ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

Εργαστήριο Οχημάτων

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

ΚΟΝΤΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ν. ΣΠΕΝΤΖΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

Εργαστήριο Οχημάτων

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

ΚΟΝΤΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ν. ΣΠΕΝΤΖΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία,εκπονήθηκε στο εργαστήριο οχημάτων του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών του ΕΜΠ,υπό του καθηγητή Κωνσταντίνου Ν.Σπέντζα,τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγησή του αλλά και την διαθεσιμότητά του οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκα τη βοήθειά του.

Πίνακας Περιεχομένων

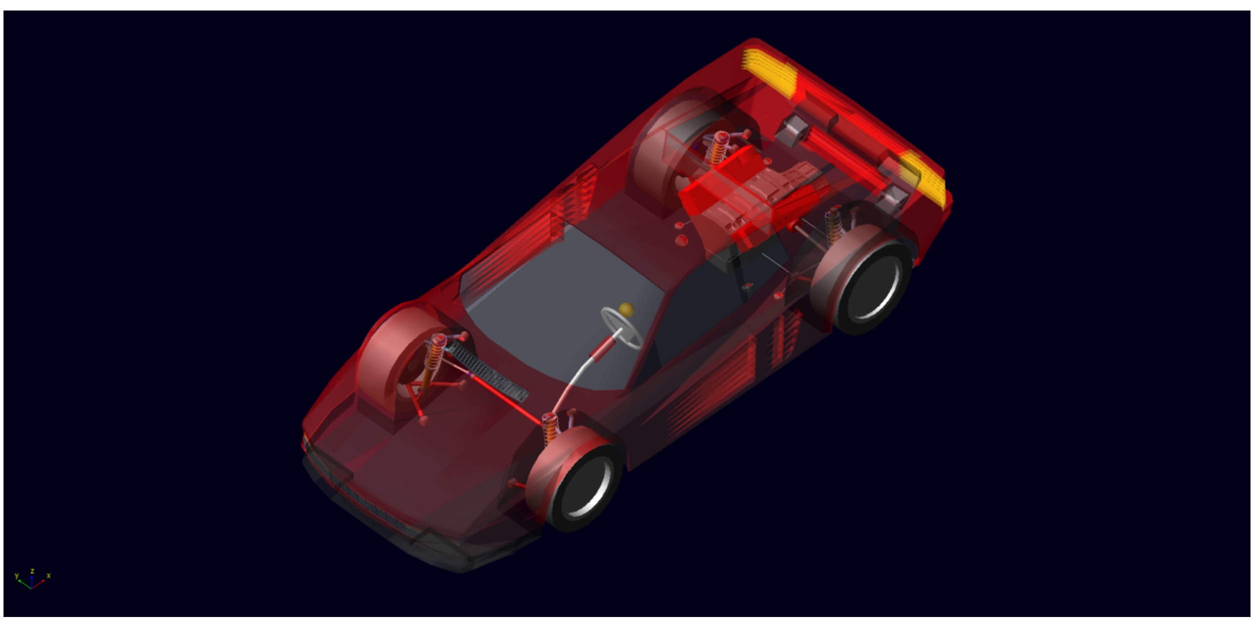
Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή

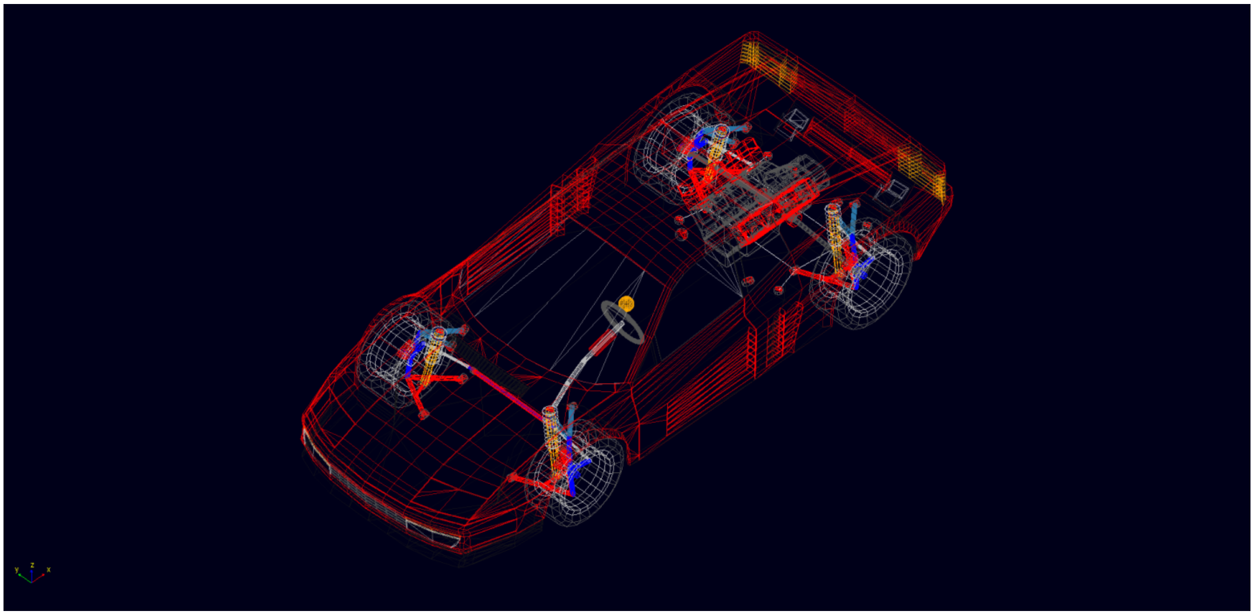
Η επίδραση των σχεδιαστικών παραμέτρων της ανάρτησης ενός αυτοκινήτου,παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην δυναμική συμπεριφορά του οχήματος,και άρα στην ασφάλεια των επιβατών.Στη συνέχεια,χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Adams Car,της Msc Software,πρόσβαση στο οποίο απέκτησα μέσω του εργαστηρίου οχημάτων και την βοήθεια του κυρίου Σπέντζα,αναλύω τις αλλαγές που παρατηρούνται στην συμπεριφορά του αυτοκινήτου,ανάλογα με τις επιλογές που συντελούνται στον σχεδιασμό της ανάρτησης.

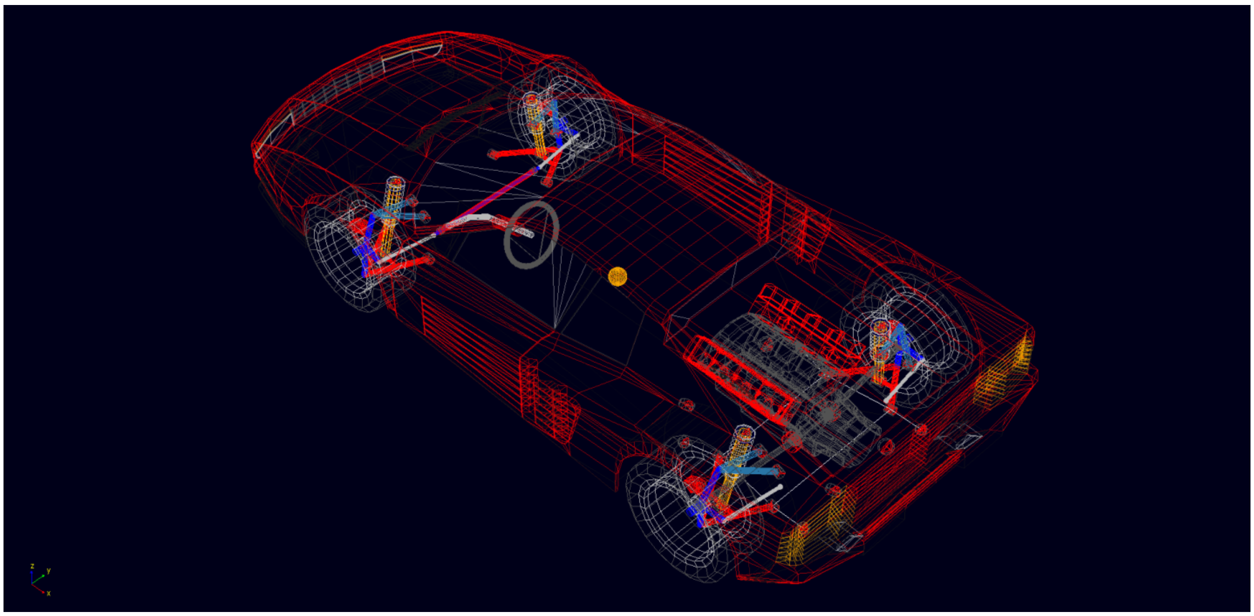
Συγκεκριμένα μελέτησα την επίδραση της γωνίας camber(γωνία κυρτώσεως),της γωνίας των ψαλιδιών της ανάρτησης,μεταξύ τους αλλά και ως προς το έδαφος,της σύγκλισης ή απόκλισης των τροχών και την αλλαγή που προκύπτει σε αυτήν κατά την κίνηση του οχήματος.

1.1 Παρουσίαση του μοντέλου

Το μοντέλο που χρησιμοποίησα,πρόκειται για ένα αυτοκίνητο,με την κίνηση στους πίσω τροχούς,τον κινητήρα τοποθετημένο ανάμεσα στους 2 άξονες και πίσω από την καμπίνα των επιβατών,και χρησιμοποιεί ανάρτηση τύπου διπλών ψαλιδιών τόσο εμπρός,όσο και πίσω.

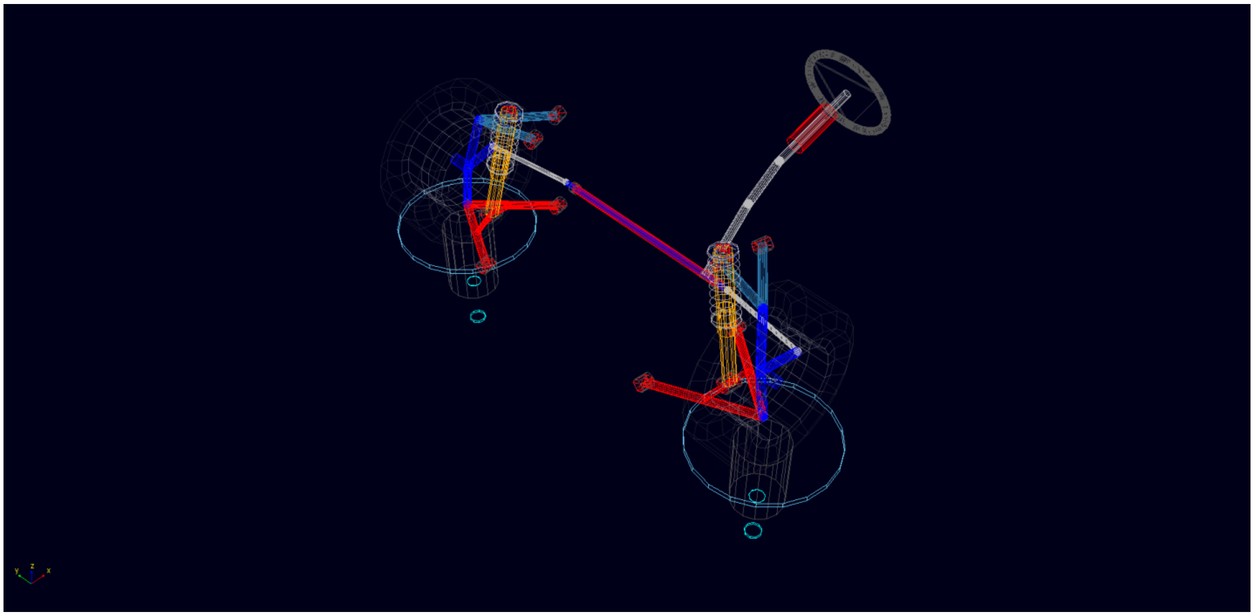






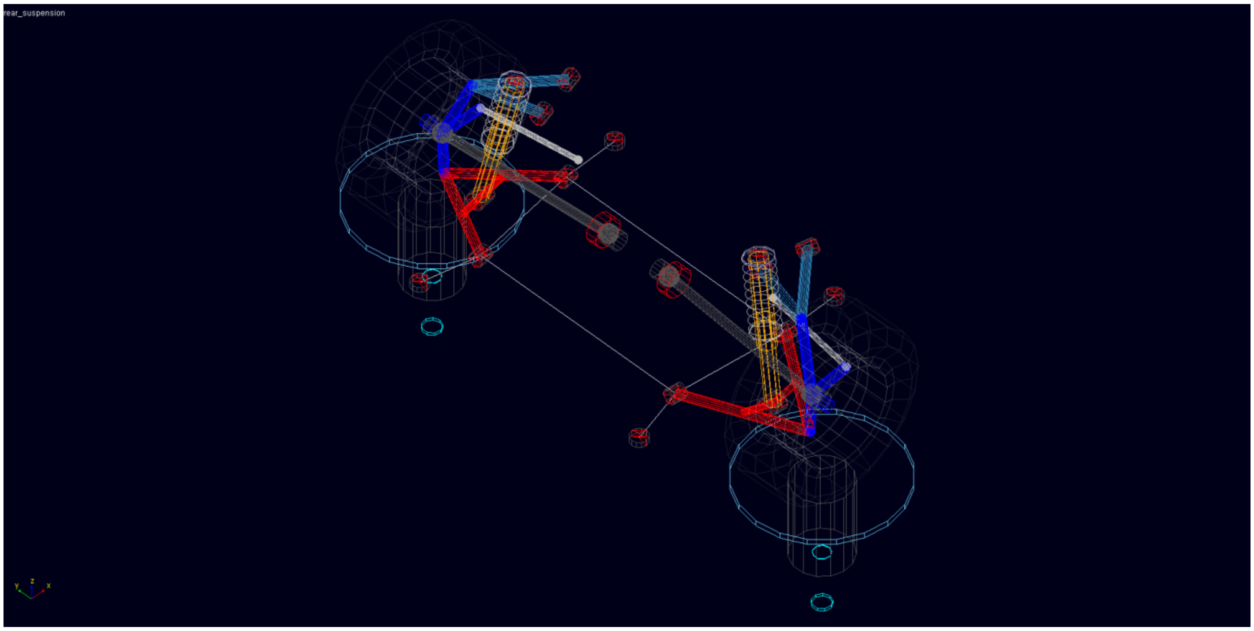
1.2 Εμπρός Ανάρτηση

Στην εμπρός ανάρτηση χρησιμοποιούνται διπλά ψαλίδια και την διαμόρφωση τους μπορούμε να δούμε στην επόμενη εικόνα.



1.3 Πίσω Ανάρτηση

Όμοια για την πίσω ανάρτηση έχουν χρησιμοποιηθεί διπλά ψαλίδια όπως φαίνεται και στην εικόνα.



Κεφάλαιο 2:Συμπεριφορά των ελαστικών

2.1 Εισαγωγή

Οι δυνάμεις που επιταχύνουν ή επιβραδύνουν το αυτοκίνητο στο οριζόντιο επίπεδο δημιουργούνται στα ελαστικά.Επιπρόσθετα τα ελαστικά είναι η κύρια πηγή των δυνάμεων και ροπών που ευθύνονται για τον έλεγχο και την σταθερότητα του αυτοκινήτου.Η κατανόηση της συμπεριφοράς τους λοιπόν,είναι βασική προϋπόθεση για την εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων,σχετικά με τις αλλαγές στην συμπεριφορά του αυτοκινήτου,λόγω των αλλαγών των σχεδιαστικών παραμέτρων της ανάρτησης.

Οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται στα ελαστικά επηρρεάζουν το αυτοκίνητο με διάφορους τρόπους.Προφανώς τα ελαστικά υποστηρίζουν το βάρος του αυτοκινήτου,αλλά και όλες τις άλλες κάθετες δυνάμεις που δημιουργούνται,όπως δυνάμεις αεροδυναμικής φύσης,ή δυνάμεις που προκύπτουν από την κλίση του οδοστρώματος.Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ελαστικού και του δρόμου παρέχουν τις ελκτικές δυνάμεις που είναι απαραίτητες για τους ελιγμούς του αυτοκινήτου.Επίσης στα ελαστικά δημιουργούνται οι ροπές διεύθυνσης,στις οποίες οφείλεται η τάση του συστήματος διεύθυνσης να επανέλθει στην ευθεία,καθώς και όλες οι σχετικές ροπές που νιώθει ο οδηγός να ασκούνται στο τιμόνι.

2.2 Το αποτύπωμα του ελαστικού και η πρόσφυση που παράγει

Η επιφάνεια του πέλματος του ελαστικού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος ονομάζεται ‘’αποτύπωμα’’.

Το ελαστικό δημιουργεί δυνάμεις που το κρατούν σε επαφή με το δρόμο εξαιτίας μηχανισμών που οφείλονται στην μοριακή δομή του,και οι οποίοι δεν είναι πλήρως κατανοητοί ακόμα και σήμερα.

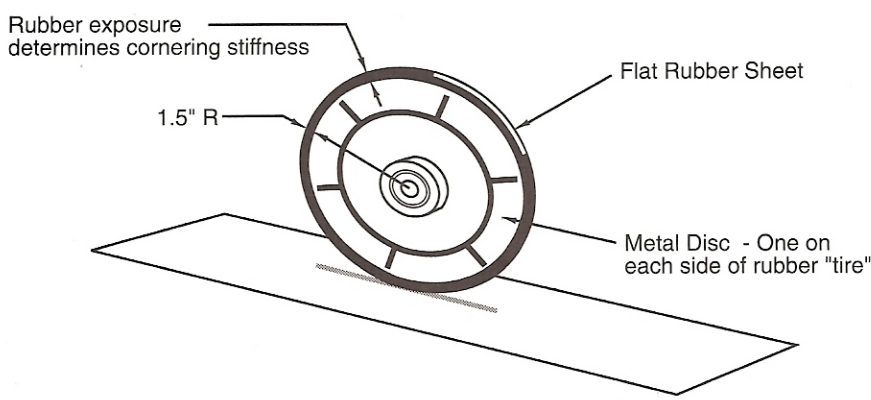
Όταν ο τοπικός συντελεστής πρόσφυσης του οδοστρώματος προσεγγιστεί,ένα τμήμα(ή και ολόκληρο)το πέλμα του αποτυπώματος,ολισθαίνει.Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται τότε,εξαρτώνται από την ταχύτητα της ολίσθησης,τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος,τα χαρακτηριστικά του πέλματος,και άλλα.Η διαδικασία της ολίσθησης επίσης δεν έχει κατανοηθεί πλήρως.

2.3 Η πλευρική δύναμη

Το αυτοκίνητο στρίβει εξαιτίας των πλευρικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στα ελαστικά.Στις επόμενες περιπτώσεις-παραδείγματα το ελαστικό θα θεωρηθεί κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο.Θα χρησιμοποιηθεί για καλύτερη κατανόηση,ένα μοντέλο ελαστικού,το οποίο εξομοιώνει την συμπεριφορά της κεντρικής λωρίδας του πέλματος του πραγματικού ελαστικού.

Το μοντέλο του ελαστικού

Το μοντέλο που περιγράφουμε εδώ χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την Chevrolet R&D σαν εργαλείο εκμάθησης για τους μηχανικούς,το 1960.Το μοντέλο αυτό κατασκευάζεται στριμόχνωντας ένα φύλλο σκληρού ελαστικού μεταξύ δύο μεταλλικών δίσκων.



Εικ.1

Πρώτο πείραμα-Στατική πλευρική ακαμψία και ολίσθηση

Αν το μοντέλο του ελαστικού πιεστεί ελαφρά σε μία επίπεδη επιφάνεια με μία σταθερή κάθετη δύναμη,είναι εύκολο να παρατηρηθεί,ότι όταν το ελαστικό πιεστέι πλευρικά με μία μικρή πλευρική δύναμη,το πέλμα του ελαστικού παραμορφώνεται ελαφρά,και ο τροχός μετακινείται κατά μία πολύ μικρή ποσότητα πλαγίως.Αν η δύναμη αυτή αυξηθεί,αυξάνεται λίγο και η παραμόρφωση του πέλματος.Αν η δύναμη αυξηθεί πολύ περισσότερο,το ελαστικό ξεκινά να ολισθαίνει πλευρικά πάνω στο επίπεδο.

