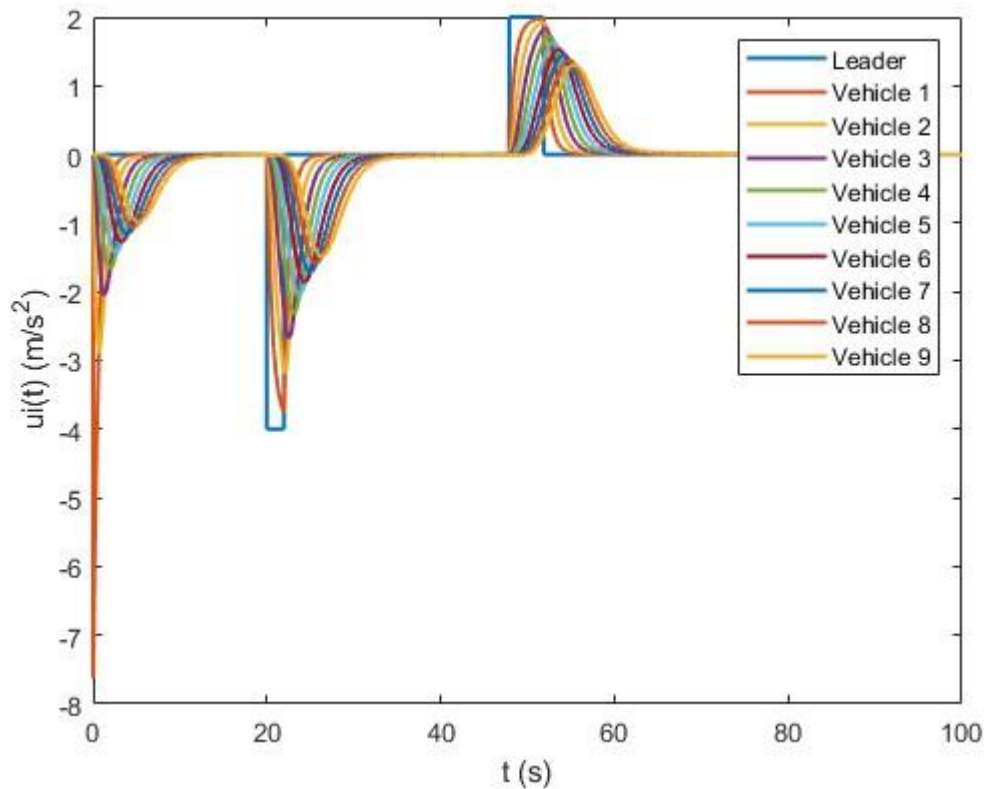


Εικόνα 4.3: Η απόσταση μεταξύ των οχημάτων σε συνάρτηση του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.

Παρατηρώντας τη συγκεκριμένη Εικόνα η οποία αναφέρεται στην απόσταση των αυτοκινήτων σε συνάρτηση με το χρόνο, έχουμε να επισημάνουμε τα εξής.

Αρχικά παρατηρούμε ότι και οι τέσσερις αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων ελαττώνονται ραγδαία, γεγονός το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς το πρώτο ξεκίνησε με αισθητά μικρότερη ταχύτητα $10 \left(\frac{m}{s}\right)$ σε σύγκριση με τα υπόλοιπα αυτοκίνητα $15 \left(\frac{m}{s}\right)$ με αποτέλεσμα να πρέπει γρήγορα να ελαττώσουν ταχύτητα και ως εκ τούτου να μειώνεται και η απόσταση μεταξύ τους. Επομένως για αυτό το λόγο παρατηρούμε και ό,τι η απόσταση μεταξύ του leader και του επόμενου στη σειρά είναι αισθητά μικρότερη από τις υπόλοιπες μετά την πρώτη επιβράδυνση. Στη συνέχεια παρατηρούμε ό,τι οι κυματομορφές είναι αρκετά παρόμοιες με μία μικρή καθυστέρηση σε οποιαδήποτε μεταβολή όσο φτάνουμε προς το τέλος της ουράς των αυτοκινήτων. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις κυματομορφές καθώς τα αυτοκίνητα έχουν άμεση συσχέτιση μόνο με το αυτοκίνητο που βρίσκεται μπροστά τους και για αυτό το λόγο υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση στη <<μετάδοση της πληροφορίας>> προς τα αυτοκίνητα που βρίσκονται στο τέλος.

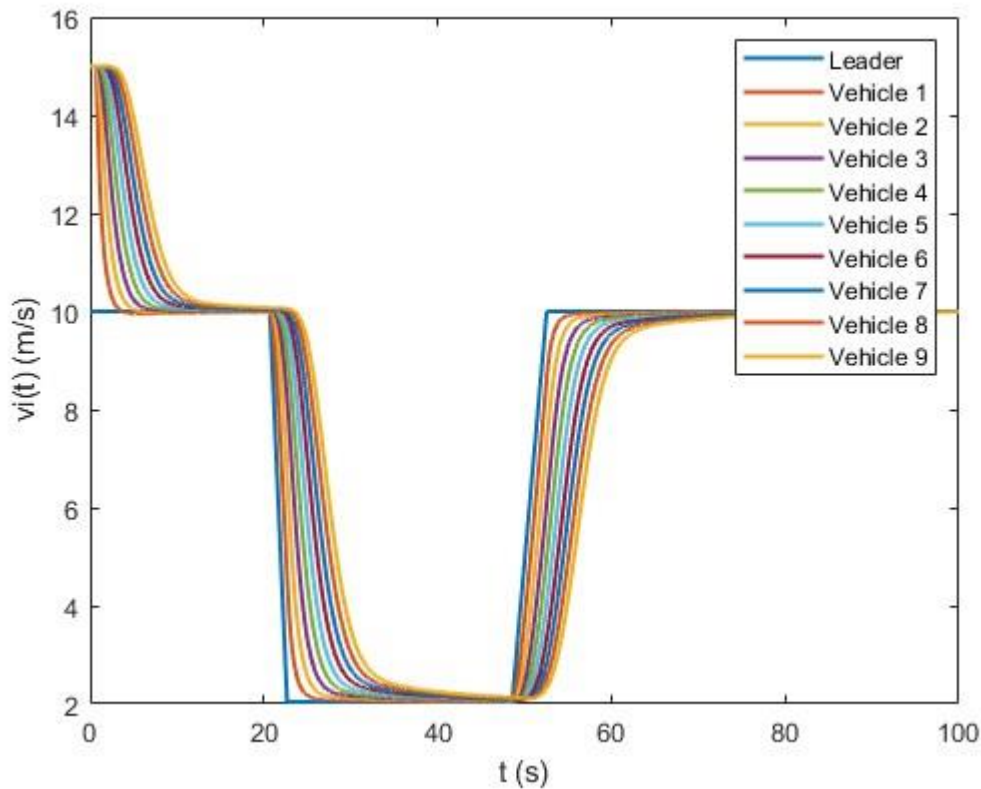
4.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων για δέκα οχήματα



Εικόνα 4.4: Η ζητούμενη επιτάχυνση σε συνάρτηση του χρόνου του Leader και εννέα ακόμα Vehicle με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.

Αντίστοιχες είναι και οι κυματομορφές της ζητούμενης επιτάχυνσης αυτή τη φορά με εννέα αυτοκίνητα να ακολουθούν το πρώτο όχημα. Παρατηρούμε ό,τι τα πιο απομακρυσμένα αυτοκίνητα από τον leader, δηλαδή αυτά που βρίσκονται στο τέλος της ουράς παρουσιάζουν ημιτονοειδή κυματομορφή χωρίς απότομες μεταβολές σε σύγκριση με τα αυτοκίνητα που βρίσκονται σε πιο μπροστινή θέση στη συμβολοσειρά. Επιπλέον παρατηρούμε ό,τι όσο πιο πίσω πηγαίνουμε στην συμβολοσειρά τόσο μικραίνει και η απόλυτη τιμή της επιτάχυνσης ενώ αντίστοιχα είναι μεγαλύτερη στις μπροστινές θέσεις. Όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως και

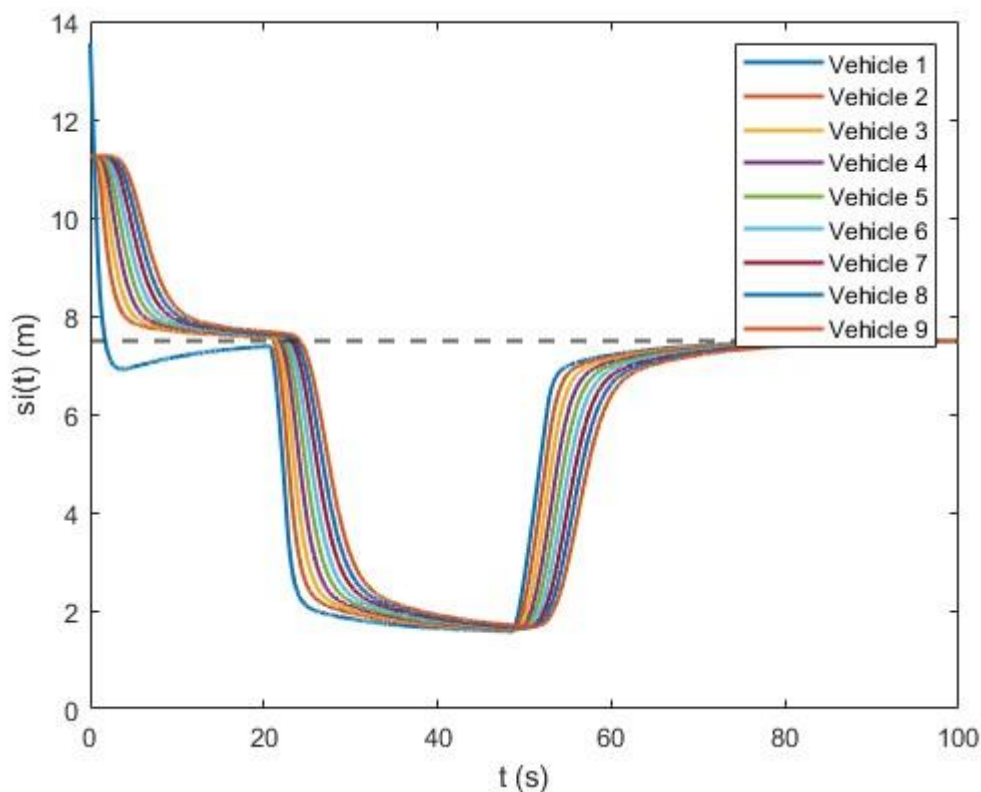
είναι σημαντικό να τονιστεί, όσο κατευθυνόμαστε προς το τέλος της συμβολοσειράς υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση στη μεταβολή η οποία είναι απόλυτα φυσιολογική.



Εικόνα 4.5: Η ταχύτητα σε συνάρτηση του χρόνου του Leader και εννέα ακόμα Vehicle με βάση το CTH predictor-feedback CACC law

Έχοντας αυτή τη φορά εννέα αυτοκίνητα να ακολουθούν τον leader, τα αποτελέσματα είναι αυτά που περιμέναμε καθώς αυτά που βρίσκονται προς το τέλος της συμβολοσειράς έχουν μία μικρή καθυστέρηση ως προς τις μεταβολές, είτε δηλαδή στην μείωση είτε στην αύξηση της ταχύτητας. Ταυτόχρονα κάνοντας τη σύγκριση με την Εικόνα 4.2 στην οποία είχαμε συνολικά πέντε αυτοκίνητα, δεν παρατηρούμε αισθητές διαφορές. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές φαίνεται να είναι ίδιες και οι καμπύλες είναι παρόμοιες. Για τα επιπλέον πέντε αυτοκίνητα όλα έχουν

μεταφερθεί λίγο αργότερα χρονικά καθώς η πληροφορία αργεί να φτάσει προς το τέλος γεγονός απόλυτα φυσιολογικό καθώς κάθε αυτοκίνητο επικοινωνεί με το μπροστινό του και δεν μπορεί να λάβει απευθείας την πληροφορία από τον Leader.