Τι συνέβει;

Πρώτα το ελαστικό λειτούργησε σαν ελατήριο,τα πλευρικά τοιχώματα του ελαστικού παραμορφώθηκαν ελαστικά,και η πλευρική εκτροπή του πέλματος αυξήθηκε χοντρικά κατ'αναλογία με την αύξηση της πλευρικής δύναμης.Αφού το ελαστικό ξεκίνησε να ολισθαίνει,η πλευρική δύναμη έμμεινε περίπου σταθερή.

Αν χρησιμοποιούσαμε μοντέλο ελαστικού με μεταλλικούς δίσκους μικρότερης διαμέτρου,αλλά ίδια διάμετρο στο φύλλο του ελαστικού που συμπιέζεται ανάμεσά τους,το πείραμα θα είχε τα ίδια αποτελέσματα,αλλά η πλευρική παραμόρφωση για δεδομένη κάθετη δύναμη,θα ήταν μεγαλύτερη.Η στατική πλευρική ακαμψία του ελαστικού δίνεται σε κιλά ανά εκατοστό παραμόρφωσης.

Η δύναμη που απαιτείται για να ολισθήσει το ελαστικό είναι συνάρτηση του συντελεστή πρόσφυσης μ,που ορίζεται ως ο λόγος της πλευρικής δύναμης προς την κάθετη δύναμη που ασκείται στο ελαστικό.

Δεύτερο πείραμα-Κύλιση με μικρές γωνίες ολίσθησης.

Αν το πέλμα του μοντέλου του ελαστικού που χρησιμοποιούμε,παραμορφωθεί πλευρικά όπως είδαμε προηγουμένως,και στη συνέχεια αρχίσει να κυλίεται στο επίπεδο,κινείται σε κατεύθυνση που βρίσκεται σε γωνία με τη διεύθυνση που ορίζει το επίπεδο του τροχού.

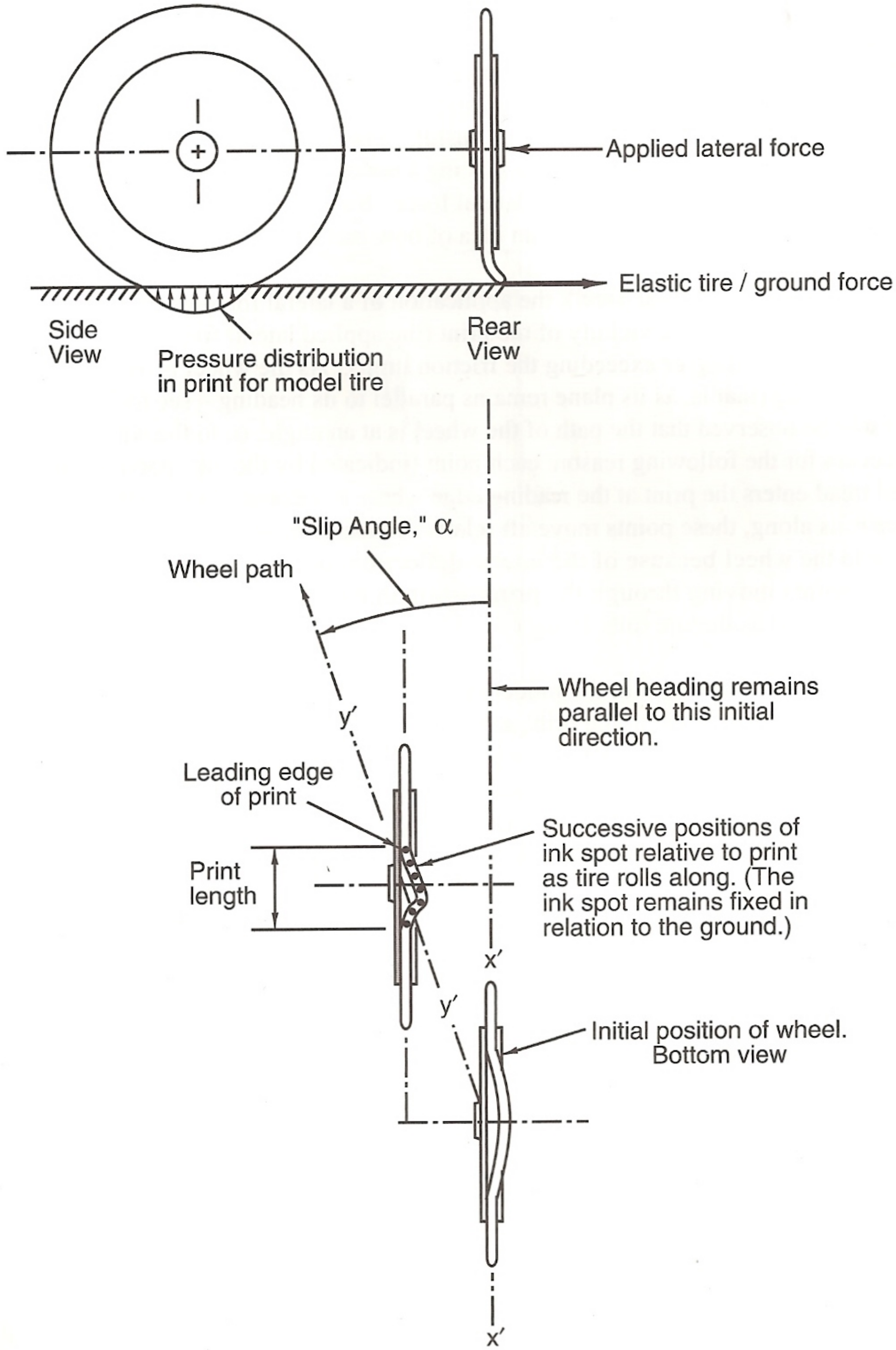
Αυτή η γωνία ονομάζεται γωνία ολίσθησης.

Η σχέση μεταξύ της γωνίας ολίσθησης και της πλευρικής δύναμης μπορεί να αναπαρασταθεί με το μοντέλο του ελαστικού,γεμίζοντας μελάνι την επιφάνεια του,και κυλίοντάς το,υπό σταθερή πλευρική δύναμη.Στη συνέχεια μελετώντας το αποτύπωμα που θα μείνει στο έδαφος,θα μπορέσουμε να κατανοήσουμε τον μηχανισμό με τον οποίο τα πραγματικά ελαστικά παράγουν πλευρική πρόσφυση.

Όπως είδαμε η εφαρμογή της πλευρικής δύναμης προκαλέι πλευρική παραμόρφωση του πέλματος στην περιοχή του αποτυπώματος του ελαστικού(η πλευρική δύναμη δεν πρέπει να ξεπερνά το όριο στο οποίο παρατηρείται ολίσθηση).Καθώς ο τροχός κυλίεται εμπρός με το επίπεδό του σε ευθεία διέυθυνση,παρατηρούμε πως το αποτύπωμα που αφήνει στο έδαφος και το οποίο ορίζει την τροχιά του,βρίσκεται σε γωνία α με την ευθεία διεύθυνση στην οποία κοιτάζει,και στην οποιά θα περιμέναμε θεωρητικά να κατευθύνεται.

Αυτό συμβαίνει για τον παρακάτω λόγο:κάθε σημείο του μη παραμορφωμένου πέλματος του ελαστικού,εισέρχεται στο αποτύπωμα του ελαστικού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος,και εκεί εφάπτεται στον δρόμο.Καθώς το ελαστικό κυλίεται,αυτά τα σημεία κινούνται προς τα πίσω σε σχέση με το αποτύπωμα,αλλά και πλευρικά σε σχέση με τον τροχό,εξαιτίας της παραμόρφωσης που υφίστανται λόγω της πλευρικής δύναμης.

Όσο ένα σημείο του ελαστικού κινείται προς τα πίσω σε σχέση με το αποτύπωμα,η πλευρική του μετάθεση μεγαλώνει,μέχρι να συναντήσει την τελευταία περιοχή επαφής του αποτυπώματος με έδαφος.Σε αυτή την περιοχή η τοπική κάθετη δύναμη μειώνεται,και η δύναμη λόγω πρόσφυσης δεν μπορεί πλέον να διατηρήσει την πλευρική παραμόρφωση του πέλματος.Σε αυτό το σημείο το πέλμα κινείται ραγδαία στην θέση που είχε πριν την παραμόρφωση,και στην συνέχεια εγκαταλείπει την επαφή με το οδόστρωμα.


Applied lateral force
Elastic tire / ground force
Side View
Pressure distribution in print for model tire
Rear View
"Slip Angle," α
Wheel path
Wheel heading remains parallel to this initial direction.
y′
Leading edge of print
Print length
Successive positions of ink spot relative to print as tire rolls along. (The ink spot remains fixed in relation to the ground.)
x′
y′
Initial position of wheel. Bottom view
x′

Εικ. 2

Υψηλές γωνίες ολίσθησης

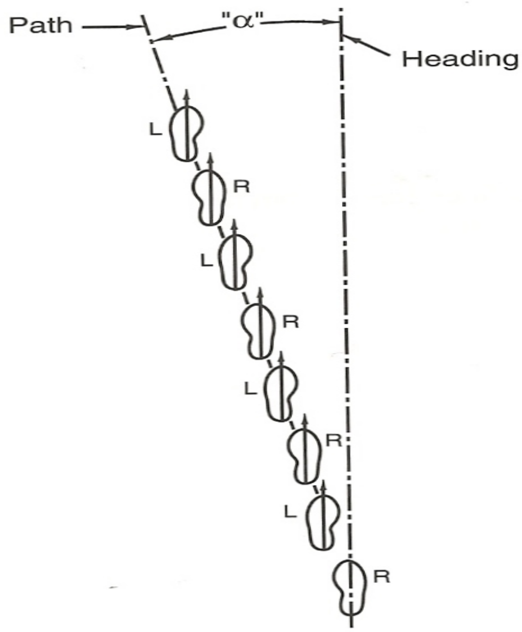
Αν η πλευρική δύναμη αυξηθεί,η γωνία ολίσθησης αυξάνεται,το πέλμα του ελαστικού θα παραμορφωθεί περισσότερο,και το τμήμα στο οποίο συνέβαινε η ταχέα επαναφορά-ολισθηση του πέλματος στην πρώτερη απαραμόρφωτη κατάσταση,κινείται προς τα μπροστά.Αυτή η διαδικασία είναι προοδευτική.Όταν το ελαστικό έχει τόση πλευρική δύναμη ασκούμενη σε αυτό,που το μεγαλύτερο μέρος του αποτυπώματός του βρίσκεται σε ολίσθηση,η πλευρική δύναμη καθορίζεται πια από τον συντελεστή πρόσφυσης.

Αποσαφήνιση της γωνίας ολίσθησης

Είναι σημαντικό να καταλάβουμε πως δεν υπάρχει ολίσθηση στο αποτύπωμα του ελαστικού,εκτός απο την περιοχή που το αποτύπωμα τελειώνει,και οι κάθετες δυνάμεις είναι χαμηλές.

Η ιδιότητα του ελαστικού να μετακινείται πλευρικά από το επίπεδο του τροχού χωρίς να ολισθαίνει,δίνει το αποτέλεσμα κάθε νέο αποτύπωμα να έχει μετακινηθεί και αυτό πλευρικά.

Είναι ισοδύναμο με το να περπατάμε προς μία δεδομένη κατεύθυνση,αλλά με μία μικρή γωνία προς αυτήν,υποχρεώνοντας σε κάθε βήμα μας τα πόδια μας να μετακινούνται ελαφρά πλευρικά πριν αγγίξουν το έδαφος.Το ελαστικό συμπεριφέρεται σαν να έχει άπειρο αριθμό από ‘’ποδια’’ στην περιφέρειά του.



Εικ.3

Μετά από την παραπάνω περιγραφή καταλαβαίνουμε πως η ονομασία ''γωνία ολίσθησης'' είναι εσφαλμένη,καθώς στην ελαστική περιοχή λειτουργίας του ελαστικού,ολίσθηση συμβαίνει σε μία πολύ μικρή περιοχή του αποτυπώματός του.Παρ'όλα αυτά έτσι έχει επικρατήσει να ονομάζεται.

2.4 Η σχέση της γωνίας ολίσθησης με την πλευρική δύναμη

Η πλευρική δύναμη μπορεί να θεωρηθεί σαν το αποτέλεσμα της γωνίας ολίσθησης,ή η γωνία ολίσθησης σαν το αποτέλεσμα την πλευρικής δύναμης.

Μερικά παραδείγματα:

- Αν οι εμπρός τροχοί ενός αυτοκινήτου στραφούν,δημιουργείται γωνία ολίσθησης η οποία δημιουργεί πλευρική δύναμη,και στη συνέχεια αυτή η δύναμη στρίβει το αυτοκίνητο.
- ΄Οταν ένας πλευρικός άνεμος χτυπήσει ένα αυτοκίνητο,η δύναμη του ανέμου πρέπει να εξισορροπηθεί από τις πλευρικές δυνάμεις των ελαστικών λόγω της αλλαγής των γωνιών ολίσθησης.
- Όταν το αυτοκίνητο στρίβει(φυγόκεντρος δύναμη),ή όταν το αυτοκίνητο κινείται σε οδόστρωμα με κλίση(συνιστώσα βαρυτικής δύναμης),η πλευρική αυτή δύναμη

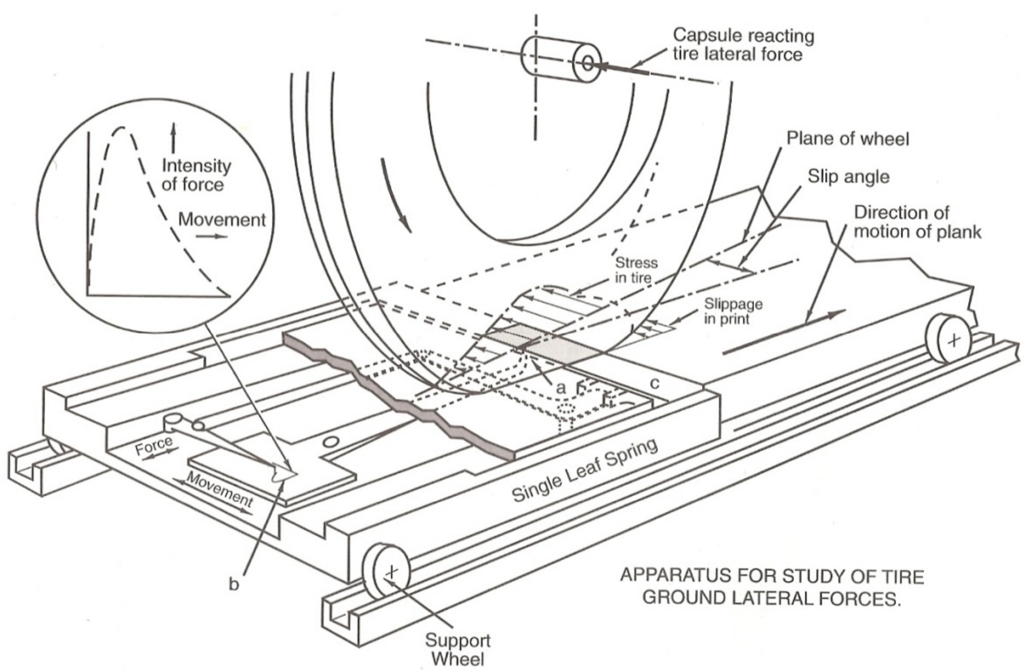
εξισορροπείται από αλλαγές στις γωνίες ολίσθησης των ελαστικών που οδηγούν σε πλευρικές δυνάμεις στα ελαστικά.

Η οπτική γωνία μας πρέπει κάθε φορά να προσαρμόζεται στην υπάρχουσα κατάσταση.

2.5 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα

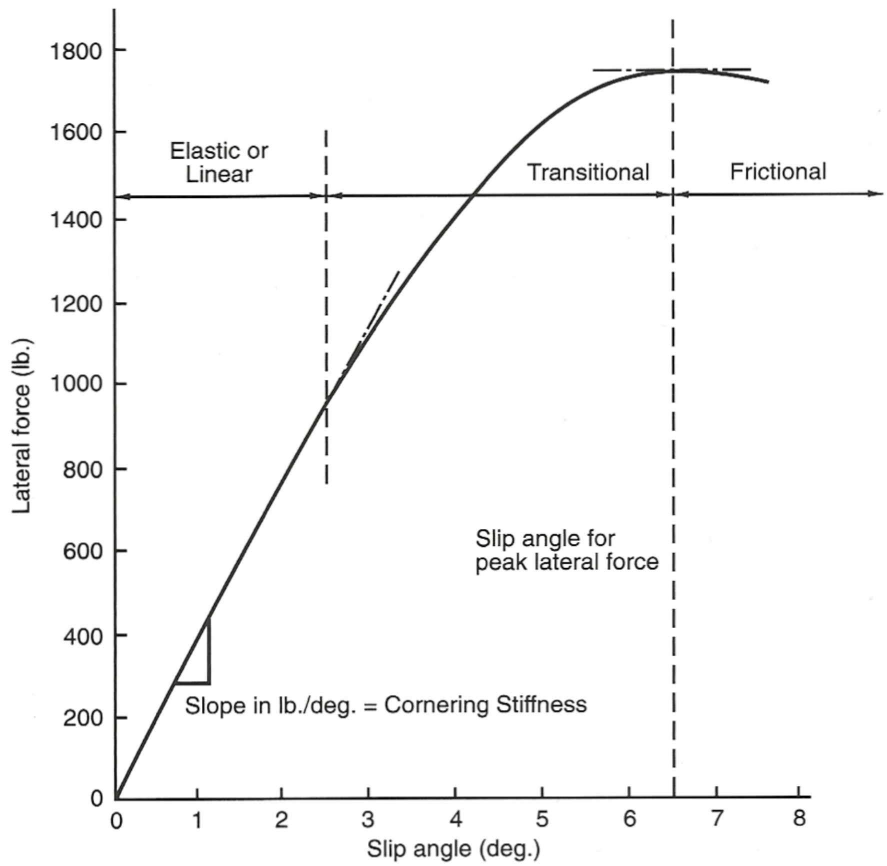
Μετρήσεις που έγιναν σε πραγματικά ελαστικά,επιβεβαίωσαν την συμπεριφορά του μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε.

Επίσης αποδείχτηκε πως το σημείο στο οποίο ασκείται η πλευρική δύναμη είναι πιο πίσω από το κέντρο του αποτυπώματος του ελαστικού.Η απόσταση αυτή ονομάζεται pneumatic trail.Η πλευρική δύναμη επί της απόστασης που ορίζει το pneumatic trail δημιουργέι την ροπή που τείνει να ευθυγραμμίσει το ελαστικό.Η παρακάτω φωτογραφία απεικονίζει την πρώτη μεγάλη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις σε ελαστικά.



Εικ.4

Στη συνέχεια βλέπουμε ένα διάγραμμα της πλευρικής επιτάχυνσης συναρτήσει της γωνίας ολίσθησης,ενός τυπικού ελαστικού επιδώσεων,σε στεγνό οδόστρωμα.



Εικ.5

Παρατηρούμε τις 3 περιοχές λειτουργίας του ελαστικού(ελαστική ή γραμμική,μεταβατική,επηρρεασμένη μόνο απ'τον συντελεστή τριβής).Ονομάζουμε cornering stiffness την κλίση της καμπύλης στην ελαστική περιοχή λειτουργίας.

Βλέπουμε πως η πλευρική δύναμη αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία ολίσθησης,και αφού περάσει την μεταβατική περιοχή,παραμένει για κάποιες μοίρες σταθερή στην μέγιστη τιμή,για να αρχίσει να μειώνεται στη συνέχεια.