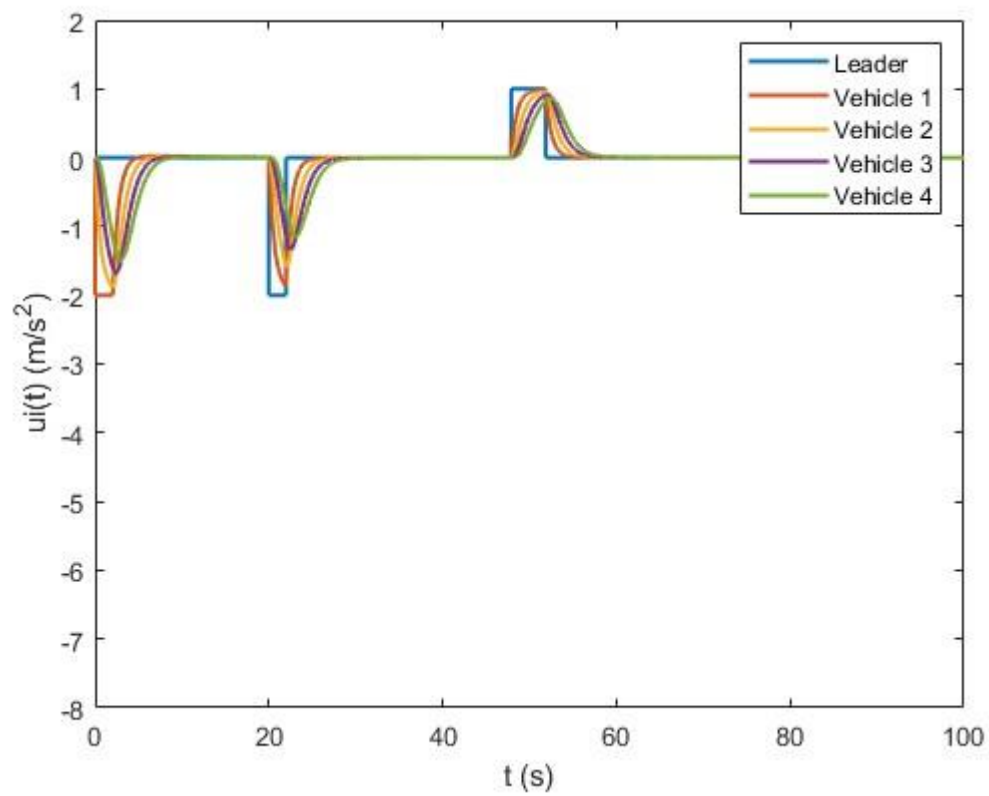


Εικόνα 4.6: Η απόσταση μεταξύ των δέκα vehicles σε συνάρτηση του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law.

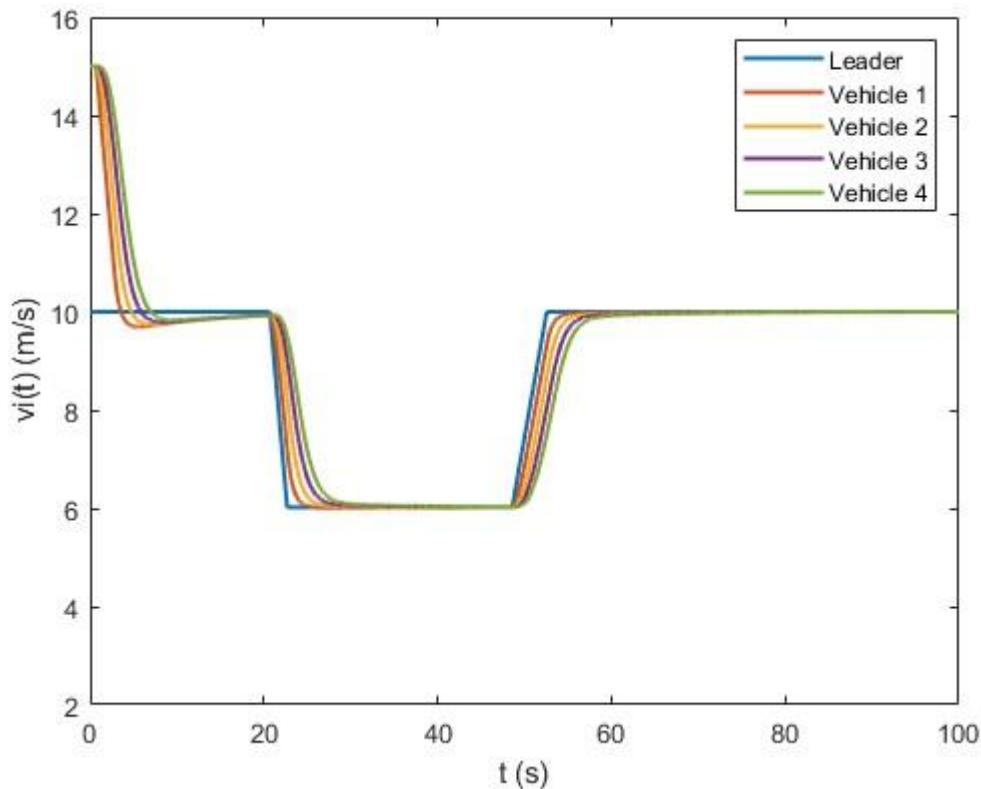
Οι εννέα αποστάσεις των αυτοκινήτων έχουν την κυματομορφή που περιμέναμε όπως είδαμε και στην Εικόνα 4.3 με τη διαφορά ότι υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση στην οποιαδήποτε μεταβολή όσο κατευθυνόμαστε προς το τέλος της συμβολοσειράς. Οι μεταβολές και οι κλίσεις των κυματομορφών είναι παρόμοιες και η απόσταση του Leader και του αμέσως προηγούμενου αυτοκινήτου που τον ακολουθεί είναι η ίδια με αυτήν στην Εικόνα 4.3.

4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με προσθήκη κορεσμού στο control input

Πολύ εύστοχα παρατηρούμε ότι η προσθήκη κορεσμού στην είσοδο δηλαδή στη ζητούμενη επιτάχυνση έχει επιτευχθεί, περιορίζοντας έτσι τα όρια από -2 έως $1 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$. Όλα τα οχήματα συμπεριλαμβανομένου και του leader έχουν προσαρμοστεί στα νέα δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο έχουν προκύψει ορισμένες αλλαγές στις κυματομορφές της ζητούμενης επιτάχυνσης, ξεκινώντας από το όχημα αμέσως μετά τον Leader, το οποίο έχει πλέον κυματομορφή σχεδόν τετραγωνικού παλμού. Στην πορεία παρατηρούμε ότι στα υπόλοιπα οχήματα εμφανίζονται απότομες μεταβολές, ενώ όσο κατευθυνόμαστε προς το τέλος της συμβολοσειράς, τα οχήματα έχουν σχεδόν ημιτονοειδή κυματομορφή χωρίς απότομες είτε επιταχύνσεις είτε επιβραδύνσεις.