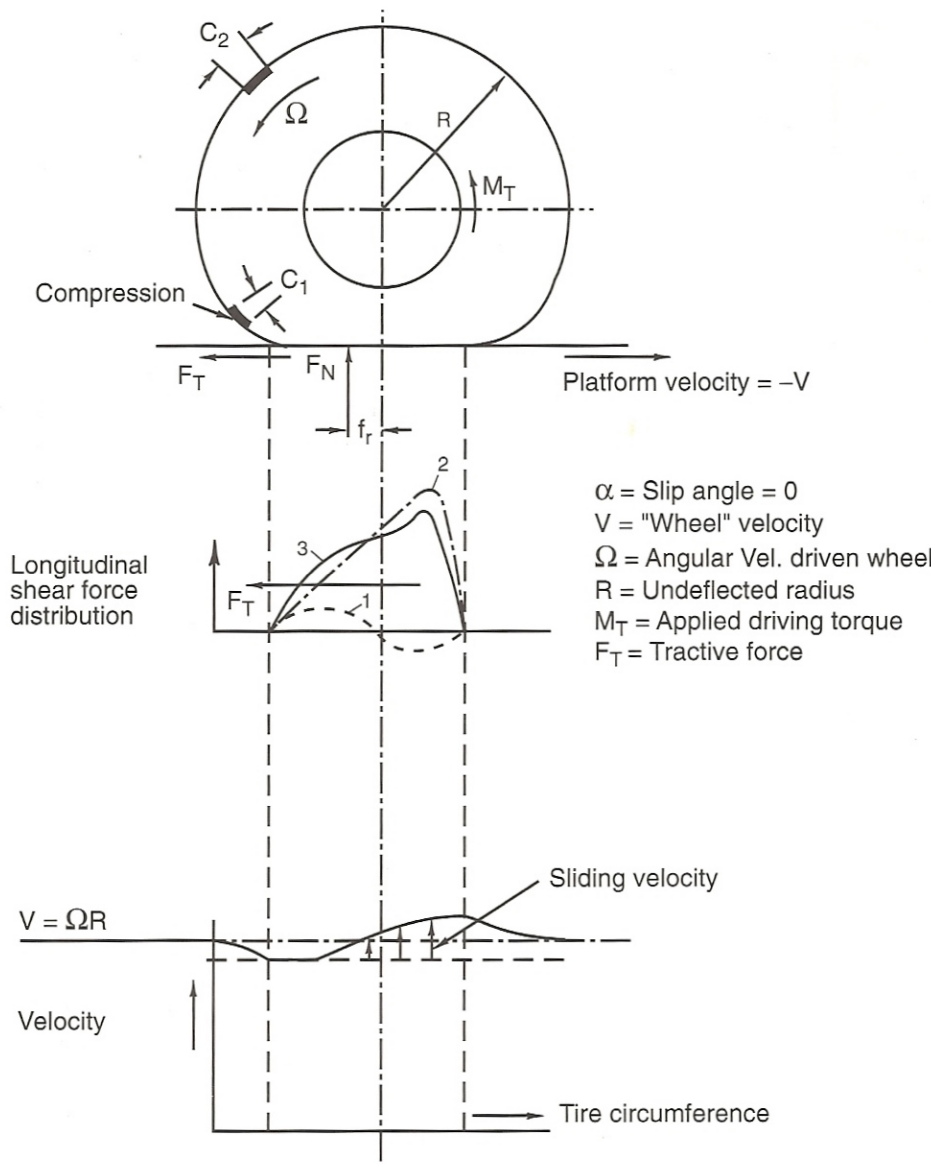
Σε συνθήκες στεγνού οδοστρώματος τα ελαστικά επιδώσεων,πλησιάζουν την μέγιστη δύναμη που μπορούν να παράγουν,για γωνίες ολίσθησης στην περιοχή των 3^o-7^o μοιρών.Σε βρεγμένο οδόστρωμα η μέγιστη πλευρική δύναμη θα ήταν σημαντικά μικρότερη,και η πτώση από εκεί και πέρα θα συνέβαινε πολύ πιο απότομα.

2.6 Διαμήκης δύναμη

Για να επιταγχυνθεί ή να επιβραδυνθεί ένα αυτοκίνητο,διαμήκης δυνάμεις πρέπει να αναπτυχθούν μεταξύ των ελαστικών και του εδάφους,στα αποτυπώματα των ελαστικών.Καμία αλλαγή στην ταχύτητα(επιτάχυνση)δεν μπορεί να συμβεί χωρίς να εφαρμοστεί μία δύναμη,η οποία να ενεργεί στη μάζα του αυτοκινήτου,σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

Ο μηχανισμός που οδηγεί στην ανάπτυξη διαμήκων δυνάμεων στα ελαστικά,έχει κάποια σχέση με αυτόν που ευθύνεται για τις πλευρικές δυνάμεις,αφού υπάρχει μία περιοχή στο αποτύπωμα όπου ενεργεί ελαστική παραμόρφωση,και μία περιοχή όπου υπάρχει ολίσθηση.

2.7 Διαμήκης δύναμη λόγω επιτάχυνσης



Εικ.6

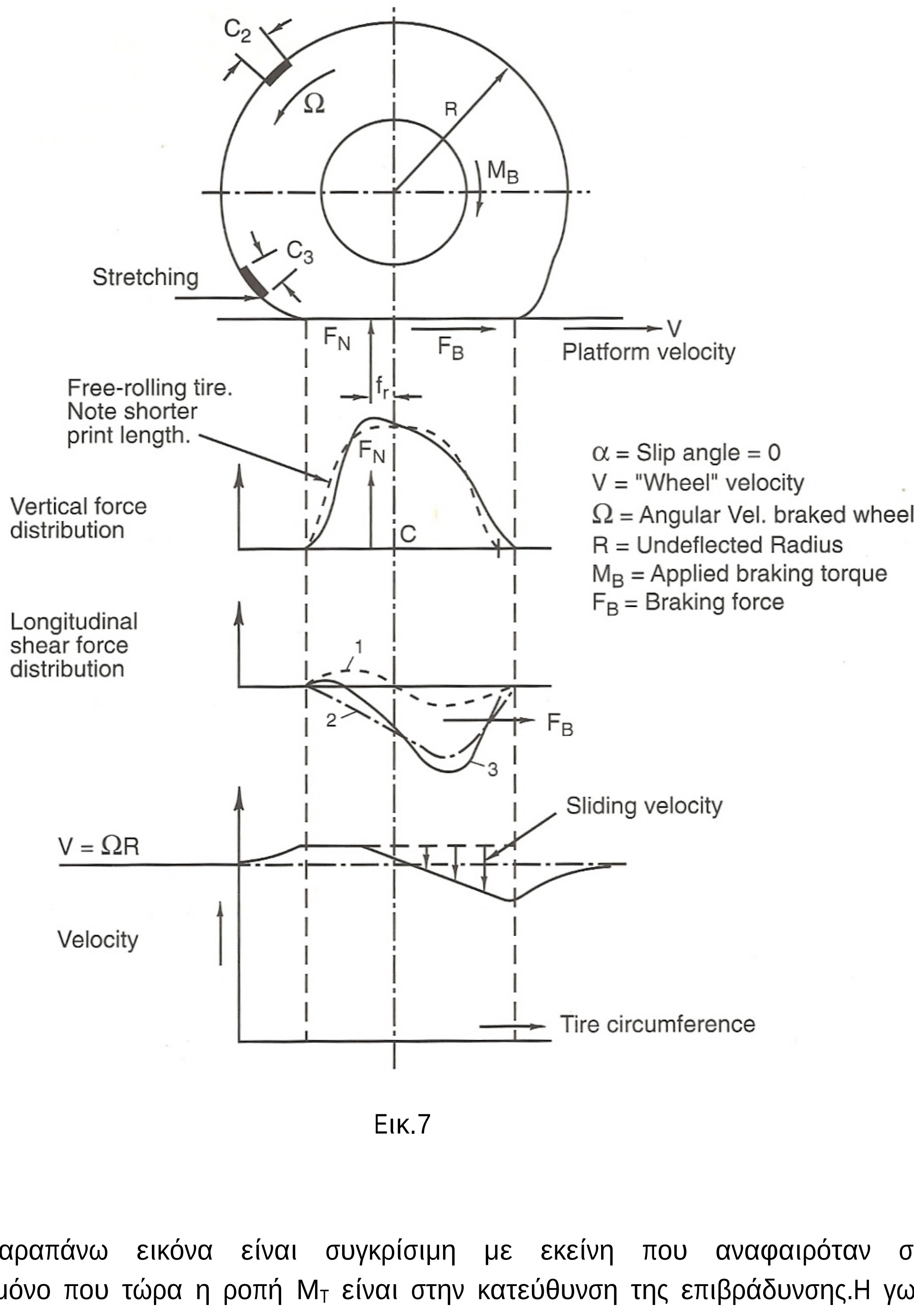
Στην παραπάνω εικόνα ο άξονας του τροχού είναι σταθερός και οριζόντιος,και η πλατφόρμα που αναπαριστά το οδόστρωμα κινείται σχετικά με τον τροχό.Αυτός ο τρόπος να προσομοιώσουμε την σχετική κίνηση μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος είναι συνηθισμένη για τεστ που γίνονται σε εσωτερικούς χώρους.Στην προκειμένη περίπτωση προσομοιώνουμε την κύληση του τροχού κάτω από την επίδραση της ροπής M_T που προέρχεται απ'τον κινητήρα.Όπως φαίνεται στην εικόνα η ροπή αυτή παράγει μία δύναμη F_T από τον δρόμο στο ελαστικό.Αυτή η δύναμη κινεί το αποτύπωμα μπροστά σε σχέση με τον άξονα του τροχού,συμπιέζοντας τα στοιχεία που αποτελούν το πέλμα και βρίσκονται πριν το αποτύπωμα,και παραμορφώνει το ελαστικό καθώς περιστρέφεται,σε όλη την περίμετρό του.Το συμπιεσμένο μήκος C1 μπορεί να συγκριθεί με το ασυμπίεστο C2.Τα συμπιεσμένα τμήματα του πέλματος,έρχονται σε επαφή με το οδόστρωμα,όταν εντάσσονται στο αποτύπωμα.Η διατμητική τάση έχει κατεύθυνση προς τα εμπρός,και τα στοιχεία που αποτελούν το πέλμα του ελαστικού συμπιέζονται επίσης προς τα εμπρός σε σχέση με τον σκελετό του ελαστικού.Όσο περισσότερα στοιχεία του πέλματος εντάσσονται στο αποτύπωμα και κινούνται προς τα πίσω,στην περιοχή όπου οι τοπικές κάθετες δυνάμεις μεγαλώνουν,η διατμητική τάση αυξάνεται γραμμικά όπως φαίνεται στην καμπύλη 2 του σχήματος.

Σε ένα ελεύθερα κυλιόμενο ελαστικό(χωρίς την επίδραση ροπής)πάλι υπάρχουν διατμητικές τάσεις στο αποτύπωμα.Αυτό συμβαίνει γιατί η ακτίνα του ελαστικού υποχρεώνεται να αλλάξει όταν τα στοιχεία του πέλματος εντάσσονται στο αποτύπωμα.Για μία σταθερή γωνιακή ταχύτητα,$Ω_0$,η γραμμική ταχύτητα στην περίμετρο του ελαστικού μειώνεται όσο η ακτίνα ελαττώνεται έχοντας σαν αποτέλεσμα μια διατμητική τάση με κατεύθυνση προς τα εμπρός.Αυτή η διατμητική τάση αλλάζει κατεύθυνση προς τα πίσω,στο τελευταίο μισό του αποτυπώματος,καθώς η ακτίνα επανέρχεται.

Η διανομή της διατμητικής τάσης επάνω στο αποτύπωμα παρουσιάζεται στην καμπύλη 1 του σχήματος.Το τελικό αποτέλεσμα είναι να τροποποιήσει την καμπύλη 2 προστιθέμενη σε αυτήν,και να δώσει τελικά την καμπύλη 3 σαν συνισταμένη.Βέβαια η ευθεία πρόσθεση των καμπυλών δεν είναι απόλυτα σωστή,και δίνει μόνο προσεγγιστικό αποτέλεσμα,γιατί υπάρχει ολίσθηση σε ένα μικρό τμήμα του αποτυπώματος.Έτσι κανονικά η διαμήκης διατμητική δύναμη μειώνεται στο πίσω τμήμα του αποτυπώματος,εκεί που το κάθετο φορτίο δεν είναι πολύ μεγάλο.Έτσι προκύπτει ολίσθηση μεταξύ του οδοστρώματος και των στοιχείων του πέλματος,καθώς τα συμπιεσμένα τμήματά του,αποσυμπιέζονται.

Η διαμήκης ταχύτητα στο αποτύπωμα σε σχέση με την ταχύτητα του μη συμπιεσμένου ελαστικού φένεται στο κάτω τμήμα της εικόνας.Βλέπουμε πως καθώς το πέλμα εισέρχεται στο αποτύπωμα αρχικά η ταχύτητα μειώνεται από την τιμή που είχε πριν συμπιεστεί,ενώ όταν τείνει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση στο τέλος του αποτυπώματος,η ολίσθηση αυξάνει απότομα την ταχύτητα,για να επανέλθει ξανά στην αρχική τιμή αφού αποσυμπιεστεί πλήρως.Η ολισθηση στο αποτύπωμα σημαίνει πως οι περιστροφές/km ενός ελαστικού στο οποίο ασκείται ροπή,είναι περισσότερες από ένα ελαστικό που κυλίεται ελεύθερα.

2.8 Διαμήκης δύναμη λόγω επιβράδυνσης



Εικ.7

Η παραπάνω εικόνα είναι συγκρίσιμη με εκείνη που αναφαιρόταν στην επιτάχυνση,μόνο που τώρα η ροπή M_T είναι στην κατεύθυνση της επιβράδυνσης.Η γωνία ολίσθησης είναι ξανά μηδέν.Η ροπή αυτή τη φορά προκαλεί την δύναμη F_B,από το οδόστρωμα στο ελαστικό,που τείνει να φρενάρει το αυτοκίνητο.

Η δύναμη αυτή μετακινεί το αποτύπωμα πίσω σε σχέση με τον άξονα, συμπιέζοντας τα στοιχεία που αποτελούν το πέλμα και βρίσκονται μετά την αρχή του αποτυπώματος.Η δύναμη αυτή επίσης τείνει να ‘’τεντώσει’’ τα στοιχεία του πέλματος που βρίσκονται πριν την αρχή του αποτυπώματος.Για μία κοινή δύναμη φρένου που εφαρμόζεται για να επιβραδύνει το όχημα,αυτά τα στοιχεία του πέλματος έρχονται σε επαφή με το οδόστρωμα όταν εντάσσονται στο αποτύπωμα.

Όσο αυξάνονται τα στοιχεία του πέλματος που εντάσσονται στο αποτύπωμα,αναγκάζονται να κινηθούν προς τα πίσω,κάτω από συνθήκες αυξανόμενου κάθετου φορτίου,και η διαμήκης διατμητική δύναμη αυξάνεται γραμμικά όπως φαίνεται στην καμπύλη 2.

Η διατμητική δύναμη σε ένα ελαστικό που κυλίεται ελεύθερα φαίνεται στην καμπύλη 1.Προσθέτοντας τις καμπύλες 1 και 2 παίρνουμε την καμπύλη 3 που είναι κατά προσέγγιση η συνολική διατμητική δύναμη.Όπως και πριν καθώς τα συμπιεσμένα τμήματα του αποτυπώματος πλησιάζουν στο τέλος του,αποσυμπιέζονται απότομα,και σε αυτή την περιοχή υπάρχει ολίσθηση.Η διαμήκης ταχύτητα πάλι παρουσιάζεται στο κάτω τμήμα της εικόνας.

2.9 Λόγος Ολίσθησης(Slip Ratio)

Ο ορισμός της διαμήκους ταχύτητας ολίσθησης,s,είναι η διαφορά μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας του τροχού στον οποίο ασκείται ροπή από τον κινητήρα(ή από τα φρένα),Ω,και της γωνιακής ταχύτητας του τροχού που κυλίεται ελεύθερα,$Ω_0$.

Δηλαδή $s=Ω-Ω_0$

Ο λόγος ολίσθησης ορίζεται ως : $SR = \frac{Ω-Ωo}{Ωo} = \frac{Ω}{Ωo} - 1$

Όμως η γωνιακή ταχύτητα του τροχού που κυλίεται ελεύθερα μπορεί να εκφραστεί ως εξής: $Ω_o=V/R_e$,όπου R_e είναι η ενεργή ακτίνα του ελεύθερα κυλιόμενου ελαστικού,που μπορεί να υπολογιστεί από τις περιστροφές ανά χιλιόμετρο.

Έτσι ο λόγος ολίσθησης ορίζεται ως : $SR = \frac{Ω Re}{V} - 1$

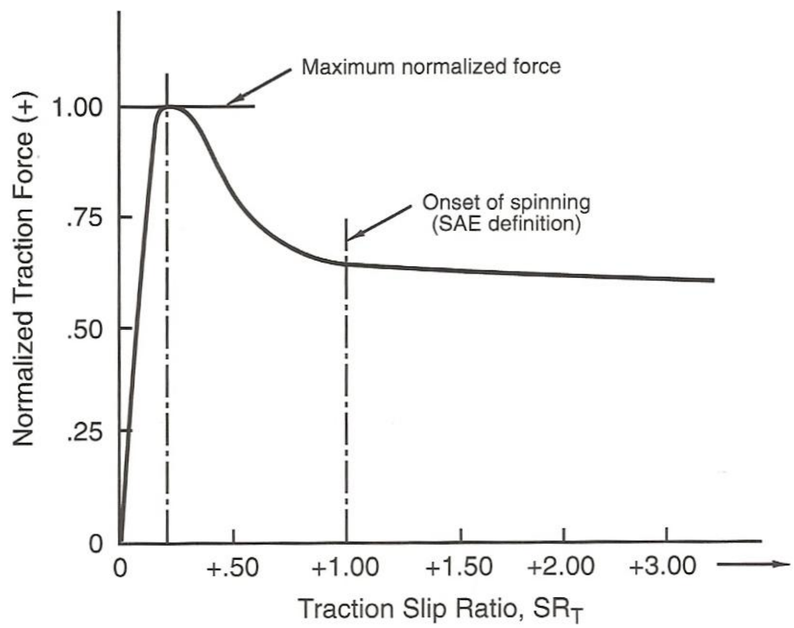
Για ελεύθερη κύλιση $ΩR_e/V=1$ και το SR=0.

Για τροχούς που έχουν μπλοκάρει κατά το φρενάρισμα $ΩR_e/V=0$ και το SR=-1

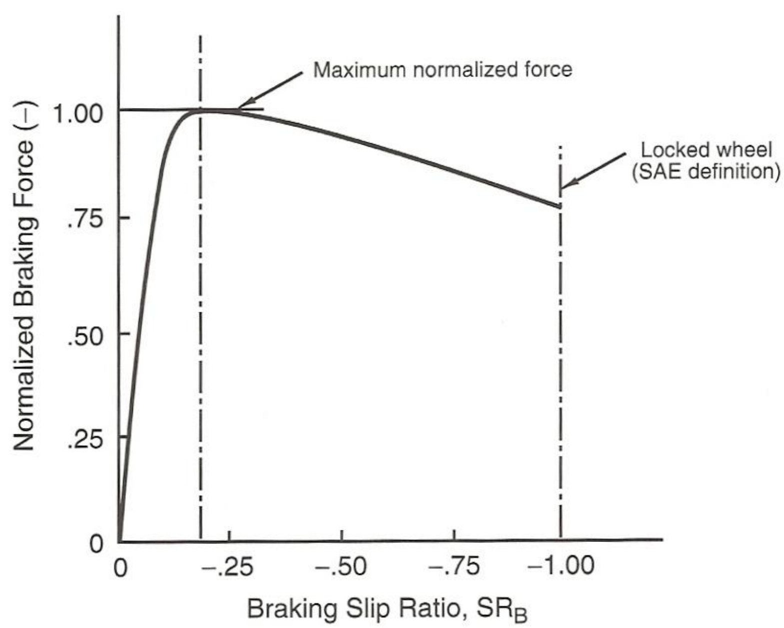
Αν ο τροχός περιστρέφεται ολισθαίνοντας ορίζουμε το SR=+1 και το $ΩR_e/V=+2$,που σημαίνει πως η περιφερειακή ταχύτητα είναι διπλάσια από αυτήν ενός ελεύθερα κυλιόμενου τροχού.Ο ορισμός αυτός τις περιστροφής με ολίσθησης είναι αυθαίρετος.Έχουμε ήδη δει πως η εκδήλωση της ολίσθησης ξεκινά πολύ νωρίτερα.

Η διαμήκης δύναμη λόγω επιτάχυνσης F_t και εκείνη λόγω επιβράδυνσης F_B είναι σε συνάρτηση με τον λόγο ολίσθησης.Όσο ο λόγος ολίσθησης αυξάνεται αριθμητικά από το μηδέν,οι δυνάμεις αυξάνονται αλματωδώς μέχρι ένα μέγιστο,που συνήθως συμβαίνει για τιμές του λόγου ολίσθησης μεταξύ 0,10 και 0,15.Απο εκεί και έπειτα οι δυνάμεις μειώνονται.Μέχρι το μέγιστο οι δυνάμεις εξαρτώνται έντονα από τις ελαστικές ιδιότητες του πέλματος του ελαστικού.Από το μέγιστο και μετά οι δυνάμεις πλέον εξαρτώνται από ένα σύνολο παραγώντων όπως η σύσταση του πέλματος,η υφύ του οδοστρώματος,η υγρασία της επιφάνειάς του,η θερμοκρασία των ελαστικών,κ.α.

Στα επόμενα 2 διαγράμματα βλέπουμε τυπικές καμπύλες διαμήκους δύναμης συναρτήση του λόγου ολίσθησης.Το πρώτο αναφέρεται σε επιτάχυνση ενώ το δεύτερο σε επιβράδυνση.



Typical traction—slip ratio curve; slip angle = 0°.



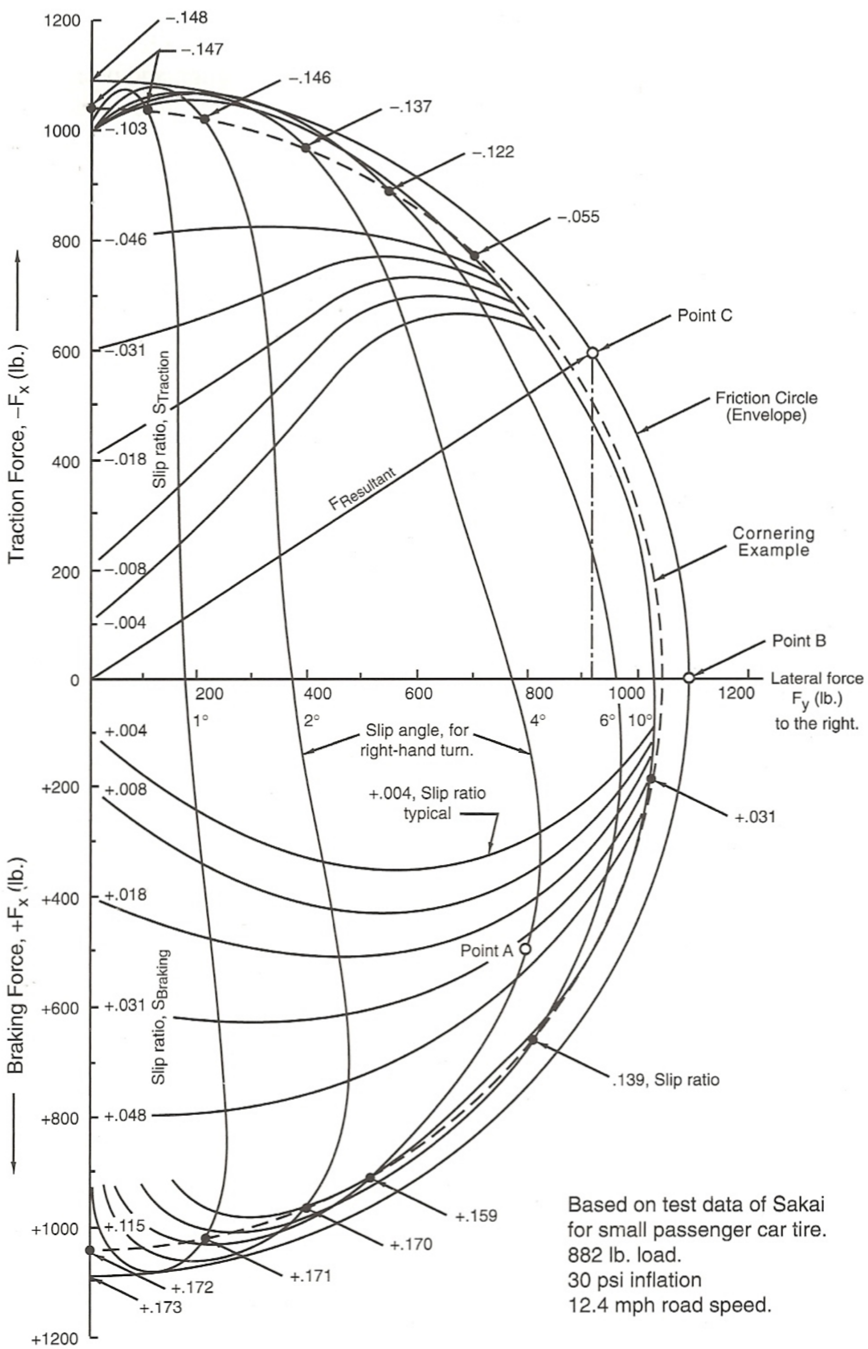
Typical braking—slip ratio curve; slip angle = 0°.

Εικ.8

Για την περίπτωση της επιτάχυνσης παρατηρούμε την ραγδαία πτώση της δύναμης μετά την εμφάνιση ολίσθησης.Αντίστοιχα στην περίπτωση της επιβράδυνσης βλέπουμε την απότομη πτώση της δύναμης από το σημείο που εμφανίζεται το μπλοκάρισμα του τροχού.

Είναι φανερό πως όταν ένα ελαστικό ξεπεράσει τον λόγο ολίσθησης που δίνει την μέγιστη διαμήκη δύναμη,η συμπεριφορά του παρουσιάζει αστάθεια,και είτε τείνει να ολισθήσει(επιτάχυνση),είτε να μπλοκάρει(επιβράδυνση).

2.10 Κύκλος και έλλειψη πρόσφυσης



Εικ.9

Στα προηγούμενα διαγράμματα είδαμε να παρουσιάζεται η πλευρική δύναμη συναρτήση της γωνίας ολίσθησης και η διαμήκης δύναμη συναρτήση του λόγου ολίσθησης.Τώρα θα μελετήσουμε ένα διάγραμμα που συνδυάζει της πλευρικές με τις διαμήκεις δυνάμεις.Αυτό το διάγραμμα αποτελείται από τις αποκαλούμενες ελλείψεις πρόσφυσης,και από τον κύκλο πρόσφυσης.

Ο κύκλος πρόσφυσης αντιπροσωπεύει το όριο μέχρι το οποίο μπορεί να παράγει δύναμη ένα ελαστικό,για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας(φορτίο,επιφάνεια,θερμοκρασία,κ.α.).Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζει την διαμήκη δύναμη συναρτήση της πλευρικής δύναμης για μία σειρά από λόγους ολίσθησης και γωνίες ολίσθησης.Μόνο το δεξί μισό του κύκλου παρουσιάζεται,όμοια είναι και για το αριστερό μισό.

Γενική περιγραφή του διαγράμματος

Στην αρχή των αξόνων το ελαστικό κυλίεται ελεύθερα σε ευθεία γραμμή,χωρίς καμία διαμήκη δύναμη(εκτός από μία μικρή αντίσταση στην κύλιση).Η γωνία ολίσθησης και ο λόγος ολίσθησης είναι μηδέν.Κινούμενοι στα δεξιά του οριζοντίου άξονα η πλευρική δύναμη αυξάνεται και οι αντίστοιχες γωνίες ολίσθησης σημειώνονται.Η συμβατική καμπύλη πλευρικής δύναμης-γωνίας ολίσθησης θα μπορούσε να ληφθεί από τον οριζόντιο άξονα.

Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την διαμήκη δύναμη,και διάφορες γωνίες ολίσθησης σημειώνονται στην κλίμακά του.Παρατηρούμε πως οι θετικές τιμές του άξονα είναι προς τα κάτω(επιβράδυνση),ενώ οι αρνητικές προς τα πάνω(επιτάχυνση).Ο άξονας αυτός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της συμβατικής καμπύλης διαμήκους δύναμης-λόγου ολίσθησης.

Το πιο ενδιαφέρον τμήμα του διαγράμματος είναι εκτός των αξόνων,εκεί που συνδυάζονται οι διαμήκης δυνάμεις της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης με την πλευρική δύναμη.Παραδείγματος χάρη το σημείο ‘’Α’’ στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει την δύναμη που παράγεται στο ελαστικό όταν βρίσκεται υπό γωνία ολίσθησης 4^o και ταυτόχρονα υπό λόγο ολίσθησης περίπου +0,036.Βλέπουμε στους 2 άξονες πως εκείνη τη στιγμή παράγεται στο ελαστικό 800lb πλευρικής δύναμης και ταυτόχρονα 500lb. διαμήκης δύναμη(επιβράδυνση-φρενάρισμα).

Γενικά,ο κύκλος πρόσφυσης είναι μια πολύ κοντινή προσέγγιση του ορίου του διαγράμματος-αντιπροσωπεύει την μέγιστη δύναμη που το ελαστικό μπορεί να παράγει κάτω από αύτες τις συνθήκες λειτουργίας.Για κάποια ελαστικά τα όρια του διαγράμματος δεν πλησιάζουν την μορφή του κύκλου αλλά αυτήν μίας έλλειψης.

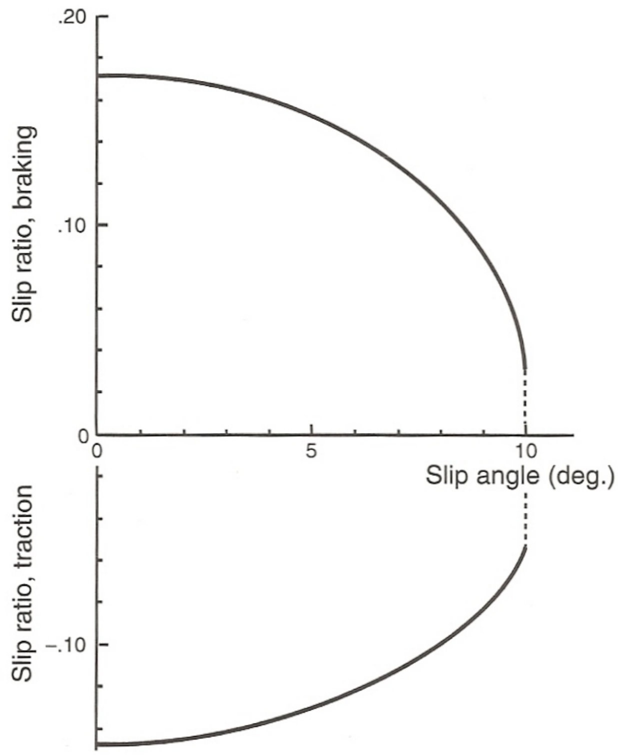
Στους αγώνες αυτοκινήτων το ελαστικό λειτουργεί στα όρια του κύκλου πρόσφυσης ή πολύ κοντά σε αυτά.Στο σημείο ‘’B’’ του διαγράμματος για παράδειγμα,το ελαστικό παράγει μόνο πλευρική δύναμη(1100 lb.)στην ιδανική του γωνία ολίσθησης(13^o γωνίας ολίσθησης δίνουν την μέγιστη πλευρική δύναμη σε αυτή την περίπτωση).Αυτή είναι κ η μέγιστη πλευρική δύναμη που μπορεί να παράγει το συγκεκριμένο ελαστικό.Αν εφαρμοστούν για επιτάχυνση 600 lb διαμήκους δύναμης,η διαθέσιμη πλευρική δύναμη μειώνεται στις 920 lb. στο σημείο ‘’C’’.Η συνισταμένη δύναμη,το διανυσματικό άθροισμα της πλευρικής και της διαμήκους δύναμης παραμένει 1100 lb. όπως φαίνεται από το διάνυσμα $F_{Resultant}$.Το το δεξί τρίγωνο που σχηματίζεται από τις συνιστώσες του $F_{Resultant}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το μήκος(δύναμη) από την αρχή τον αξόνων μέχρι το σημειο ‘’C’’,μεσω του πυθαγόρειου θεωρήματος.

$$\text{FResultant} = Fx^2 + Fy^2$$

$$\text{FResultant} = \sqrt{600^2 + 920^2}$$

$$\text{FResultant} = 1100 \text{ lb.}$$

Στη συνέχεια για καλύτερη κατανόηση του κύκλου πρόσφυσης παρουσιάζουμε ένα απλοποιημένο παράδειγμα,που περιγράφει την διαδικασία που ακολουθεί ένας οδηγός αγώνων για να αντιμετωπίσει μία στροφή.Εξετάζουμε μόνο ένα ελαστικό του αυτοκινήτου και θεωρούμε πως δεν συμβαίνει μεταφορά βάρους κατά την διάρκεια της στροφής,και πως το φορτίο στο ελαστικό είναι μόνιμα 882 lb.



Εικ.10

Είδαμε πως το όριο για το συγκεκριμένο ελαστικό είναι 1000 lb. συνισταμένης δύναμης.Επιλέγουμε να εκτελέσουμε την στροφή με το 95% της δύναμης αυτής(1045 lb.)Αυτό φαίνεται στο προηγούμενο διάγραμμα με την διακεκκομένη γραμμή που ονομάζεται ‘’cornering example’’.

Πριν την είσοδο της στροφής το ελαστικό επιβραδύνεται σε ευθεία γραμμή με δύναμη 1045 lb. η οποία μεταφράζεται σε λόγο ολίσθησης ίσο με +0,172.Όσο το ελαστικό του αυτοκινήτου ξεκινά να στρίβει,αρχίζει να αναπτύσσεται πλευρική δύναμη,ενώ η διαμήκης δύναμη από το φρενάρισμα πρέπει να αρχίσει να μειώνεται αντίστοιχα,ώστε να διατηρηθεί η μέγιστη συνισταμένη δύναμη των 1045 lb.Την στιγμή που έχουν αναπτυχθεί 4^o γωνίας ολίσθησης,ο λόγος ολίσθησης έχει μειωθεί και είναι ίσος με +0,159-το φρενάρισμα από τον οδηγό πρέπει να μειωθεί όσο αυξάνει την γωνία στο τιμόνι.Στην κορυφή της στροφής,το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στον οριζόντιο άξονα και ο λόγος ολίσθησης έχει μηδενιστεί.

Όσο ο οδηγός επιταχύνει στην έξοδο της στροφής,ο λόγος ολίσθησης παίρνει αρνητικές τιμές,και η γωνία ολίσθησης πρέπει να μειωθεί αντίστοιχα.Την στιγμή που η γωνία ολίσθησης φτάσει τις 6^o ο λόγος ολίσθησης είναι -0,122.Στο τέλος της εξόδου της στροφής το ελαστικό του αυτοκινήτου μπορεί να επιταχυνθεί με ένα λόγο ολίσθησης ίσο με -0,147 χωρίς να υπάρχει καμία πλευρική δύναμη.Καθ'όλη την διάρκεια του παραδείγματος η συνισταμένη δύναμη ήταν σταθερή στις 1045 lb. και το μόνο που άλλαξε ήταν η φορά του διανύσματός της.

Στο προηγούμενο διάγραμμα φαίνεται ο έλεγχος που πρέπει να παρέχει ο οδηγός κατά την διάρκεια της στροφής του παραδέιγματος.Σε αυτό το διάγραμμα,η είσοδος της στροφής ξεκινά στο ψηλότερο σημείο της καμπύλης,με τον οδηγό να φρενάρει σε ευθεία γραμμή με τέτοιο ρυθμό ώστε ο λόγος ολίσθησης στο ελαστικό να είναι +0,172.Όσο ξεκινάει να στρίβει το τιμόνι για να εισέλθει στην στροφή,ο οδηγός πρέπει να χειρίζεται τα φρένα και το τιμόνι κατάλληλα για να παραμείνει πάνω στην καμπύλη.Είναι χρήσιμο να έχουμε κατά νου πως ο λόγος ολίσθησης όπως και η γωνία ολίσθησης εξαρτάται τόσο από την ροπή που ασκούν τα φρένα(ή το γκάζι αντίστοιχα),όσο και από την γωνία του τιμονιού-και τα δύο αυτά συστήματα ελέγχου πρέπει να συνδυαστούν κατάλληλα για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.Στην κορυφή της στροφής τα δεδομένα που έχουμε δεν είναι αρκετά ξεκάθαρα για να δούμε την μέγιστη πλευρική δύναμη στην ιδανική για την περίπτωση γωνία ολίσθησης.Πιθανότατα ο οδηγός μας κράτησε σταθερό το τιμόνι και το γκάζι για κάποια μέτρα,πριν αρχίσει να επιταχύνει ξανά στην έξοδο της στροφής.

Κεφάλαιο 3:Γεωμετρία αναρτήσεων και η επιρροή της στην οδική συμπεριφορά

3.1 Γωνία camber

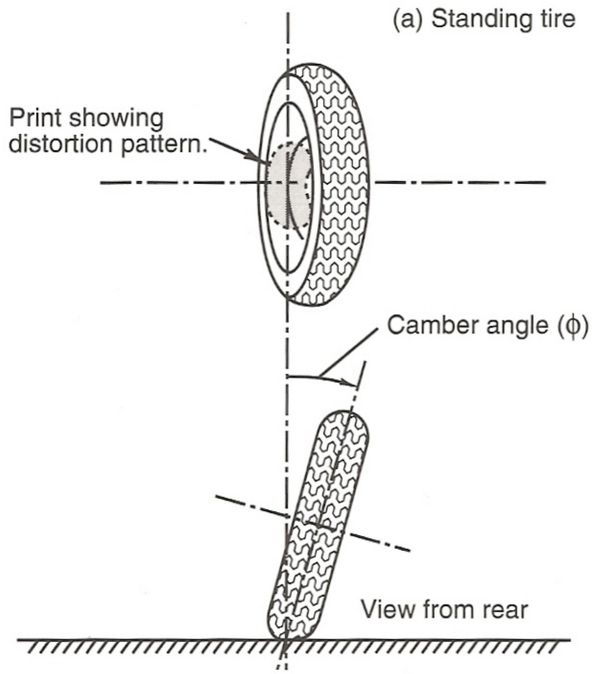
Η γωνία camber,γ,ορίζεται σαν την γωνία μεταξύ του κεκλιμένου επιπέδου του τροχού και του κάθετου επιπέδου.Η γωνία camber είναι θετική αν ο τροχός κλίνει προς τα έξω σε σχέση με το αυτοκίνητο,ή αρνητική εάν κλίνει προς τα μέσα.Τα αποτελέσματα της γωνίας αυτής στις δυνάμεις και τις ροπές που δημιουργούνται στο ελαστικό εξαρτώνται από τη γωνία του ελαστικού ως προς το κάθετο στο οδόστρωμα επίπεδο.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν δεδομένα από διάφορες πηγές που αναφέρονται σε συνθήκες λειτουργίας που αναφέρονται στον εμπρός εξωτερικό,τροχό κατά την διάρκεια μίας δεξιάς στροφής.

3.2 Δύναμη εξαιτίας της γωνίας camber

Γενικά,ένα ελαστικό το οποίο βρίσκεται σε κλίση ως προς το κάθετο στο οδόστρωμα επίπεδο,παράγει μία πλευρική δύναμη στην κατεύθυνση της κλίσης.Όταν αυτή ή δύναμη προκύπτει για μηδενική γωνία ολίσθησης ονομάζεται camber thrust.Μία συνιστώσα πλευρικής δύναμης εξαιτίας της γωνίας camber μπορεί να προκύψει και σε μη μηδενικές τιμές γωνίας ολίσθησης.

Η δύναμη εξαιτίας της γωνίας camber είναι μία συνάρτηση πολλών παραγώντων.Ρόλο παίζουν ο τύπος του ελαστικού,η κατασκευή του,το πέλμα του,η πίεσή του,το φορτίο που του ασκείται,η γωνία camber και η γωνία ολίσθησης.Μετά από πειραματικές παρατηρήσεις σε bias-ply ελαστικά στενού πλάτους,κοιτάζοντας την συμπεριφορά του αποτυπώματος του ελαστικού κάτω από μία γυάλινη πλάκα,αποδείχτηκε πως η camber thrust οφείλεται σε μία πλευρική παραμόρφωση που συμβαίνει στο αποτύπωμα.