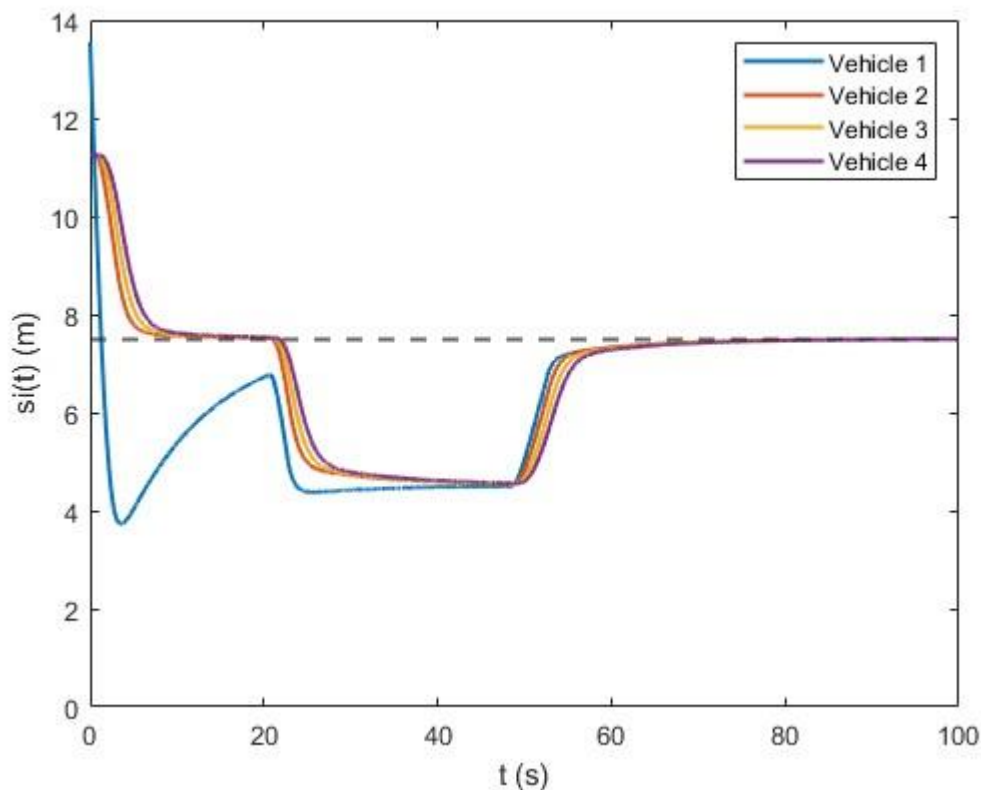
Εικόνα 4.7 : Η ζητούμενη επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.



Εικόνα 4.8 : Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.

Όπως είναι λογικό μετά την αλλαγή της επιτάχυνσης επιφέρονται και αρκετές αλλαγές ως προς την ταχύτητα των αυτοκινήτων. Παρατηρούμε λοιπόν ότι τα αυτοκίνητα έχουν τις ίδιες αρχικές τιμές και μέχρι τα είκοσι δευτερόλεπτα μοιάζει να μην έχει αλλάξει τίποτα σε σύγκριση με πριν. Παρ' όλα αυτά με μία καλύτερη ματιά μπορούμε να καταλάβουμε ότι υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση στην πτώση των αρχικών τιμών των οχημάτων που ακολουθούν των Leader καθώς όπως είναι λογικό καθώς έχουμε αισθητά μικρότερη επιβράδυνση όπως είδαμε στην προηγούμενη Εικόνα. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι η μικρότερη τιμή ταχύτητας που θα φτάσουν τα οχήματα είναι $6 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ σε σύγκριση με τα $2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ που είχαμε με τις αρχικές συνθήκες.

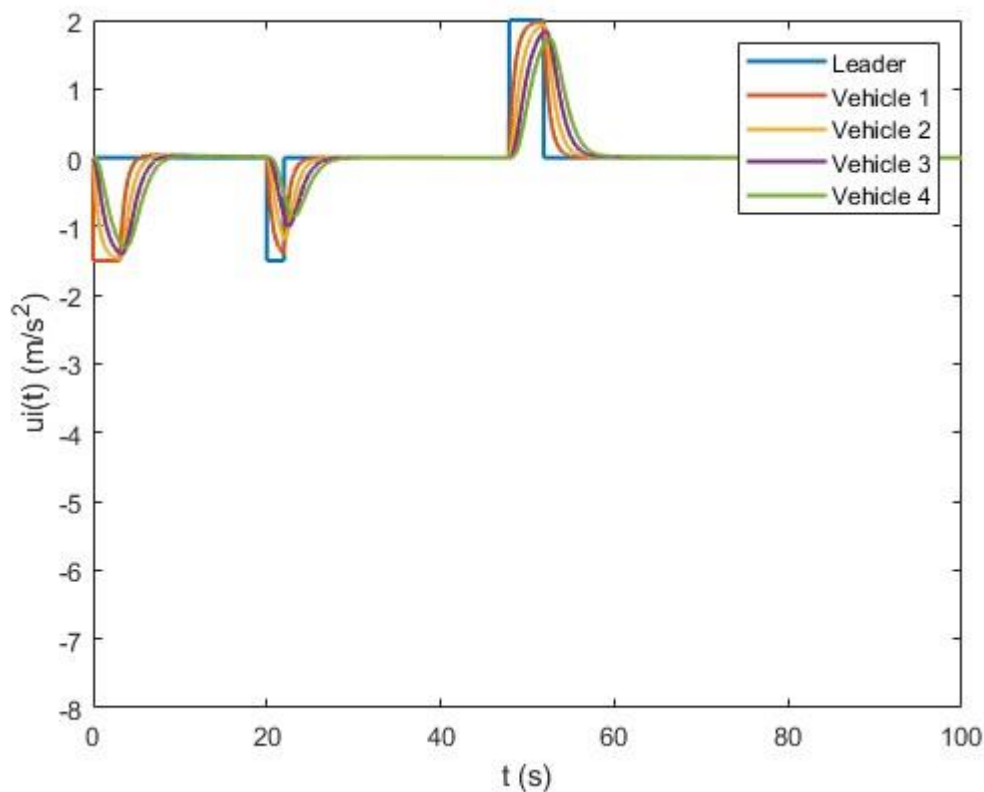
Αυτό συμβαίνει διότι για το ίδιο χρονικό διάστημα σε αυτή την περίπτωση έχουμε επιβράδυνση με απόλυτη τιμή $2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ σε σύγκριση με τα $4 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ που είχαμε προηγουμένως. Τέλος επιστρέφουν στα $10 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ όπως θα έπρεπε καθώς στα ίδια δευτερόλεπτα θα έπρεπε να επιφέρεται η ανάλογη μεταβολή στην ταχύτητα των οχημάτων παρόλο που οι απόλυτες τιμές τις επιτάχυνσης και τις επιβράδυνσης δεν είναι ίδιες. Στο προηγούμενο παράδειγμα χωρίς τη χρήση κορεσμού υπήρχε μεταβολή από $8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ και τώρα $4 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$. Επομένως και τώρα θα έπρεπε να επιστρέψει στην αρχική τιμή, τα $10 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.