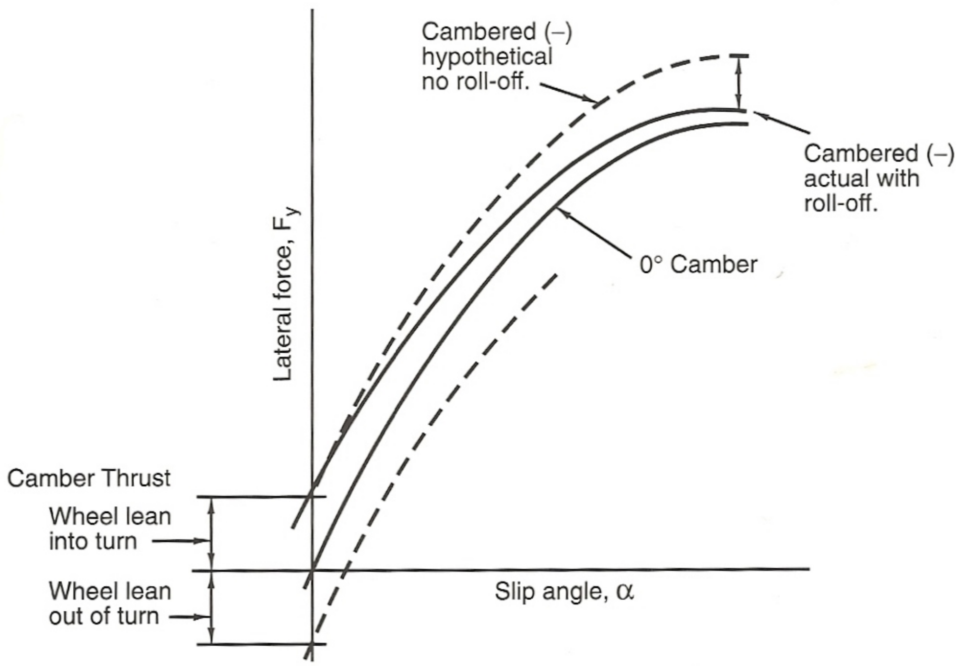
Εικ.11

Όταν ένα ακίνητο ελαστικό πιεστέι στο οδόστρωμα ενώ έχει μία γωνία camber,το κεντρικό τμήμα του αποτυπώματός του παραμορφώνεται.Όταν στη συνέχεια το ελαστικό κυληθεί σε μηδενική γωνία ολίσθησης,τα τμήματα του ελαστικού που ξεκινούν να εισέλθουν στην περιοχή του αποτυπώματος,περιορίζονται από το οδόστρωμα να κινηθούν σε ευθεία κατεύθυνση προς τα πίσω.Έτσι το οδόστρωμα ασκεί δυνάμεις στο ελαστικό,οι οποίες έχουν την τάση να αφαιρέσουν την παραμόρφωση που συμβαίνει στο αποτύπωμα του στατικού ελαστικού.Η συνισταμένη όλων αυτών των δυνάμεων ονομάζεται camber thrust.

Είναι δυνατό να συγκρίνουμε την πλευρική δύναμη που παράγεται λόγω της γωνίας camber με αυτήν που παράγεται λόγω της γωνίας ολίσθησης.Εξαιτίας της μορφής και του μεγέθους της παραμόρφωσης του αποτυπώματος,η πλευρική δύναμη που παράγεται στην γραμμική περιοχή λειτουργίας του ελαστικού(μικρές γωνίες ολίσθησης)για κάθε μία μοίρα γωνίας ολίσθησης,είναι μεγαλύτερη από αυτήν που παράγεται εξαιτίας μίας μοίρας γωνίας camber.

Σε ελαστικά τύπου radial,ο τρόπος κατασκευής τους αναστέλλει το είδος της παραμόρφωσης του αποτυπώματος που παράγει την camber thrust.Παρ’όλα αυτά ακόμα και σε ελαστικά τέτοιου τύπου,και μάλιστα μεγάλου πλάτους πέλματος,παράγονται δυνάμεις εξαιτίας της γωνίας camber.Ο μηχανισμός όμως δεν έχει κατανοηθεί πλήρως.

3.3 Γωνία camber και μέγιστη πλευρική δύναμη



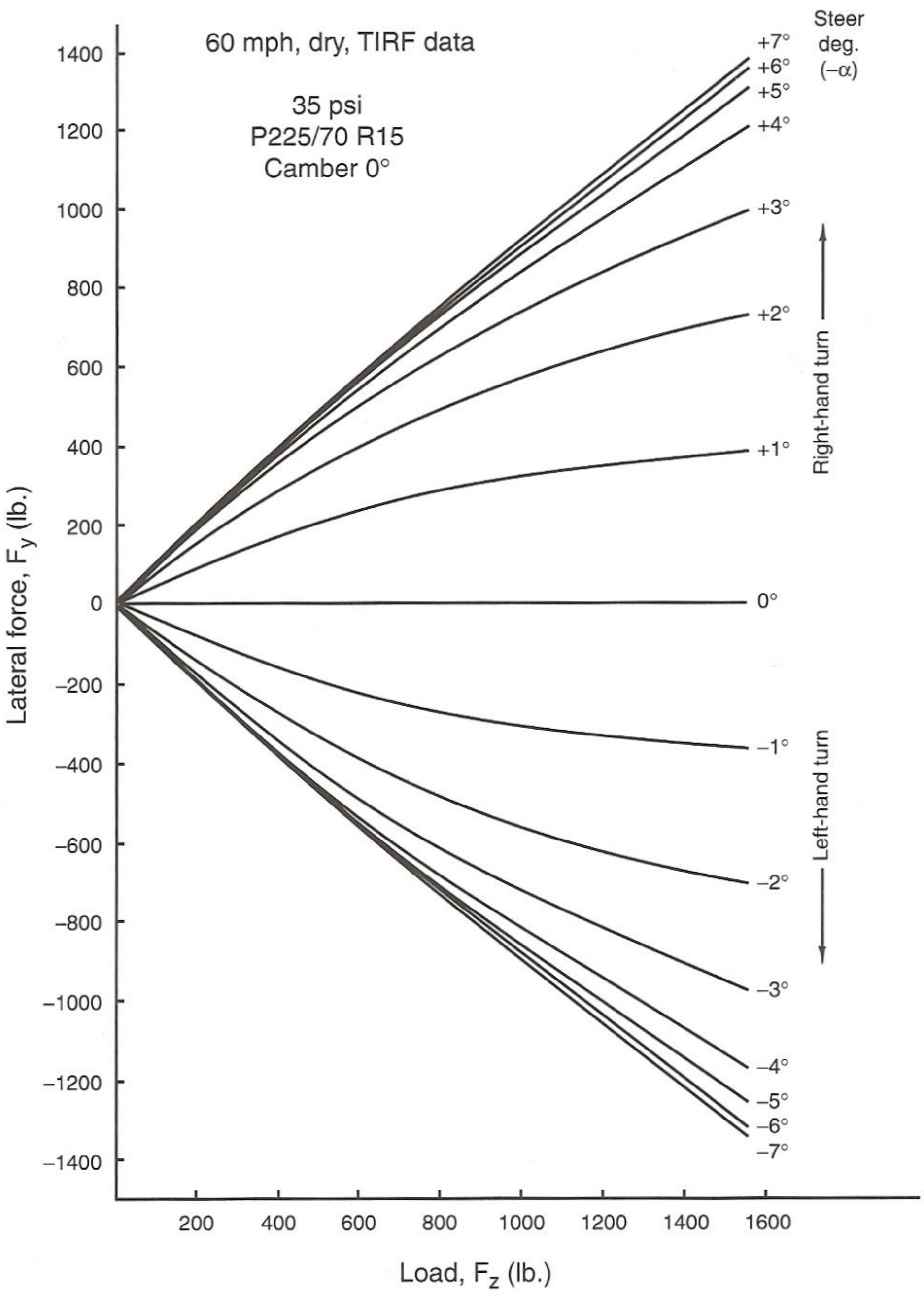
Εικ.12

Στην γραμμική περιοχή λειτουργίας του ελαστικού,η camber thrust και η πλευρική δύναμη εξαιτίας της γωνίας ολίσθησης,παρατηρούνται σαν ξεχωριστές συνιστώσες πλευρικής δύναμης,και προστίθενται.Έτσι το διάγραμμα πλευρικής δύναμης-γωνίας ολίσθησης,μετακινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω,παράλληλα με το αρχικό,ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία κλίνει ο τροχός.Όταν η γραμμική περιοχή υπερβένεται,η τιμή της πλευρικής δύναμης λόγω camber που προστίθεται μειώνεται σημαντικά(αυτό ονομάζεται roll off).

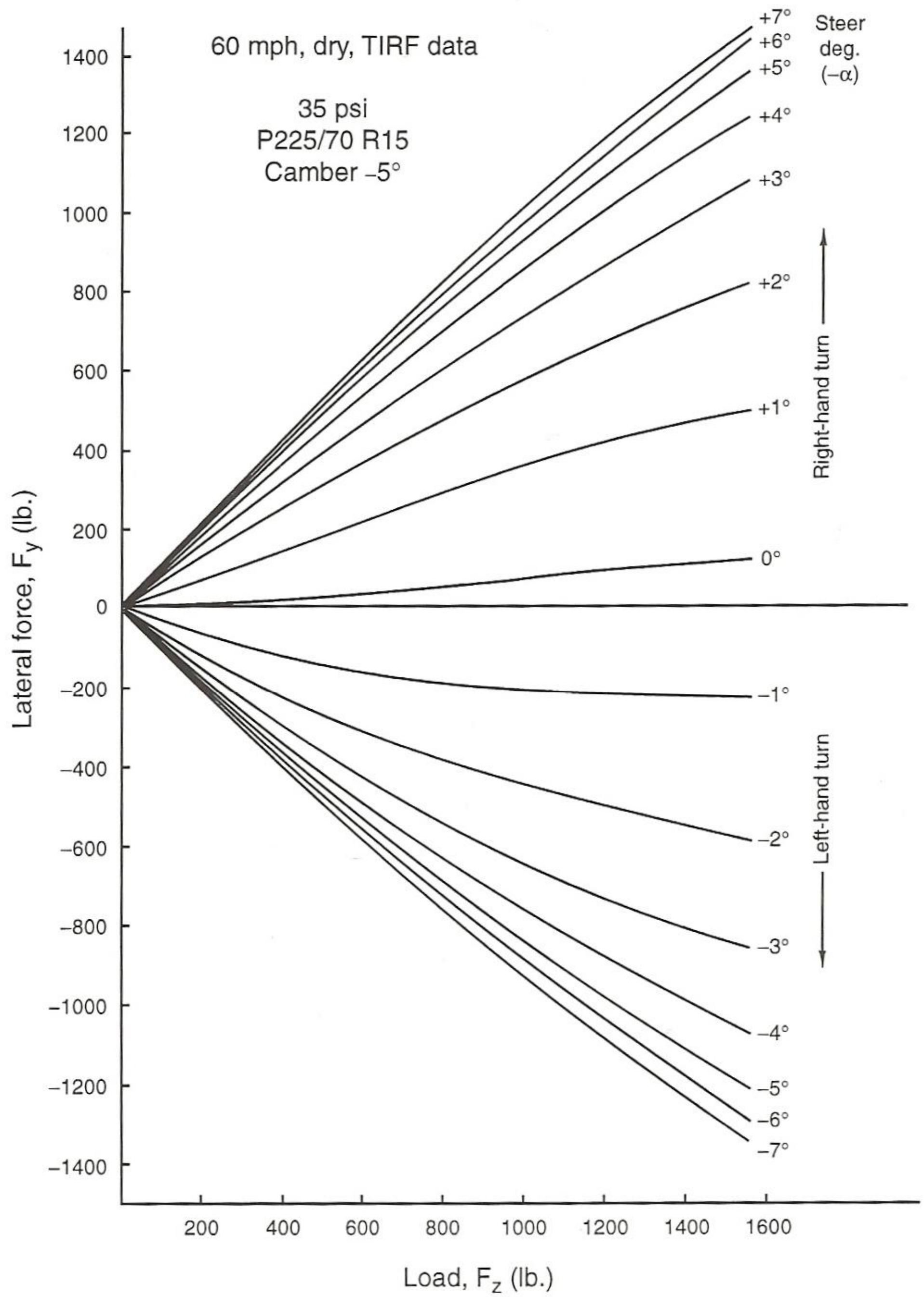
Μετρήσεις που έγιναν σε πολλούς τύπους ελαστικών,έδειξαν πως η μέγιστη τιμή της πλευρικής επιτάχυνσης,λόγω γωνίας ολίσθησης,αυξάνεται όταν ο τροχός κλίνει προς το εσωτερικό της στροφής,και αντίστοιχα μειώνεται όταν η κλίση του είναι προς το εξωτερικό.Αν και δεν μπορεί να εξηγηθεί απόλυτα ο μηχανισμός που οδηγέι σε αυτό το αποτέλεσμα,είναι σίγουρα κάτι που σχετίζεται με ό,τι συμβαίνει στην παραμόρφωση του αποτυπώματος.

Ενώ η παραμόρφωση του αποτυπώματος,λόγω της γωνίας ολίσθησης,είναι μέγιστη κοντά στο τέλος του,λόγω μειωμένων κάθετων δυνάμεων που ασκούνται εκεί,η μέγιστη παραμόρφωση λόγω της γωνίας camber συμβαίνει κοντά στο κέντρο του όπου οι τοπικές πλευρικές δυνάμεις είναι μέγιστες.Το ενδεχόμενο της ολίσθησης στο υψηλά φορτισμένο κέντρο του αποτυπώματος είναι πολύ μικρότερη από ότι στο τέλευταίο τμήμα του αποτυπώματος που είναι λιγότερο φορτισμένο.Αυτό πιθανότατα εξηγεί το γεγονός ότι οι υψηλότερες πλευρικές δυνάμεις επιτυγχάνονται όταν η επίδραση του camber προστίθεται σε αυτήν της γωνίας ολίσθησης.Στην περιοχή λειτουργίας που οι γωνίες ολίσθησης είναι πολύ μεγάλες,δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία,γι’αυτό και το διάγραμμα τελειώνει νωρίτερα.

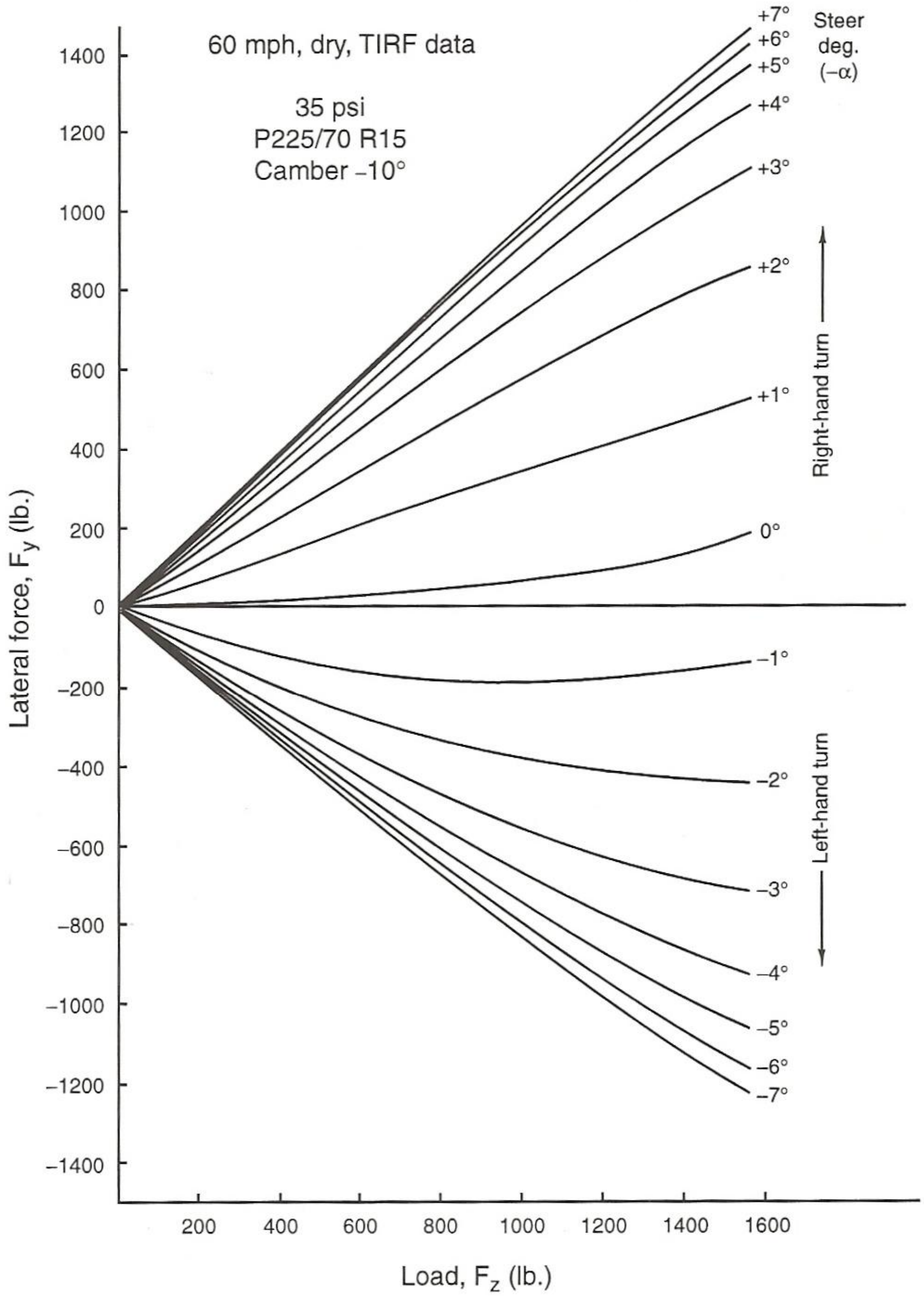
3.4 Τυπικά δεδομένα ελαστικού υπό γωνία camber



Lateral force at zero camber.



Lateral force at –5° camber, lean to right for LH front wheel.



Lateral force at –10° camber, lean to right for LH front wheel.

Εικ.13-14-15

Για να απεικονίσουμε καλύτερα τα αποτελέσματα της γωνίας camber στην πλευρική δύναμη,γιά κάθε περίπτωση κάθετου φορτίου και γωνίας ολίσθησης,παρουσιάζονται 3 διαγράμματα,βασισμένα σε τεστ που έγιναν στην δοκιμαστική διάταξη Calspan TIRF,σε ελαστικό Goodyear Eagle P225/70R15.Το ελαστικό υποβλήθηκε στη δοκιμασία,έχοντας 35psi πίεση,στα 60mph,σε στεγνό οδόστρωμα,που εξωμοιώθηκε από την δοκιμαστική διάταξη.Οι καμπύλες είναι σε κλίμακα γωνίας τιμονιού αντί για γωνίες ολίσθησης.Όταν ο τροχός είναι στριμμένος δεξιά το πρόσημο είναι θετικό.

Το πρώτο διάγραμμα είναι υπό 0^o γωνίας camber.Σε αυτό παρατηρούμε πως η δυνατότητα του ελαστικού να παράγει πλευρική δύναμη,είναι η ίδια για αριστερές ή δεξιές στροφές.Η συμπεριφορά του ελαστικού είναι σχεδόν απόλυτα συμμετρική.

Στα επόμενα 2 διαγράμματα ο τροχός έχει κλίση 5^o και 10^o αντίστοιχα,και στις 2 περιπτώσεις προς τα δεξιά.Παρατηρούμε πως και στις 2 περιπτώσεις τα διαγράμματα είναι ασύμμετρα.Όταν ο τροχός έχει κλίση προς τα δεξιά(κοιτώντας τον από πίσω),οι πλευρικές δυνάμεις που παράγει όταν στρίβει δεξιά είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές που παράγονται όταν στρίβει αριστερά.

Παρατηρούμε πως η γωνία camber έχει το αποτέλεσμα να περιστρέφει αντιωρολογιακά τις καμπύλες του πρώτου διαγράμματος.Για αυτόν τον τύπο ελαστικών,μεγάλου πλάτους,βλέπουμε πως τα μεγαλύτερα κέρδη όσων αφορά την πλευρική δύναμη,τα έχουμε για -5^o camber.Με την εξαίρεση των οβάλ πιστών αγώνων(όπου είναι σύνηθες να είναι και οι δύο τροχοί κεκλιμένοι προς την ίδια κατεύθυνση),έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται αρνητική γωνία camber(και οι 2 τροχόι κεκλιμένοι προς τα μέσα).