Εικόνα 4.9: Η απόσταση μεταξύ των vehicles σε συνάρτηση του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο

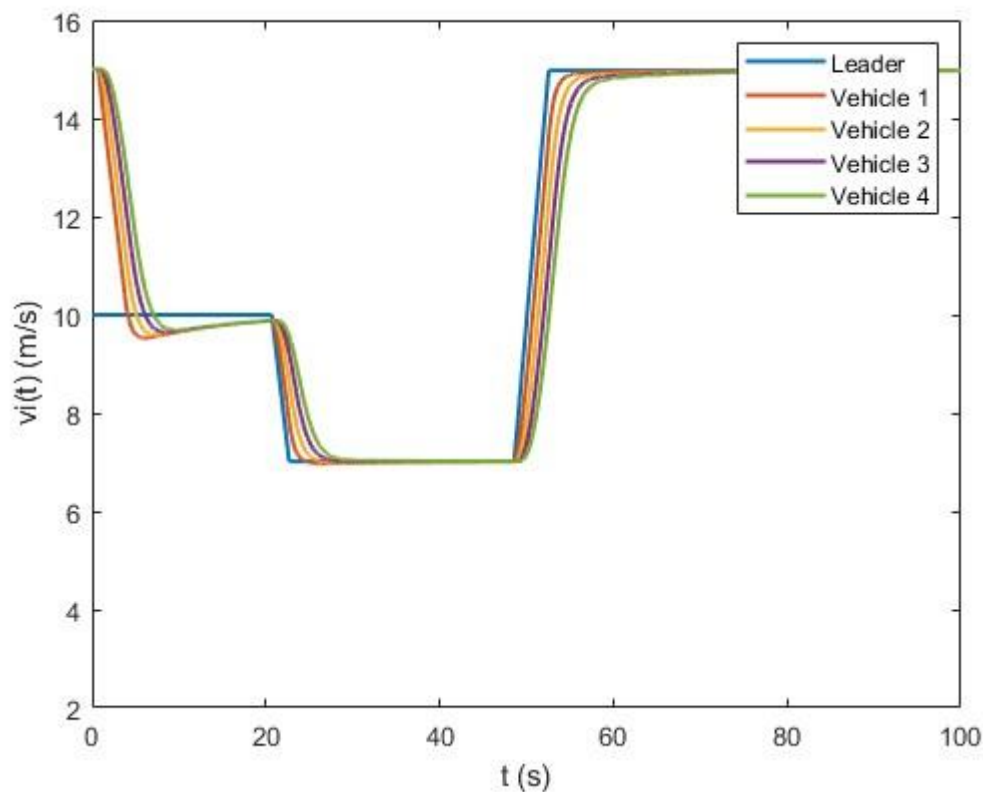
Αφού έχουμε δει και σχολιάσει τα δύο προηγούμενα figures, ας δούμε και την επίδραση όσον αφορά τις αποστάσεις των οχημάτων. Αφού λοιπόν σχολιάσαμε την ταχύτητα των αυτοκινήτων στην Εικόνα 4.8 : Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο. και αναφερθήκαμε σε μία μικρή καθυστέρηση ως προς την αρχική μείωση των ταχυτήτων, παρατηρούμε ότι αποδεικνύεται καθώς η απόσταση του leader και του αμέσως επόμενου αυτοκινήτου έχει μειωθεί αισθητά σε σύγκριση με τα προηγούμενα παραδείγματα. Αυτό επέρχεται από το γεγονός ότι ο leader κρατάει σταθερή ταχύτητα $10 \left(\frac{m}{s} \right)$ ενώ το αμέσως επόμενο αυτοκίνητο αργεί να μειώσει ταχύτητα με αποτέλεσμα να φτάνει πιο κοντά στο προπορευόμενο όχημα δηλαδή τον Leader με την πιο μικρή απόσταση γύρω στα 4 m. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία αύξηση απότομη αύξηση και αργότερα ακολουθεί τις υπόλοιπες κυματομορφές. Όσον αφορά τις υπόλοιπες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων, σε σύγκριση με τα προηγούμενα παραδείγματα παρατηρούμε μία αύξηση από 2 m σε 4.5 m κάτι το οποίο ουσιαστικά οφείλεται στην μεταβολή ταχύτητας του leader και κατ' επέκταση σε όλο το σύνολο.

Για να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα προβήκαμε σε ένα ακόμα παράδειγμα προσθήκης κορεσμού στην είσοδο, αυτή τη φορά



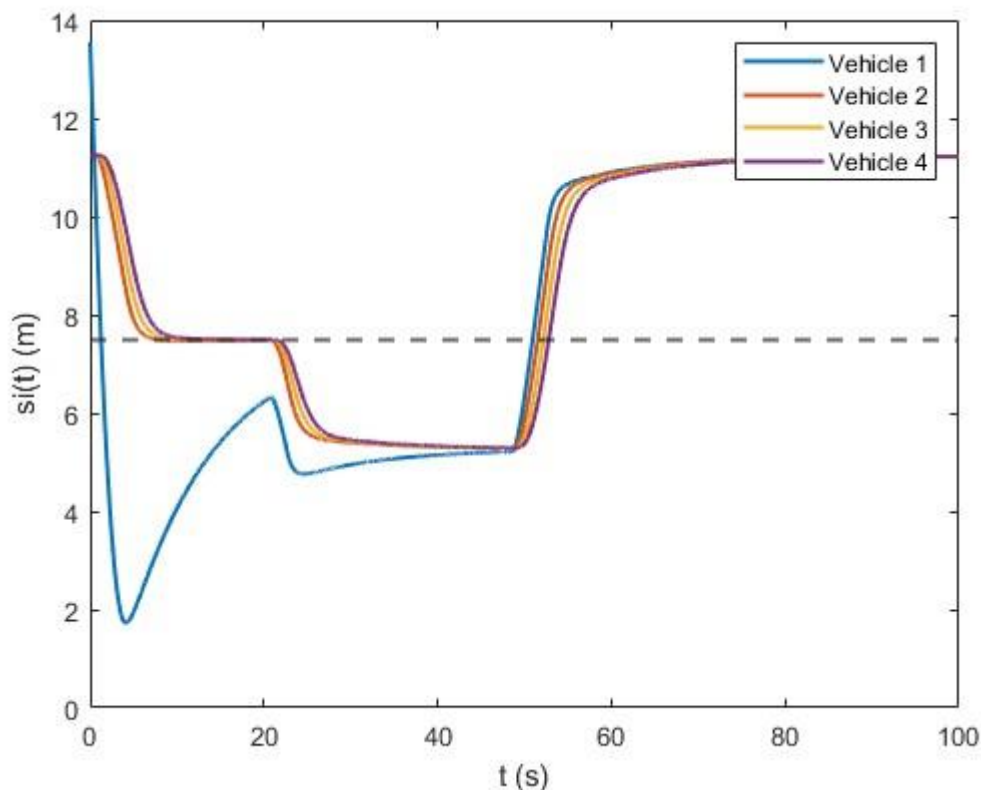
Εικόνα 4.10: Η ζητούμενη επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα αυτού του παραδείγματος με ορισμένες αναμενόμενες αλλαγές. Παρατηρούμε λοιπόν οι επιβραδύνσεις περιορίζονται στο $-1.5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ μειώνοντας ακόμα περισσότερο τις υπόλοιπες και όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα παραδείγματα με σχεδόν ημιτονοειδή κυμαστροφές από τα οχήματα που βρίσκονται προς το τέλος ουράς. Αντίστοιχες είναι και οι επιταχύνσεις έως $2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$.



Εικόνα 4.11: Η ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.

Αντίστοιχες είναι και οι κυματορμές των ταχυτήτων των αυτοκινήτων με καθυστερημένη την αρχική πτώση λόγω της χαμηλότερης επιβράδυνσης που σχολιάστηκε προηγουμένως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ελάχιστη τιμή ταχύτητας που επιτυγχάνεται από τη συμβολοσειρά με περίπου $7 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$. Στη συνέχεια έχουμε απότομη αύξηση της ταχύτητας έως την αρχική τιμή που είχαν τα αυτοκίνητα δηλαδή $15 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$.

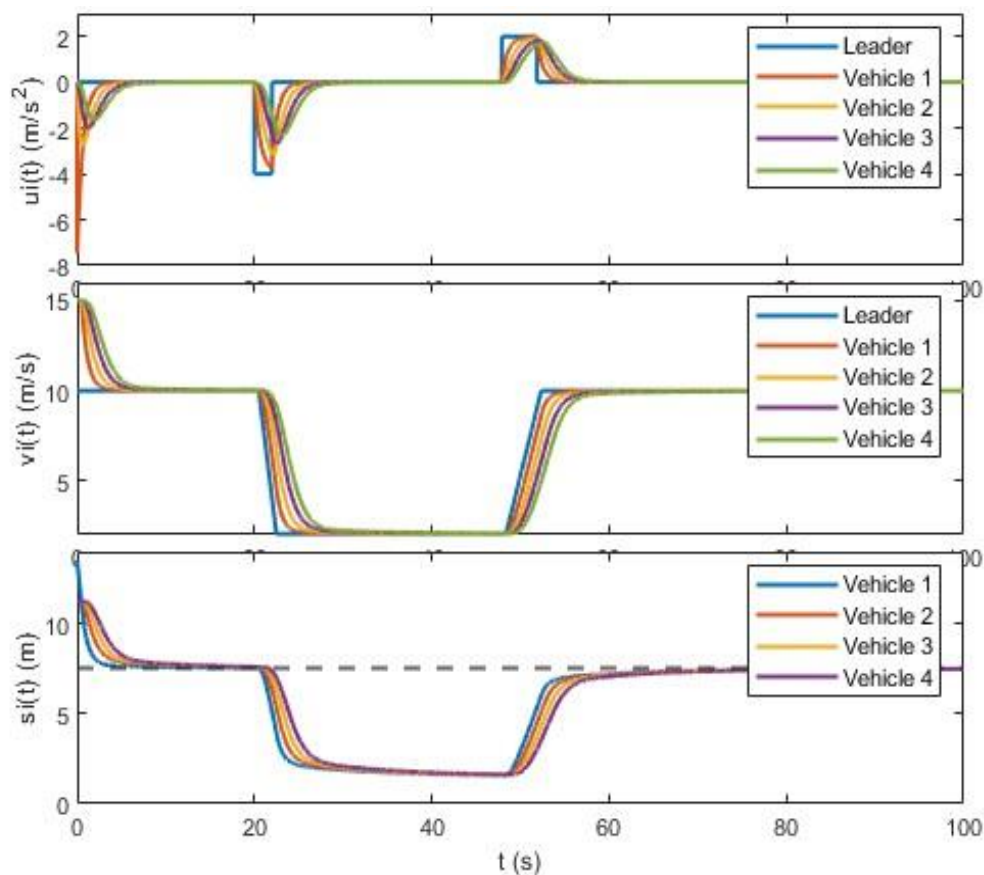


Εικόνα 4.12: Η απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με προσθήκη κορεσμού στην είσοδο.

Αυτό που είναι αξιοσημείωτο στο συγκεκριμένο Εικόνα είναι η ελάχιστη τιμή που παρατηρούμε να φθάνει η απόσταση μεταξύ του leader και του αμέσως επόμενου αυτοκινήτου. Λόγω λοιπόν της μικρής επιβράδυνσης που επιφέρεται στο σύστημα και μετά από μελέτες, αυτό είναι ένα από τα κατώτατα όρια στα οποία μπορεί να φτάσει η ζητούμενη επιτάχυνση χωρίς να έχουμε σύγκρουση μεταξύ αυτών των δύο αυτοκινήτων. Με τις συγκεκριμένες τιμές βλέπουμε ότι φθάνει στα 2 m ενώ στη συνέχεια αυξάνεται και πάλι απότομα. Τα υπόλοιπα οχήματα έχουν παρόμοια κυματομορφή με μέγιστη απόσταση περίπου στα 11.5 m .

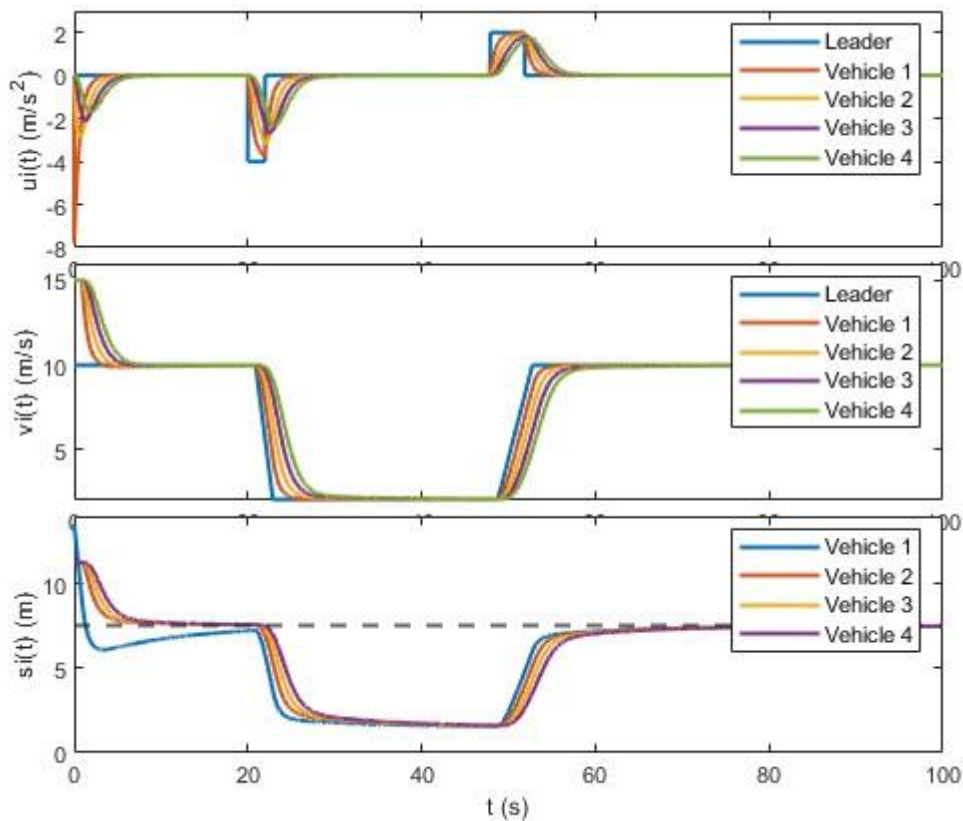
4.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με μεταβολή καθυστερήσεων

Με μία μικρή μεταβολή στην καθυστέρηση ($D=0.5$) παρατηρούμε ότι οι κυματομορφές της ζητούμενης επιτάχυνσης και ταχύτητας δεν έχουν μεταβληθεί σχεδόν καθόλου. Αντιθέτως, όσον αφορά την απόσταση εύκολα παρατηρούμε ότι η απόσταση του leader και του αμέσως επόμενου αυτοκινήτου δεν φτάνει σε τόσο χαμηλές τιμές μετά την πρώτη επιβράδυνση γεγονός που οφείλεται στη μειωμένη καθυστέρηση. Στη συνέχεια εξελίσσονται όλα ομαλά και πανομοιότυπα με τα προηγούμενα παραδείγματα.