Κεφάλαιο 4:Απλοποιημένη μελέτη σταθερότητας και ελέγχου αυτοκινήτου,κατά τη διάρκεια στροφής υπό σταθεροποιημένη κατάσταση(steady-state)

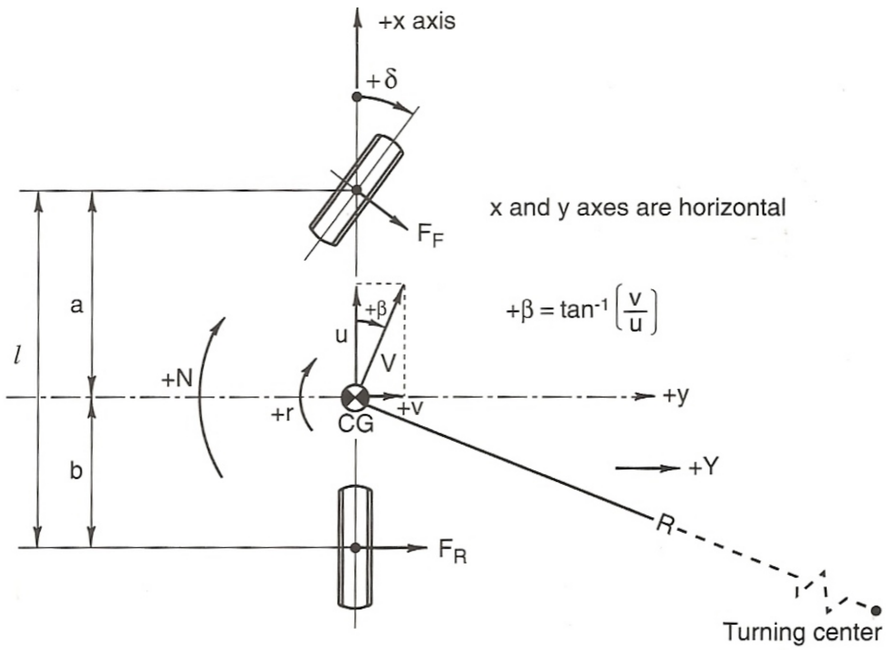
4.1 Καθορισμός του στοιχειώδους μοντέλου αυτοκινήτου

Αυτή η αναπαράσταση του αυτοκινήτου,ονομάζεται συχνά και ως μοντέλο ποδηλάτου,ορίζεται ως εξής:

- Δεν υπάρχει καθόλου πλευρική μεταφορά βάρους.
- Δεν υπάρχει καθόλου διαμήκης μεταφορά βάρους.
- Δεν δημιουργούνται καθόλου κλίσεις ούτε στον διαμήκη,ούτε στον εγκάρσιο άξονα.
- Τα ελαστικά λειτουργούν στην γραμμική περιοχή.
- Υπάρχει διαρκής σταθερή ταχύτητα προς τα εμπρός που την επιλέγει ο χρήστης.
- Δεν υπάρχουν καθόλου επιδράσεις λόγω αεροδυναμικής.

Για το απλό αυτό μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε,τα ελαστικά θα λειτουργούν στην γραμμική περιοχή μόνο,και η πλευρική επιτάχυνση που θα αναπτύσσεται θα λαμβάνει τιμές έως 0.4g.

Δεχόμαστε πως το ‘’αυτοκίνητο’’ κινείται σε ομαλό οδόστρωμα.Θα χρησιμοποιήσουμε την εξής απλοποίηση.Για μικρές γωνίες,σε ακτίνια,το ημίτονο της γωνίας είναι ίσο με τη γωνία,ενώ το συνημίτονο είναι ίσο με μονάδα.Με αυτό το απλό μοντέλο,μπορούμε να εξετάσουμε την επιρροή που έχουν η τοποθεσία του κέντρου βάρους,το cornering stiffness των εμπρός και πίσω ελαστικών,και η γωνία στροφής των εμπρός τροχών,στις κινήσεις του οχήματος που ορίζουν την πορεία και την συμπεριφορά του.



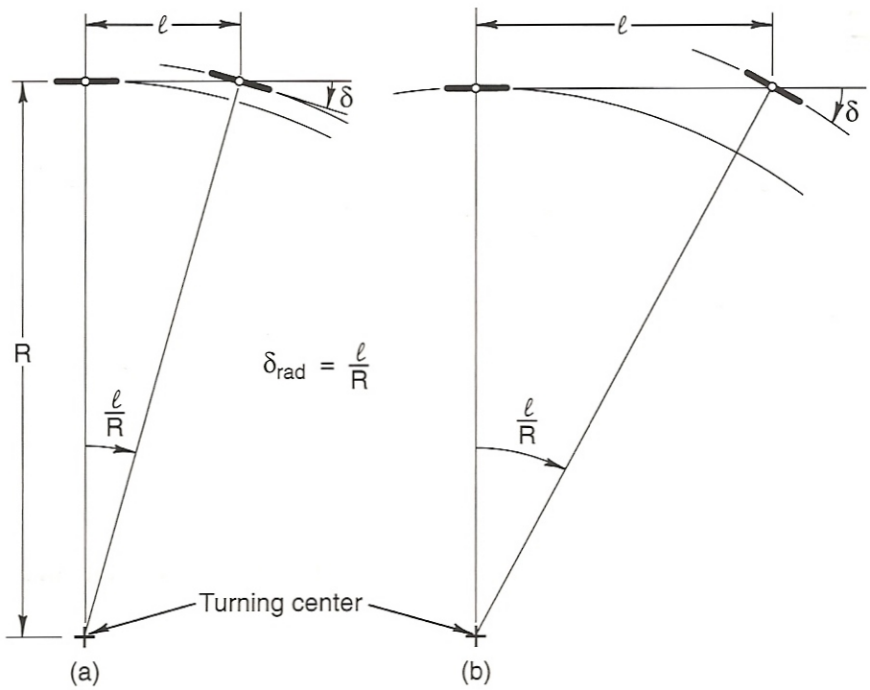
Εικ.16

Το μοντέλο αυτό έχει 2 βαθμούς ελευθερίας.Την πλευρική ταχύτητα,v,και την γωνιακή ταχύτητα,r,γύρω από τον κατακόρυφο άξονα που περνά από το κέντρο βάρους του αυτοκινήτου.Η μεταβλητή που εισάγουμε κάθε φορά εμείς είναι η γωνία στροφής των εμπρός τροχών,δ.

4.2 Γεωμετρία αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια στροφής χαμηλής ταχύτητας,steady-state

Όταν η ταχύτητα κατά τη διάρκεια μίας στροφής είναι πολύ χαμηλή,και οι διαμήκεις και πλευρικές επιταχύνσεις είναι τόσο μικρές που μπορούν να παραλειφθούν,τα πραγματικά αυτοκίνητα συμπεριφέρονται σαν το μοντέλο ποδηλάτου που εξετάζουμε.Οι γωνίες ολίσθησης είναι μηδενικές,και οι εμπρός και πίσω τροχοί κινούνται σε ομόκεντρους κύκλους,με τους εμπρός να βρίσκονται στον κύκλο με τη μεγαλύτερη ακτίνα.

Η ακτίνα της στροφής συνήθως ορίζεται σαν την απόσταση από το κέντρο της στροφής,έως το κέντρο βάρους του οχήματος.Για τις περισσότερες στροφές και με την απλοποίηση για μικρές γωνίες που κάναμε προηγουμένως,ο λόγος l/R είναι σχεδόν ίσος με την απαιτούμενη γωνία στροφής,δ(σε ακτίνια).Όσο το μεταξόνιο,l,αυξάνεται(όπως φαίνεται στο σχήμα b),η γωνία στροφής αυξάνεται επίσης,για να διατηρηθεί σταθερή η ακτίνα της στροφής.Αν δηλαδή όλα τα υπόλοιπα μεγέθη μείνουν ίδια,ένα αυτοκίνητο με μεγαλύτερο μεταξόνιο απαιτεί μεγαλύτερη γωνία στροφής των εμπρός τροχών από ένα με μικρότερο μεταξόνιο.



Εικ.17

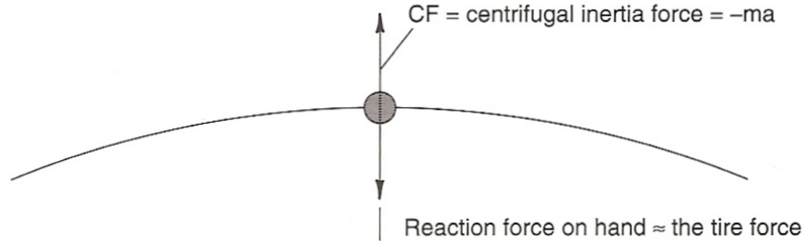
Η γωνία μεταξονίου,ή όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία ‘’γωνία στροφής Ackermann’’,είναι η γωνία στροφής των εμπρός τροχών που είναι απαραίτητη για ένα αυτοκίνητο μεταξονίου l,για να ακολουθήσει μία στροφή ακτίνας R,σε χαμηλές ταχύτητες,όπου οι εξωτερικές δυνάμεις λόγω επιταχύνσεων,μπορύν να παραλειφθούν.

4.3 Γεωμετρία του ουδέτερου αυτοκινήτου σε συνθήκες στροφής steady-state

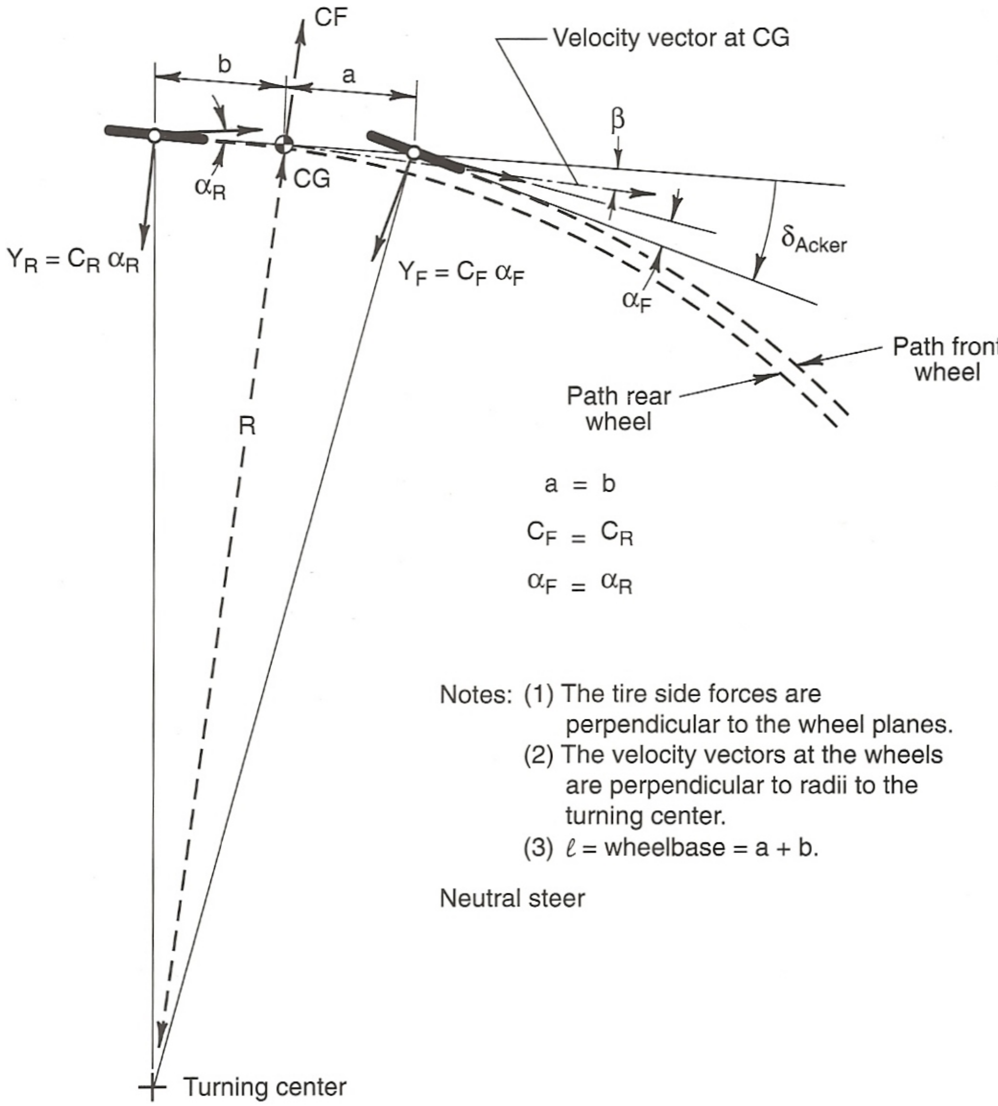
Μπορούμε να αναπτύξουμε τους ορισμούς του ουδέτερου,υποστροφικού,και υπερστροφικού αυτοκινήτου,χρησιμοποιώντας το μοντέλο ποδηλάτου.Αυτοί οι ορισμοί βέβαια ισχύουν μόνο για τη γραμμική περιοχή λειτουργίας των ελαστικών.

Αν αυξήσουμε την ταχύτητα με την οποία εκτελείται η στροφή,τόσο ώστε να μην μπορούμε να παραλείψουμε την πλευρική επιτάχυνση συμβαίνουν τα εξής.Η πλευρική επιτάχυνση του αυτοκινήτου,$\frac{V^2}{R}$,δρα προς την κατεύθυνση του κέντρου της στροφής.Η πλευρική δύναμη που είναι απαραίτητη για την δημιουργία αυτής της επιτάχυνσης,παρέχεται από τα ελαστικά,και έχει μέγεθος (W/g)*$\frac{V^2}{R}$=ma,όπως ορίζει ο δεύτερος νόμος του

Νεύτωνα.Για να έρθει το σύστημα σε ηρεμία λαμβάνουμε υπ’όψιν μας την φυγόκεντρο δύναμη,Η ισορροπία που επιτυγχάνεται είναι όμοια με αυτήν μίας μπάλας που περιστρέφεται δεμένη με μία κλωστή,γύρω από σταθερό κέντρο.



Εικ.18



Εικ.19

Όπως φαίνεται στο σχήμα υποθέτουμε πως το κέντρο βάρους βρίσκεται στο κέντρο του μεταξονίου(a=b=l/2).Τα εμπρός και πίσω ελαστικά διαθέτουν ίσο cornering stiffness(lb/deg. ή lb/rad. γωνίας ολίσθησης),καθώς και ίση διάμετρο,και πίεση.Η φυγόκεντρος δύναμη που δρα προς το εξωτερικό της στροφής πρέπει να ισορροπηθεί απο τις δυνάμεις των εμπρός και πίσω ελαστικών,που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι φανερά ίσες.

Οπότε υπάρχει ισορροπία δυνάμεων:$CF=Y_F + Y_R=C_F\alpha_F + C_R\alpha_R$

Καθώς και ισορροπία ροπών:$C_F\alpha_F a=C_R\alpha_R b$

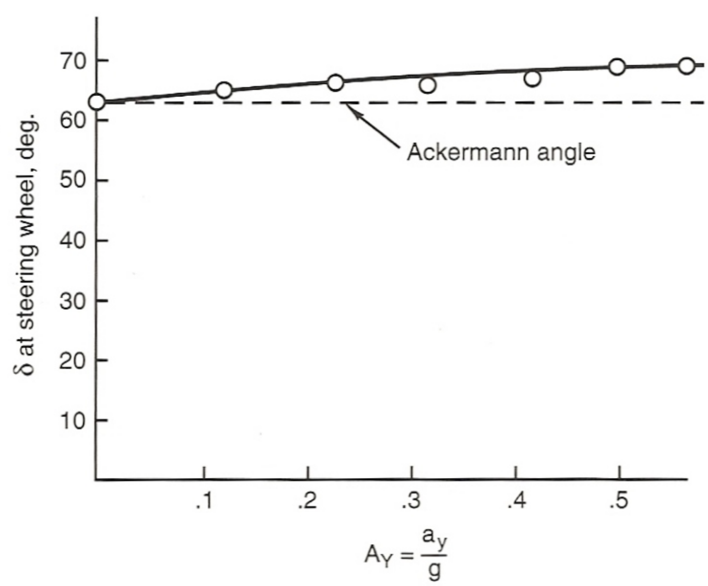
Αφού a=b και $C_F=C_R$,ισχύει και $\alpha_F=\alpha_R$

Μπορούμε να κάνουμε αρκετές χρήσιμες παρατηρήσεις από το σχήμα.

- Η ίδια γωνία στροφής απαιτείται για να εκτελεστεί μία στροφή ίδιας ακτίνας,για οποιαδήποτε ταχύτητα.
- Η γωνία ολίσθησης του αυτοκινήτου λαμβάνεται περιστρέφοντας ολόκληρο το αυτοκίνητο κατά γωνία α_R(καθώς για το απλό αυτό μοντέλο το επίπεδο των πίσω τροχών είναι πάντα παράλληλο στον κεντρικό άξονα του αυτοκινήτου).Αυτή η γωνία,β, ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του κεντρικού άξονα που περνά από το κέντρο μάζας του αυτοκινήτου,και της πορείας που ακολουθεί τελικά το αυτοκίνητο.
- Στην συγκεκριμένη κατάσταση οι πίσω τροχοί εκτελούν κύκλο μικρότερης ακτίνας από τους εμπρός.
- Η περιστροφή που δημιουργεί την γωνία ολίσθησης των πίσω τροχών,στρίβει επίσης και τους εμπρός τροχούς.

Η συμπεριφορά του οχήματος που εξετάζουμε ονομάζεται ουδέτερη,καθώς όταν εφαρμόζεται πλευρική επιτάχυνση στο όχημα,ούτε υποστρέφει,ούτε υπερστρέφει από την επιλεγμένη τροχιά που καθορίστηκε από την ‘’γωνία στροφής Ackermann’’.

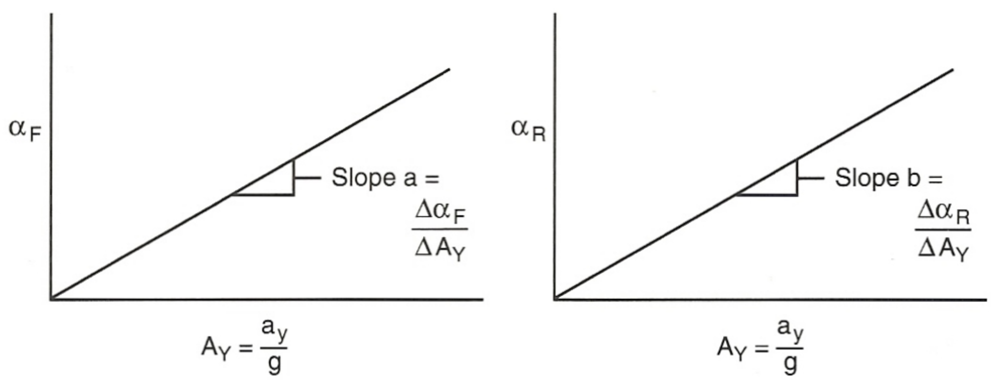
Στην συνέχεια παρουσιάζουμε δεδομένα που λάβαμε από μία δοκιμή σταθερής ακτίνας(30 μέτρων)για διάφορες ταχύτητες,από ένα όχημα που είναι πολύ κοντά στην ουδέτερη συμπεριφορά που περιγράψαμε.Το βασικό αποτέλεσμα από ένα τέτοιο τεστ είναι η γραφική παράσταση της γωνίας των τροχών με την πλευρική επιτάχυνση.