Εικόνα 4.13: Η ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα, απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με καθυστέρηση $D=0.5$

Αντίστοιχες είναι οι κυματομορφές και στο συγκεκριμένο παράδειγμα αυτή τη φορά με αυξημένη καθυστέρηση στο σύστημα $D=0.9$. Επομένως όπως είναι λογικό λόγω της αυξημένης καθυστέρησης, στην πρώτη επιβράδυνση ο Leader και το πρώτο αυτοκίνητο έρχονται πιο κοντά ενώ αργότερα όλα κυλούν όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα.



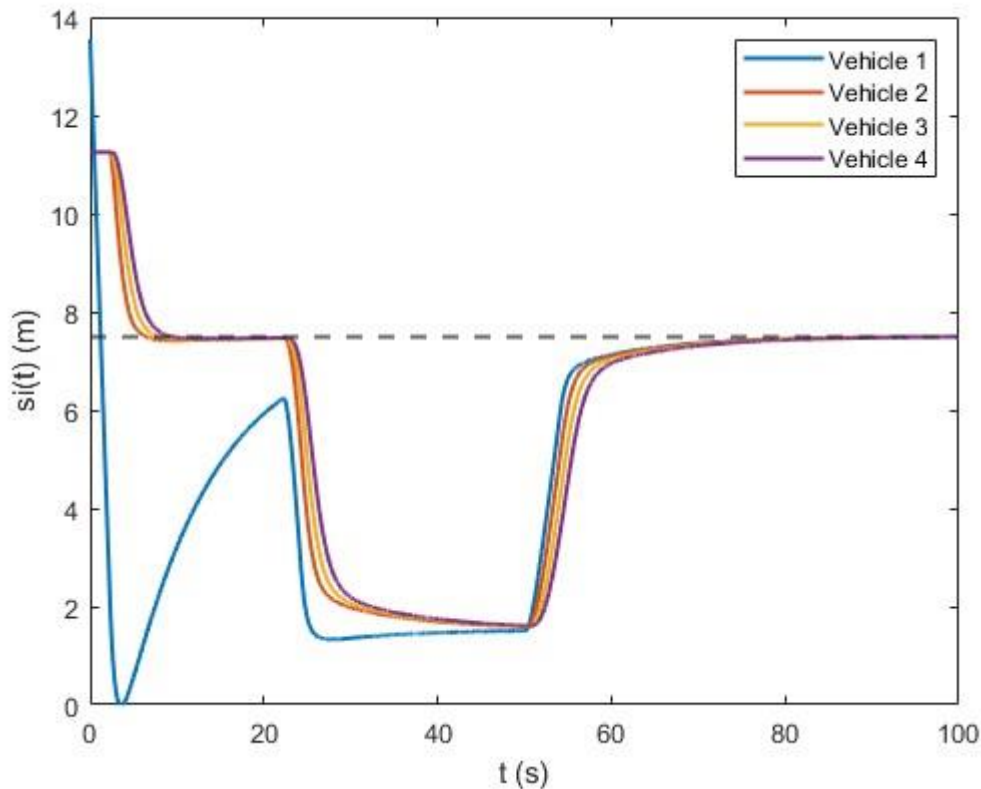
Εικόνα 4.14: Η ζητούμενη επιτάχυνση, ταχύτητα, απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με καθυστέρηση $D=0.9$.

Έτσι λοιπόν αν επικαλεστούμε τις εξισώσεις (11),(12) μπορούμε να εξαγάγουμε ορισμένα αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα τις συνθήκες που επηρεάζουν την αποφυγή συγκρούσεων του σμήνους. Συνεχίζοντας τις μαθηματικές πράξεις για την εξίσωση (12), καταλήγουμε στο ότι πρέπει :

$$s_{10} \geq u_{10} \left(-\frac{1}{p_2} + \frac{D}{3} \right)$$

Λύνοντας ως προς το D βλέπουμε ότι $D \leq 2,065$ ώστε να έχουμε αποφυγή συγκρούσεων για το σμήνος των πέντε οχημάτων. Αυτό το γνωρίζαμε λοιπόν από την εφαρμογή των πράξεων για το συγκεκριμένο πρόβλημα με συγκεκριμένες αρχικές συνθήκες. Πάμε να δούμε τώρα αν συμβαδίζει και με τις προσομοιώσεις του

συστήματος ώστε να διασφαλίσουμε την εγκυρότητα του ελεγκτή μας.



Εικόνα 4.15: Η απόσταση συναρτήσει του χρόνου με βάση το CTH predictor-feedback CACC law με καθυστέρηση $D=2.1$.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η απόσταση μεταξύ του πρώτου αυτοκίνητου και του αμέσως επόμενου έχει γίνει στιγμιαία αρνητική μετά την πρώτη επιβράδυνση δηλαδή τα οχήματα έχουν έρθει σε σύγκρουση με καθυστέρηση $D = 2.1$. Αντιθέτως οι αποστάσεις μεταξύ των υπόλοιπων οχημάτων του σμήνους δεν έχουν επηρεαστεί κάτι το οποίο αποδείξαμε και μαθηματικά.

4.5 Τελικός Σχολιασμός

Έχοντας λοιπόν αναλύσει όλες τις προσομοιώσεις θα ήθελα να προβούμε σε

έναν γενικό συλλογισμό και σχολιασμό όσων είδαμε. Στο παράδειγμα μας, με τις συγκεκριμένες αρχικές συνθήκες και παραμέτρους παρατηρήσαμε ότι δεν εμφανίζεται καμία αστάθεια και ανισορροπία στην συμβολοσειρά, κανένα ‘overshooting’ με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η ζητούμενη σταθερότητα ολόκληρης της συμβολοσειράς χωρίς συγκρούσεις μεταξύ των οχημάτων (δηλαδή θετικές αποστάσεις) και με θετικές ταχύτητες. Στη συνέχεια προβήκαμε σε πλατφόρμα δέκα οχημάτων για να ελέγξουμε την εγκυρότητα του συστήματος και παρατηρήσαμε ότι η ισορροπία και η σταθερότητα του συστήματος παρέμεινε η ίδια με τις αναμενόμενες μεταβολές και αντιδράσεις στα παραπάνω αυτοκίνητα.