Εικ.20

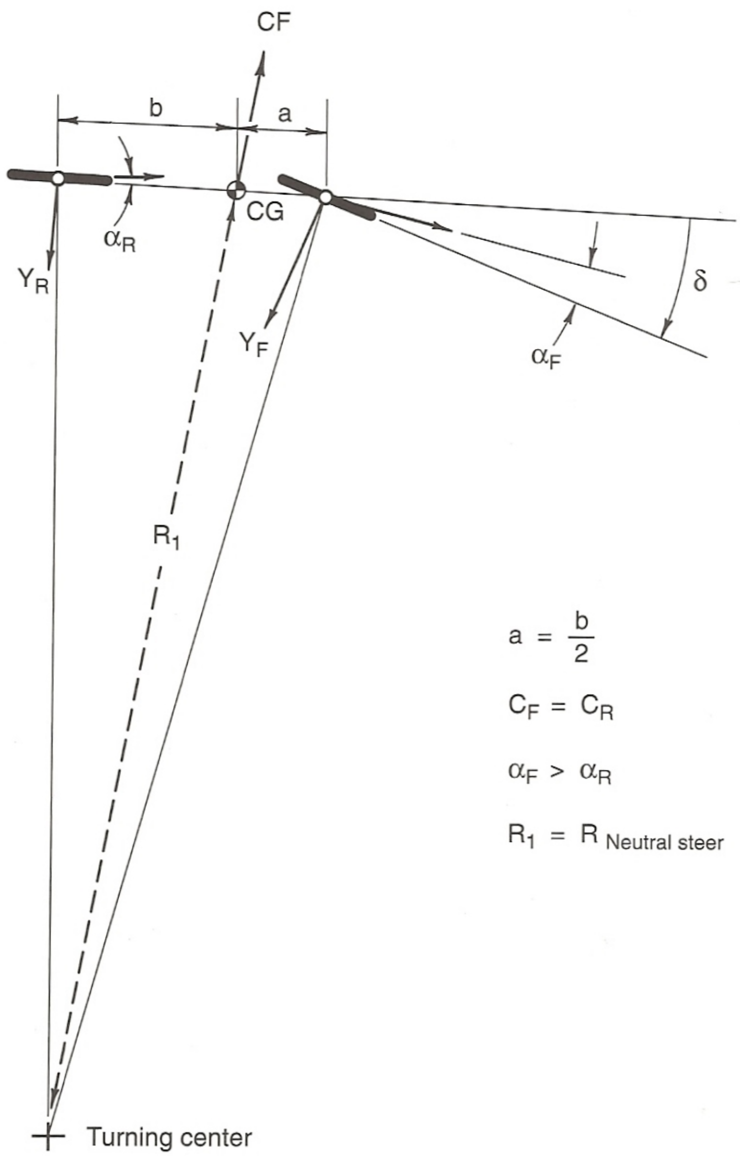
Επειδή το αυτοκίνητο είναι πολύ κοντά στην ουδέτερη συμπεριφορά καταγράψαμε στην γραφική παράσταση την γωνία του τιμονιού αντί για την γωνία των τροχών.Βλέπουμε πως όσο αυξάνεται η επιτάχυνση,η απόκκλιση από την γωνία Ackermann είναι μόνο 5 μοίρες.Αν διαιρέσουμε τη διαφορά αυτή με το λόγο του τιμονιού(14 προς 1)βλέπουμε πως η απόκκλιση των εμπρός τροχών από την γωνία Ackermann είναι μόλις 0,35 μοίρες.

Όσο η πλευρική δύναμη και επιτάχυνση αυξάνεται,αυξάνονται και οι γωνίες ολίσθησης.Αν το cornering stiffness είναι σταθερό,όπως συμβαίνει στην γραμμική περιοχή των ελαστικών,οι γωνίες ολίσθησης πρέπει να αυξάνονται γραμμικά με την πλευρική επιτάχυνση.Στη συνέχεια παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις των εμπρός και πίσω γωνιών ολίσθησης με την πλευρική επιτάχυνση,που προέκυψαν από τη δοκιμή σταθερής ακτίνας που είδαμε προηγουμένως.Η γωνία της καμπύλης για τους εμπρός και τους πίσω τροχούς είναι ίση όπως περιμέναμε να συμβαίνει στο ουδέτερης συμπεριφοράς όχημα.



Εικ.21

4.4 Γεωμετρία του υποστροφικού αυτοκινήτου σε συνθήκες στροφής steady-state



Εικ.22

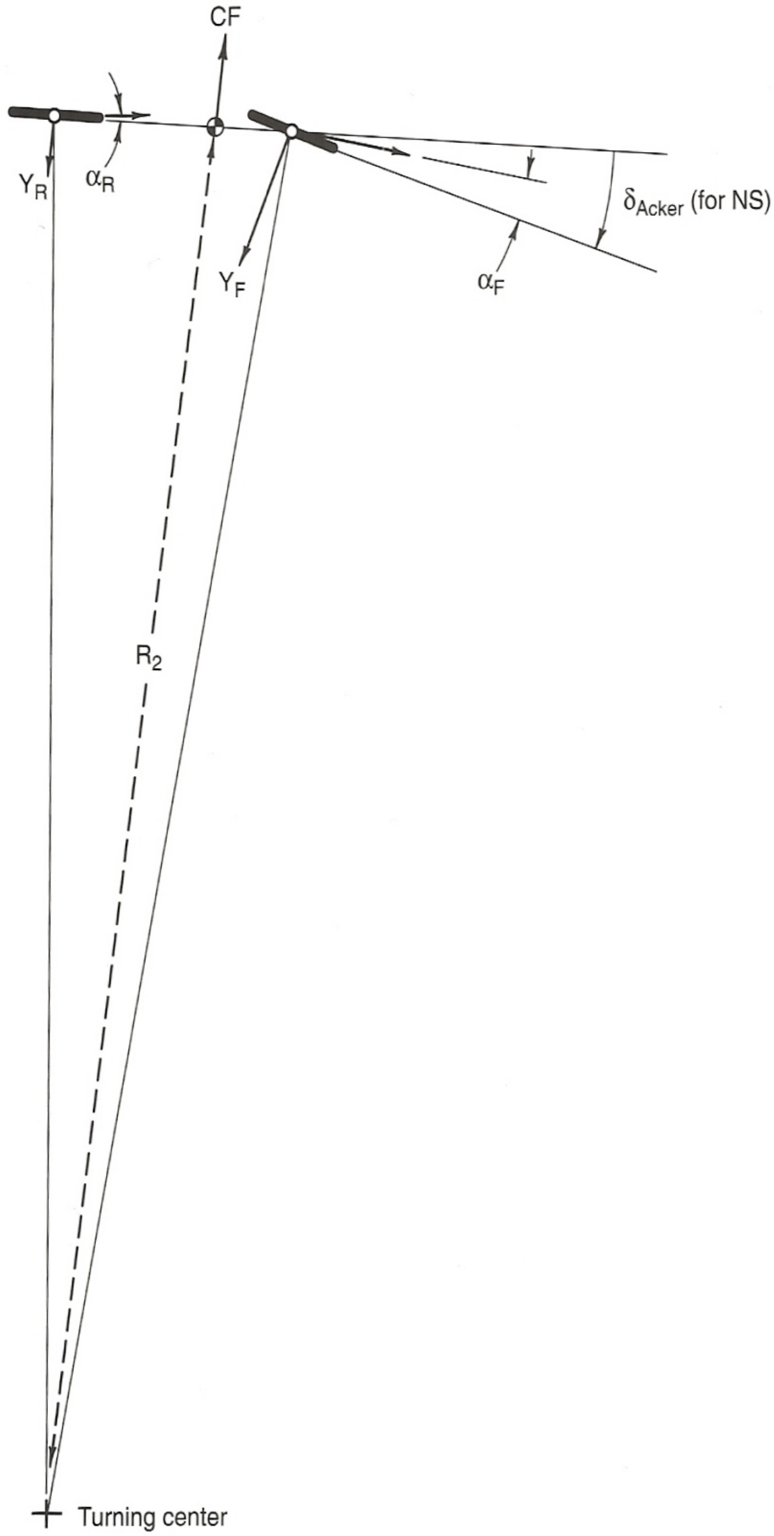
Θεωρούμε τώρα το ίδιο μοντέλο με το κέντρο βάρους μετατοπισμένο στο 1/3 του μεταξονίου,πίσω από τον εμπρός άξονα.Έτσι τοποθετούμε το κέντρο βάρους εμπρός από το μέσο του μεταξονίου.Η στατική κάθετη φόρτιση στους εμπρός τροχούς είναι τώρα 2/3W ενώ στους πίσω 1/3W.Οι εμπρός τροχοί λαμβάνου το διπλάσιο βάρος από τους πίσω.Υποθέτουμε πως αλλάζοντας τις διαμέτρους και τις πιέσεις των ελαστικών το cornering stiffness παραμένει το ίδιο εμπρός και πίσω,και επίσης παραμένει ίσο με αυτό του προηγούμενου παραδείγματος.Με το ίδιο μεταξόνιο,η γωνία στροφής Ackermann παραμένει ίδια με αυτήν του ουδέτερου αυτοκινήτου,για στροφή ίδιας ακτίνας.

Όταν η ταχύτητα μέσα στη στροφή αυξηθεί δημιουργείται κεντρομόλος δύναμη που πρέπει να εξισορροπηθεί από τις δυνάμεις των ελαστικών.Τώρα λόγω της θέσης του κέντρου βάρους,οι εμπρός τροχοί παράγουν τα 2/3 της συνολικής δύναμης,ενώ οι πίσω το 1/3.Επειδή το cornering stiffness εμπρός και πίσω είναι ίδιο,η γωνία ολίσθησης των εμπρός τροχών,πρέπει να είναι διπλάσια αυτής των πίσω.Δηλαδή $α_F/α_R$=2.Εάν συγκρίνουμε την ισορροπία των πλευρικών δυνάμεων αυτής της διάταξης,με αυτή του ουδέτερου αυτοκινήτου(Neutral Steer=NS),παρατηρούμε πως $α_F$=4/3 $α_1$ και $α_R$=2/3 $α_1$,όπου $α_1$ είναι η γωνία ολίσθησης(ίδια για εμπρός και πίσω τροχούς)του NS αυτοκινήτου.

Στην προηγούμενη εικόνα βλέπουμε την περίπτωση που η στροφή για αυτή τη διάταξη έχει την ίδια ακτίνα με αυτήν του NS αυτοκινήτου.Στην περίπτωση αυτή βλέπουμε πως η γωνία ολίσθησης του αυτοκινήτου,β,είναι μικρότερη,λόγω της μείωσης στην γωνία ολίσθησης των πίσω τροχών-η εμπρός γωνία ολίσθησης που παράγεται από την περιστροφή είναι σημαντικά μικρότερη.Αν κάνουμε τη σύγκριση με την γωνία ολίσθησης του ουδέτερου οχήματος,χάνουμε 1/3 $α_1$ από το αποτέλεσμα αυτής της περιστροφής,ποσό το οποίο πρέπει να αναπληρωθεί με μία αύξηση στην γωνία στροφής των εμπρός τροχών.Όμως χρειαζόμαστε ακόμα 1/3 $α_1$ για να φέρουμε την εμπρός γωνία ολίσθησης στην απαραίτητη τιμή(4/3 $α_1$),και αυτή η ποσότητα πρέπει να προστεθεί επίσης στην γωνία στροφής.

Συνοπτικά,για να διατηρηθεί η επιθυμητή ακτίνα στροφής,πρέπει η γωνία στροφής των εμπρός τροχών να αυξηθεί κατά 2/3 $α_1$.Αυτή η αύξηση οφείλεται στην διαφορά των γωνιών ολίσθησης εμπρός και πίσω τροχών.Η γωνία στροφής Ackermann παραμένει ίδια.Οι γωνίες ολίσθησης είναι τελικά γωνίες που στρίβουν το όχημα.Στην συγκεκριμένη περίπτωση η εμπρός γωνία ολίσθησης,(4/3 $α_1$),προσπαθεί να στρίψει το αυτοκίνητο στο εξωτερικό της στροφής,ενώ η πίσω γωνία ολίσθησης,(2/3 $α_1$),προσπαθεί να στρίψει το αυτοκίνητο στο εσωτερικό της στροφής.Το τελικό αποτέλεσμα είναι η διαφορά των 2 γωνιών που ισούται με 2/3 $α_1$,προς το εξωτερικό της στροφής.Ο εμπρός άξονας υπερισχύει.

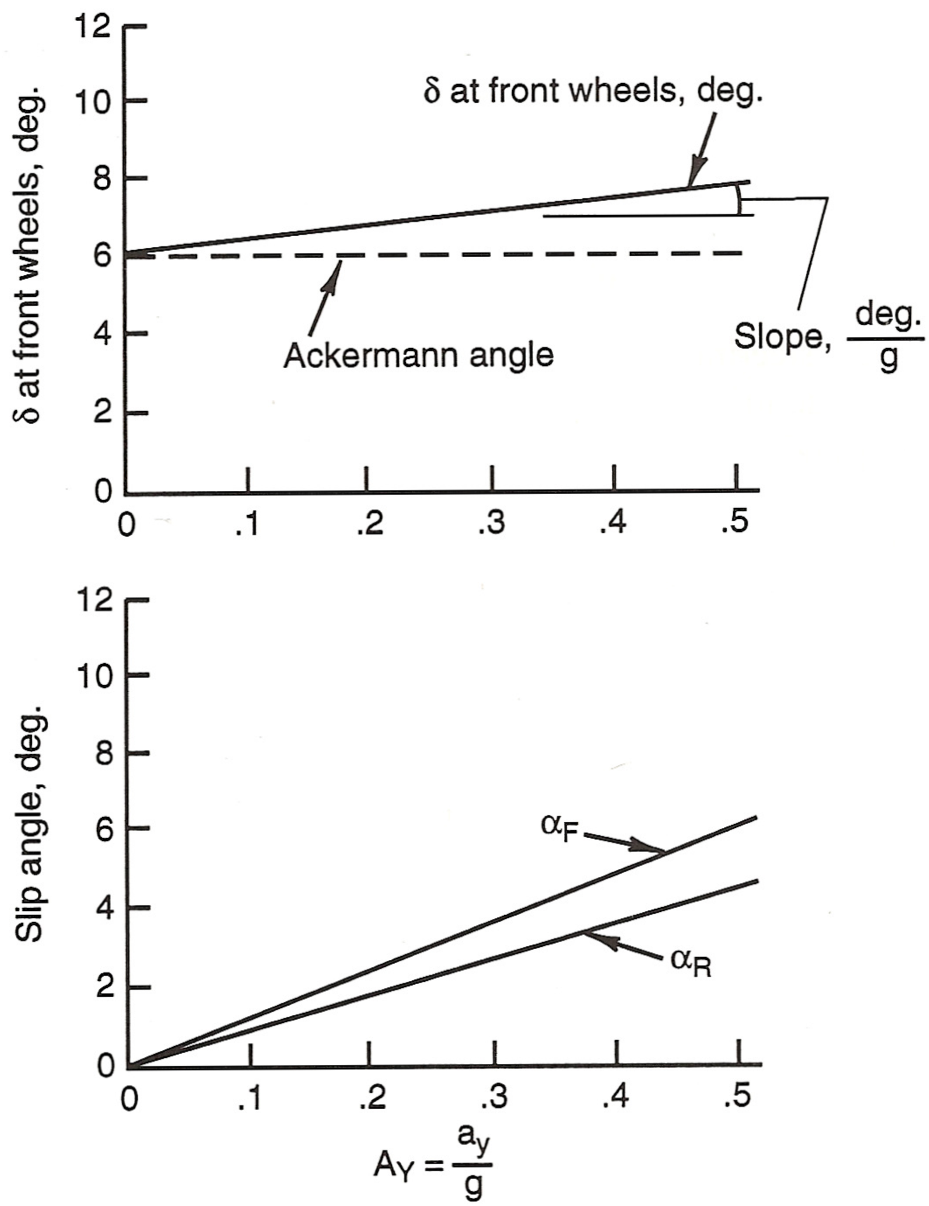
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η ακτίνα της στροφής που θα διέγραφε το όχημα αυτής της διάταξης,για ίδια γωνία στροφής εμπρός τροχών με το ουδέτερο όχημα.Είναι φανερό πως η ακτίνα έχει μεγαλώσει πολύ.



Εικ.23

Υποστροφικό ορίζουμε το όχημα το οποίο,καθώς του ασκείται πλευρική επιτάχυνση,υποστρέφει από την γεωμετρική ακτίνα που ορίζει η γωνία στροφής Ackermann.

Στη συνέχεια βλέπουμε διαγράμματα ενός υποστροφικού οχήματος,τα οποία προκύπτουν από τεστ σταθερής ακτίνας.Βλέπουμε πως από τα 0,4 g. και πάνω τα δεδομένα σταματούν να είναι γραμμικά εξαιτίας της συμπεριφοράς των ελαστικών σε αυτές τις επιταχύνσεις.

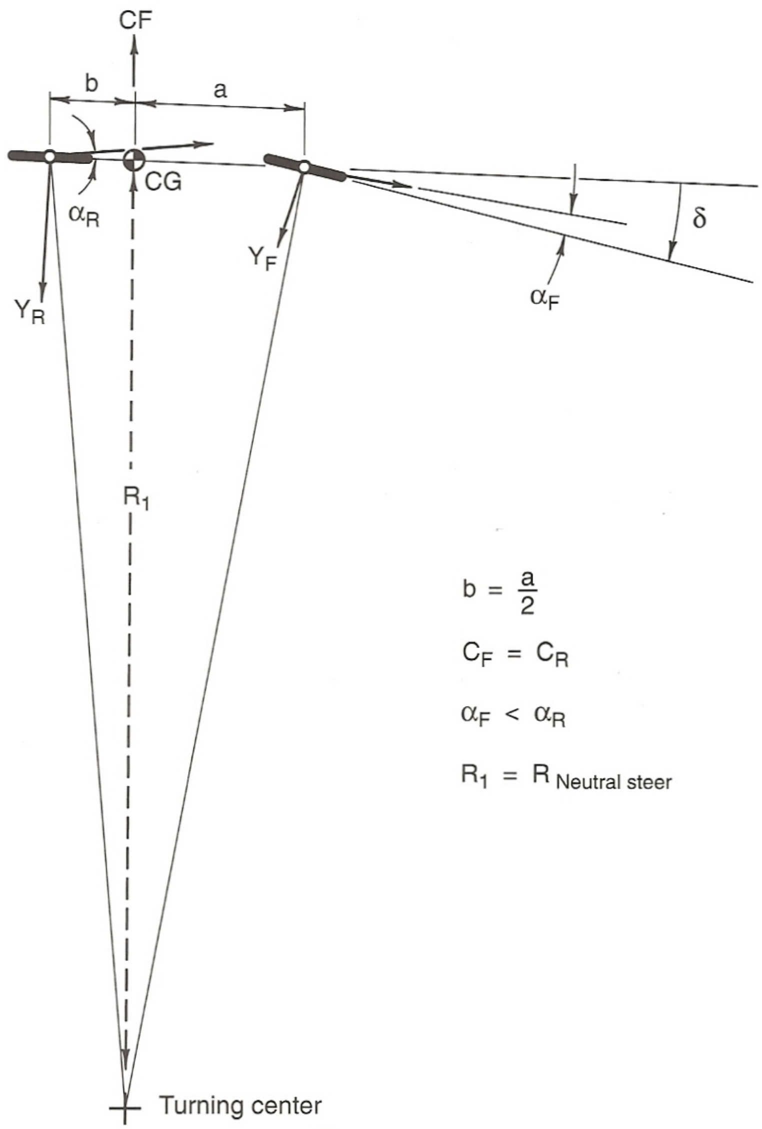


Εικ.24

Η κλίση του διαγράμματος γωνίας ολίσθησης και πλευρικής επιτάχυνσης,είναι ένας από τους τρόπους μέτρησης της υποστροφής.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπορεί η υποστροφή να προκλήθηκε από την μετατόπιση του κέντρου βάρους.Μπορούμε να γενικέυσουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το υποστροφικό όχημα,για όποια μεταβολή επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα στην απαιτούμενη γωνία στροφής των εμπρός τροχών,και στην διαφορά των γωνιών ολίσθησης εμπρός και πίσω τροχών.