Ακόμα, διαπιστώσαμε ότι σε συνθήκες όπου οι αρχικές ταχύτητες όλων των οχημάτων εκτός του πρώτου είναι ίδιες, με μηδενικές αρχικές επιταχύνσεις, οι αποστάσεις των οχημάτων κατά τη διάρκεια της καθυστέρησης του ενεργοποιητή εκτός αυτής του πρώτου και του αμέσως προηγούμενου αυτοκινήτου παραμένουν σταθερές χωρίς να επηρεάζονται καθόλου από τη χρονική διάρκεια της καθυστέρησης. Επομένως η μεταβολή της καθυστέρησης επηρεάζει καθαρά και μόνο το αμέσως προηγούμενο από το οδηγό του σμήνους. Έτσι για την αποφυγή συγκρούσεων κατά τη διάρκεια της καθυστέρησης πρέπει η μείωση της απόστασης τους να είναι μικρότερη από την αρχική απόσταση που είχαν. Ακόμα σε περίπτωση που το προπορευόμενο όχημα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα τότε η αποφυγή της σύγκρουσης είναι δεδομένη έχοντας εννοείται θετική αρχική απόσταση μεταξύ τους.

5 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως κύριο στόχο την ανάλυση και αξιολόγηση της σταθερότητας μιας συμβολοσειράς οχημάτων αλλά και των προκλήσεων που αφορούν τα συστήματα Cooperative Adaptive Cruise Control. Με τη χρήση του συστήματος ελέγχου Predictor feedback Cooperative Adaptive Cruise Control μέσω προσομοιώσεων αλλά και θεωρητικής ανάλυσης, εξετάστηκε η ανθεκτικότητα και η σταθερότητα μιας συμβολοσειράς πέντε αυτοκινήτων σε ομογενές σύστημα έχοντας ορισμένα δεδομένα. Με τον τρόπο αυτό, αναπτύχθηκε ένας κώδικας Matlab έτσι ώστε μέσω προσομοιώσεων να δοθούν οι απαντήσεις στα ερωτήματα μας. Η πλατφόρμα των οχημάτων αποδείχθηκε σταθερή και ανθεκτική χωρίς συγκρούσεις μεταξύ τους και χωρίς ταλαντώσεις και υπερβάσεις που να υποδηλώνουν κάποια αστάθεια. Για τον λόγο αυτό συνεχίστηκαν τα παραδείγματα ώστε να βρεθούν τα όρια του συστήματος αλλά και να εξεταστεί η επίδραση των αρχικών συνθηκών και των καθυστερήσεων στο σύστημα. Έτσι ελέγχθηκε η επίδραση της αύξησης των οχημάτων του σμήνους και κατά πόσο διασφαλίζεται η σταθερότητα και η ανθεκτικότητα της μεγαλύτερης πλέον πλατφόρμας. Τα αποτελέσματα έχοντας μελετήσει και αναλύσει τις προσομοιώσεις ήταν τα ανάλογα καθώς δεν επηρεάστηκε καθόλου η ισορροπία του συστήματος. Επιπλέον, με την εισαγωγή κορεσμού στην είσοδο του συστήματος και μεταβολών στην καθυστέρηση του ενεργοποιητή, παρατηρήθηκαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, καθώς η ισορροπία του συστήματος παρουσίασε μεταβολές. Οι παράμετροι αυτοί είναι κρίσιμες για τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες και αποτελούν σημαντικά θέματα για

περαιτέρω μελέτη. Συνολικά, η εργασία αυτή ανέδειξε τη δυνατότητα του Predictor Feedback CACC να διαχειρίζεται με επιτυχία τη σταθερότητα και την ανθεκτικότητα των συστημάτων.

6 Μελλοντική Εργασία

Η παρούσα εργασία εστίασε σε ομογενή συστήματα ελέγχου δεύτερης τάξης με συγκεκριμένους παράγοντες και παραμέτρους. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά πεδία για περαιτέρω έρευνα, ειδικά στην ανάπτυξη ετερογενών συστημάτων τρίτης τάξης, τα οποία μπορούν να ενσωματώσουν περισσότερους παράγοντες και να εφαρμοστούν σε πιο ρεαλιστικές καταστάσεις με πραγματικά σενάρια. Έτσι στο μέλλον, η έρευνα μπορεί να στραφεί σε πιο πολύπλοκα ετερογενή συστήματα τρίτης τάξης, τα οποία θα περιλαμβάνουν διαφορετικά οχήματα με ποικίλες δυναμικές, χαρακτηριστικά και απαιτήσεις ελέγχου. Παραδείγματος χάρη το σμήνος οχημάτων μπορεί να αναφέρεται σε διαφορετικούς είδους οχήματα και όχι μόνο αυτοκίνητα με συνέπεια την διαφορετική δυναμική, είτε αυτή οφείλεται στον κινητήρα, στο βάρος, στην αεροδυναμική με αποτέλεσμα την δυσκολία της επιτάχυνσης ή/και της επιβράδυνσης. Τέτοιου είδους συστήματα απαιτούν την ενσωμάτωση περισσότερων παραγόντων κάνοντας τα πιο πολύπλοκα και ταυτόχρονα δεν θα αναφέρονται σε τόσο ιδανικά σενάρια όπως στην περίπτωση με τα ομογενή. Τέλος μία ακόμα ενδιαφέρουσα πρόταση θα ήταν η μελέτη συστημάτων με διαφορετική ροής πληροφορίας η οποία σίγουρα θα κάνει πιο περίπλοκο τον αλγόριθμο αλλά θα συνδυάζει και περισσότερες παραμέτρους με σκοπό την αποφυγή λάθους δίνοντας με αυτόν τον τρόπο αυξημένη αξιοπιστία.

7 Βιβλιογραφία

- [1] C. Flores, «Control architecture for adaptive and cooperative car-following,» 2018.
- [2] C. Kreuzen, «Cooperative Adaptive Cruise Control Using information from multiple predecessors in combination with MPC,» 2012.
- [3] Songtao Xie , Zhenhong Li , Farshad Arvin and Zhengtao Ding, «A Review of Multi-vehicle Cooperative Control System in Intelligent Transportation,» Manchester , 2023.
- [4] Z. Wang , G. Wu , M. J. Barth, «A Review on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) Systems: Architectures, Controls, and Applications,» 2018.
- [5] L. C. Davis, «Method of compensation for the mechanical response of connected adaptive cruise control vehicles,» *Phys A*, τόμ. 562, 2012.
- [6] N.Bekiaris-Liberis, «Robust String Stability and Safety of CTH Predictor-Feedback CACC,» Aug 2023.