4.5 Γεωμετρία του υπερστροφικού αυτοκινήτου σε συνθήκες στροφής steady-state



Εικ.25

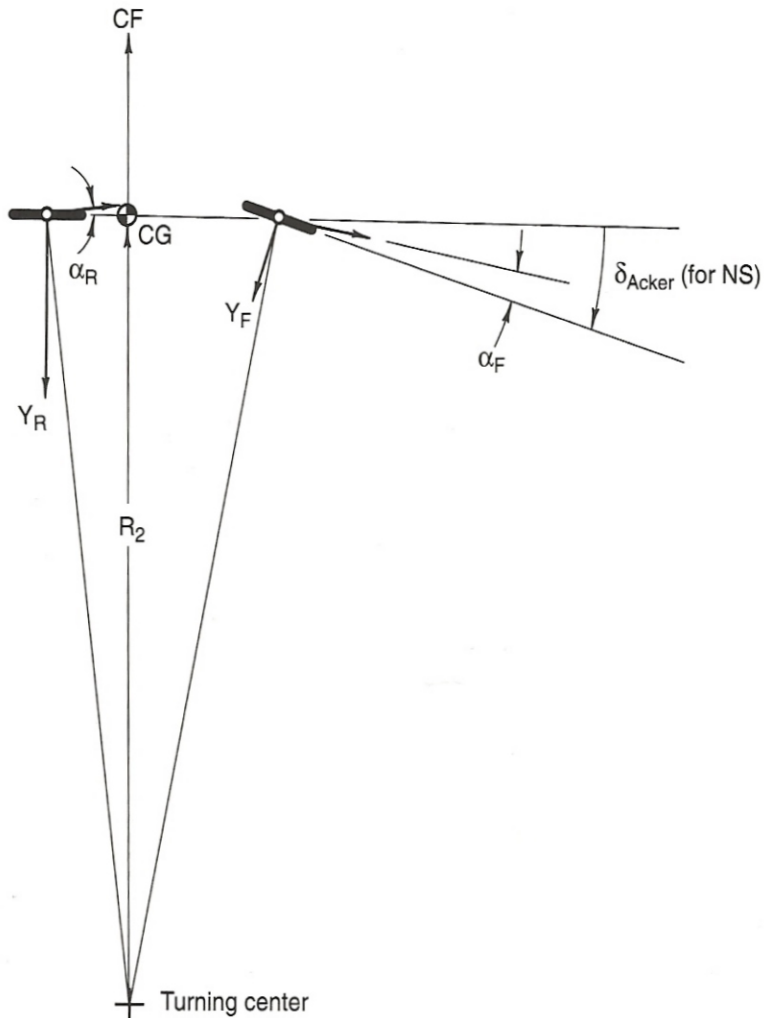
Είναι εύκολο τώρα πια να καταλάβουμε την συμπεριφορά του υπερστροφικού αυτοκινήτου.Μετακινούμε το κέντρο βάρους του μοντέλου στα 2/3 του μεταξονίου,κοντά στους πίσω τροχούς.Με όμοιο τρόπο αποδεικνύεται πως η γωνία ολίσθησης των εμπρός τροχών ισούται με α_F=2/3 α_1,ενώ η γωνία ολίσθησης των πίσω τροχών ισούται με α_R=2/3 α_1.

Σε αυτόν τον τύπο αυτοκινήτου,ο ρυθμός αλλαγής της πίσω γωνίας ολίσθησης συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης,είναι μεγαλύτερος από αυτόν της εμπρός γωνίας ολίσθησης.Υπερισχύει ο πίσω άξονας,και η πίσω γωνία ολίσθησης τείνει να στρίψει το αυτοκίνητο περισσότερο από την πορεία που ορίζει η γωνία στροφής Ackermann.

Το φαινόμενο περιστροφής του πίσω άξονα,προσθέτει 1/3 $α_1$ εμπρός,το οποίο πρέπει να εξισορροπηθεί με μείωση της γωνίας στροφής των εμπρός τροχών κατά αντίσοιχη ποσότητα.Όμως πρέπει να αφαίρεθει 1/3 $α_1$ από την εμπρός γωνία ολίσθησης για να επιτύχουμε την απαιτούμενη τιμή($α_F$=2/3 $α_1$),και έτσι μια επιπλέον μείωση σε γωνία στροφής του εμπρός άξονα είναι απαραίτητη,πάλι κατά 1/3 $α_1$.Έτσι τελικά με μείωση της γωνίας στροφής των εμπρός τροχών κατά 2/3 $α_1$ διατηρείται η ίδια ακτίνα στροφής με αυτήν του ουδέτερου αυτοκινήτου.

Τελικά,υπερστροφικό ονομάζουμε το όχημα,στο οποίο όταν εφαρμοστεί πλευρική επιτάχυνση,τείνει να στρίψει περισσότερο(υπερστρέψει) από την γεωμετρική ακτίνα που ορίζει η γωνία στροφής Ackermann.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την ακτίνα της στροφής που θα διέγραφε το υπερστροφικό όχημα,αν η γωνία στροφής των εμπρός τροχών ήταν ίδια με αυτή του ουδέτερου οχήματος.Εύκολα παρατηρούμε την κατά πολύ μικρότερη ακτίνα.


CF
CG
α_R
Y_R
Y_F
R_2
δ_{Acker} (for NS)
α_F
Turning center

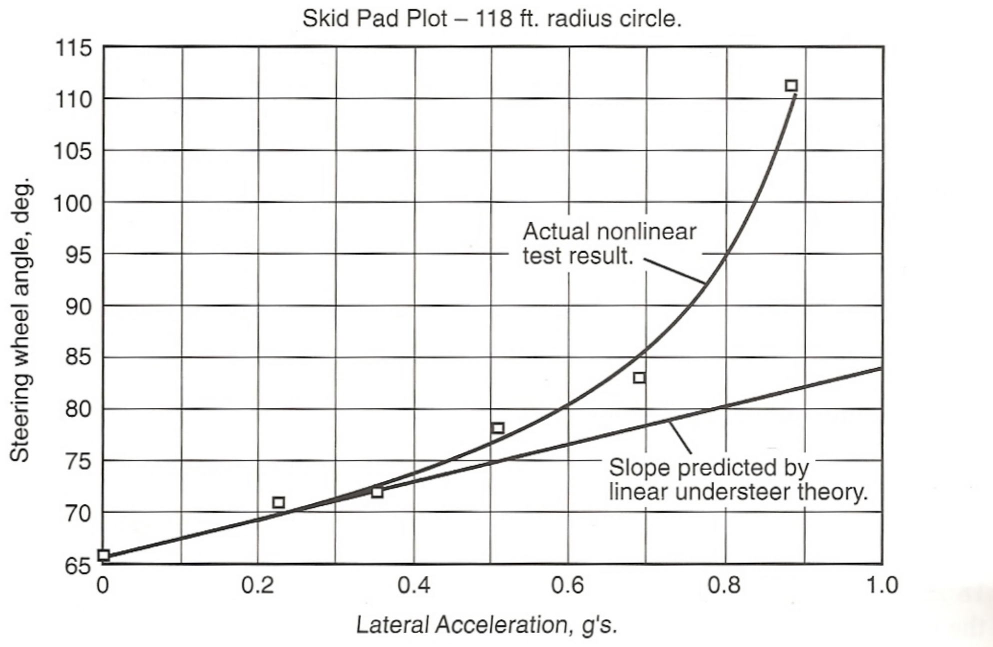
Εικ.26

Κεφάλαιο 5:Skid Pad Testing(Τεστ σε κυκλική τροχιά σταθερής ακτίνας)

Το συγκεκριμένο τεστ είναι από τις πιο διαδεδομένες διαδικασίες μέτρησης των χαρακτηριστικών του αυτοκινήτου όταν βρίσκεται σε στροφή ύπο σταθεροποιημένη κατάσταση(steady-state).Ο στόχος του τεστ αυτού είναι η μέτρηση της υποστροφής του αυτοκινήτου,σε διάφορες πλευρικές επιταχύνσεις.

Οι εταιρείες επιβατικών αυτοκινήτων χρησιμοποιούν το τεστ αυτό με τον ακόλουθο τρόπο.Το αυτοκίνητο οδηγείται ακολουθώντας την τροχιά ενός κύκλου σταθερής ακτίνας,με σταθερή ταχύτητα.Το τεστ επαναλαμβάνεται κάθε φορά μεταβάλλοντας την ταχύτητα,ξεκινώντας από πολύ χαμηλές τιμές(για να ορισθεί η γωνία στροφής Ackermann που είναι απαραίτητη για να εκτελεστεί η στροφή),μέχρι με μικρές προσαυξήσεις να προσεγγισθούν τα όρια πρόσφυσης του οχήματος.

Το διάγραμμα που βλέπουμε παρακάτω προέρχεται από ένα τέτοιο τεστ,σε ένα υποστροφικό αυτοκίνητο.Η κλίση της καμπύλης δίνει την ποσότητα της υποστροφής.Η κλίση στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης,δίνει περίπου 9^o στροφής του τιμονιού,για 0,5 g. πλευρικής επιτάχυνσης.Δηλαδή η υποστροφή είναι 18^o/g. μετρούμενη στο τιμόνι.Αν θέλουμε να υπολογίσουμε την υποστροφή σε κάποια άλλη τιμή πλευρικής επιτάχυνσης,υπολογίζουμε ξανά την κλίση της καμπύλης στο σημείο που μας ενδιαφέρει.Παρατηρούμε πως όταν η πλευρική επιτάχυνση αυξάνεται πέρα από ένα όριο,η κλίση της καμπύλης γίνεται πολύ απότομη.Αυτό υποδηλώνει πως το αυτοκίνητο βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο,και πως εκεί μία έντονη αύξηση της γωνίας του τιμονιού,δεν θα έχει σαν αποτέλεσμα αντίστοιχη αύξηση της πλευρικής επιτάχυνσης.



Εικ.27

Μία διαφορετική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η παρακάτω.Ο οδηγός προσπαθεί να διατηρήσει το αυτοκίνητο πάνω στην κυκλική καθορισμένη τροχιά,δηλαδή μέσα στα όρια του πλάτους της επιλεγμένης διαδρομής,επιταχύνοντας διαρκώς,σύμφωνα με τις δυνατότητες πρόσφυσης που του δίνει κάθε φορά η ρύθμιση στην ανάρτηση του αυτοκινήτου.Το τεστ σταματάει όταν το αυτοκίνητο δεν μπορεί πια να διατηρήσει την καθορισμένη τροχιά,και υποστρέφει ή υπερστρέφει έντονα,καταλήγοντας εκτός του πλάτους της διαδρομής δοκιμών που χρησιμοποιείται.Λαμβάνοντας τις τιμές της πλευρικής επιτάχυνσης και της ταχύτητας που αναπτύσσει,για κάθε μία από τις διαφορετικές ρυθμίσεις της ανάρτησης,συμπεραίνουμε τις επιδράσεις των αλλαγών αυτών στην συμπεριφορά του αυτοκινήτου.

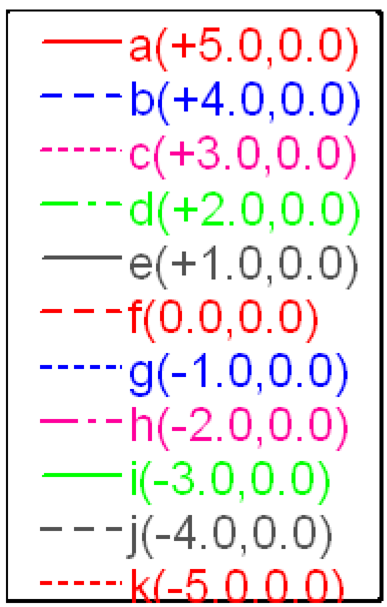
5.1 Μελέτη επίδρασης της γωνίας camber στην δυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου

Το αυτοκίνητο θα οδηγηθεί σε κυκλική τροχιά σταθερής ακτίνας 30 μέτρων,σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων-πλευρικών επιταχύνσεων,ξεκινώντας από πολύ χαμηλές τιμές,μέχρι την προσέγγιση των ορίων του αυτοκινήτου(0,88 g.).Η ταχύτητα-πλευρική επιτάχυνση,αυξάνεται με πολύ μικρό βήμα,και σε κάθε νέα τιμή διατηρείται σταθερή,μέχρι να ληφθούν οι κατάλληλες μετρήσεις για συνθήκες steady-state.

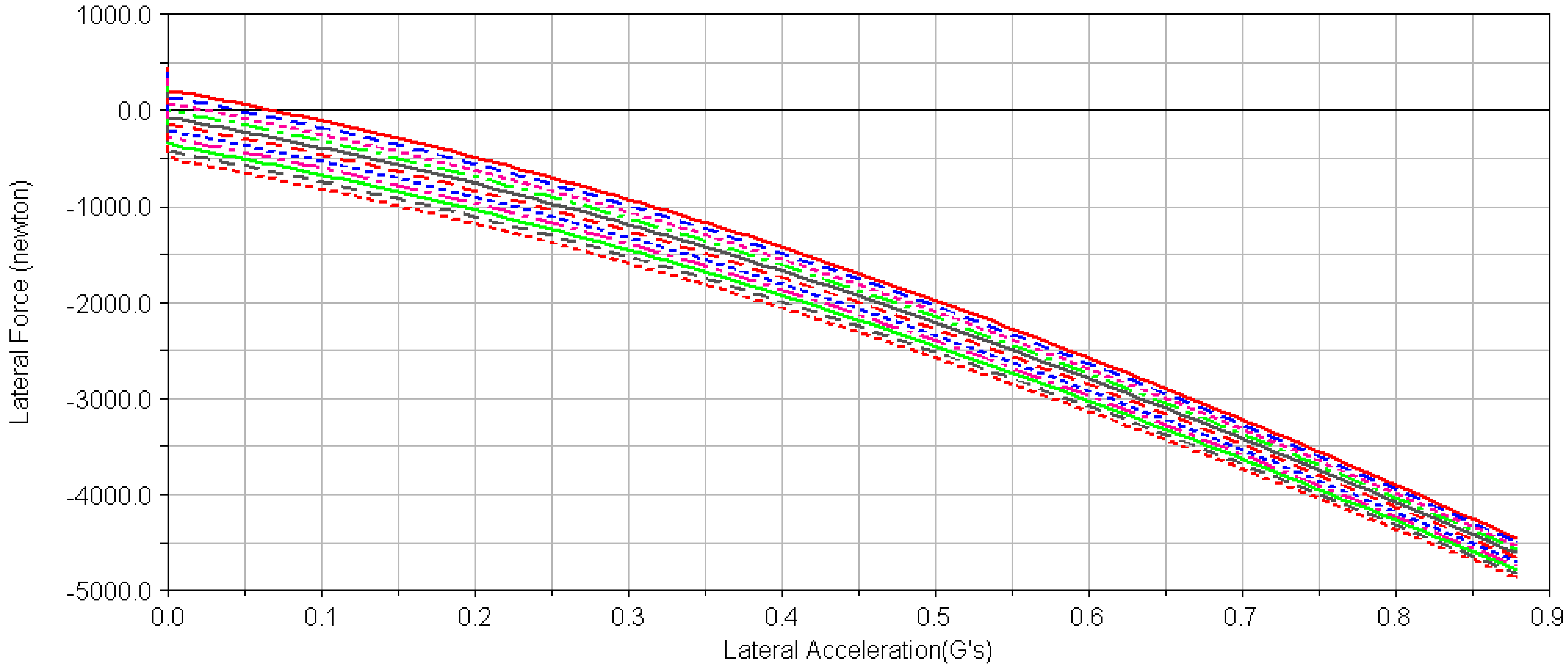
Αρχικά θα διατηρήσουμε σταθερή την γωνία camber των πίσω τροχών στις 0^o,και θα μεταβάλλουμε την γωνία camber των εμπρός τροχών,ξεκινώντας από $+5^o$,έως τις -5^o,με βήμα -1^o.

Το μετρητικό όργανο μετράει την αντίδραση της δύναμης που ασκεί το ελαστικό στο δρόμο,έτσι αρνητικές είναι οι τιμές με φορά προς το εσωτερικό της δεξιάς στροφής,ενώ οι θετικές τιμές έχουν φορά προς το εξωτερικό της στροφής.

Το υπόμνημα που θα χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα τεστ στη συνέχεια είναι το εξής:



Παραθέτω αρχικά το διάγραμμα της πλευρικής δύναμης που παράγει το εμπρός αριστερό ελαστικό συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης.Επέλεξα να μελετήσω το εμπρός αριστερό ελαστικό,καθώς η στροφή είναι δεξιά,και είναι το ελαστικό που φορτίζεται περισσότερο,και έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά σε πλευρική δύναμη στον μπροστινό άξονα.



1000.0
0.0
-1000.0
-2000.0
-3000.0
-4000.0
-5000.0
Lateral Force (newton)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration(G's)

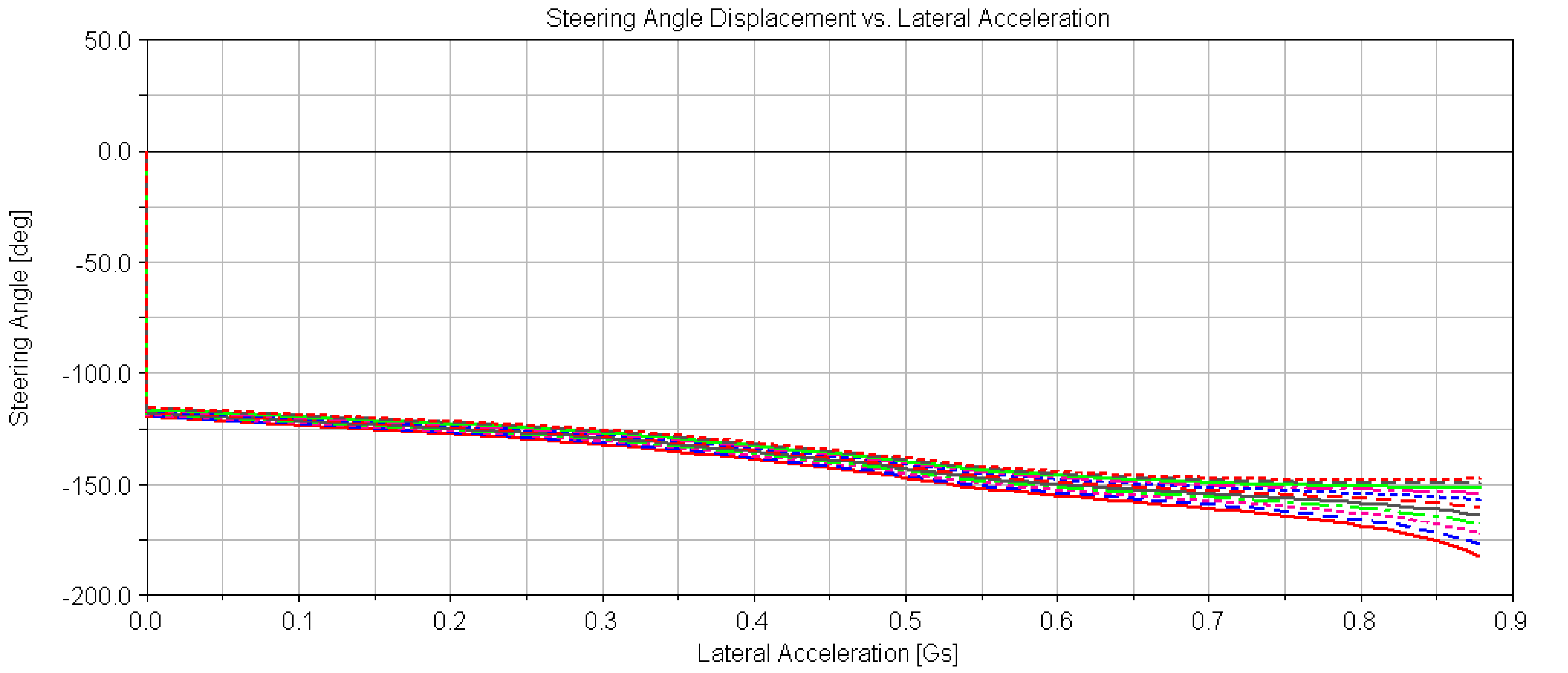
Παρατηρούμε ακριβώς αυτό που περιμέναμε με βάση τη θεωρία.

Όσο η γωνία camber ελαττώνεται και από θετικές τιμές περνάει σε αρνητικές,τόσο η πλευρική δύναμη που παράγει το ελαστικό αυξάνεται,και το φαινόμενο είναι εντονότερο όσο μεγαλώνει η πλευρική επιτάχυνση,και άρα η γωνία ολίσθησης και η κάθετη φόρτιση.Όπως ακριβώς περιγράφει η θεωρία,όταν το ελαστικό έχει κλίση προς το εσωτερικό της στροφής,η πλευρική δύναμη εξαιτίας της γωνίας camber προστίθεται σε αυτήν που θα παρήγαγε το ελαστικό εάν ήταν επίπεδο.

Επίσης παρατηρούμε πως για πολύ έντονες θετικές γωνίες camber,και για μικρές έως αμελητέες πλευρικές επιταχύνσεις,το ελαστικό παράγει μία μικρή δύναμη προς το εξωτερικό της στροφής(θετικές τιμές),προς την κατεύθυνση δηλαδή της κλίσης του.Στη συνέχεια και όσο αυξάνεται η πλευρική επιτάχυνση,λόγω της βύθισης της ανάρτησης,η γωνία camber του εξωτερικού τροχού μειώνεται σταδιακά,και έτσι αλλάζει φορά η δύναμη και κοιτάζει προς το εσωτερικό της στροφής.

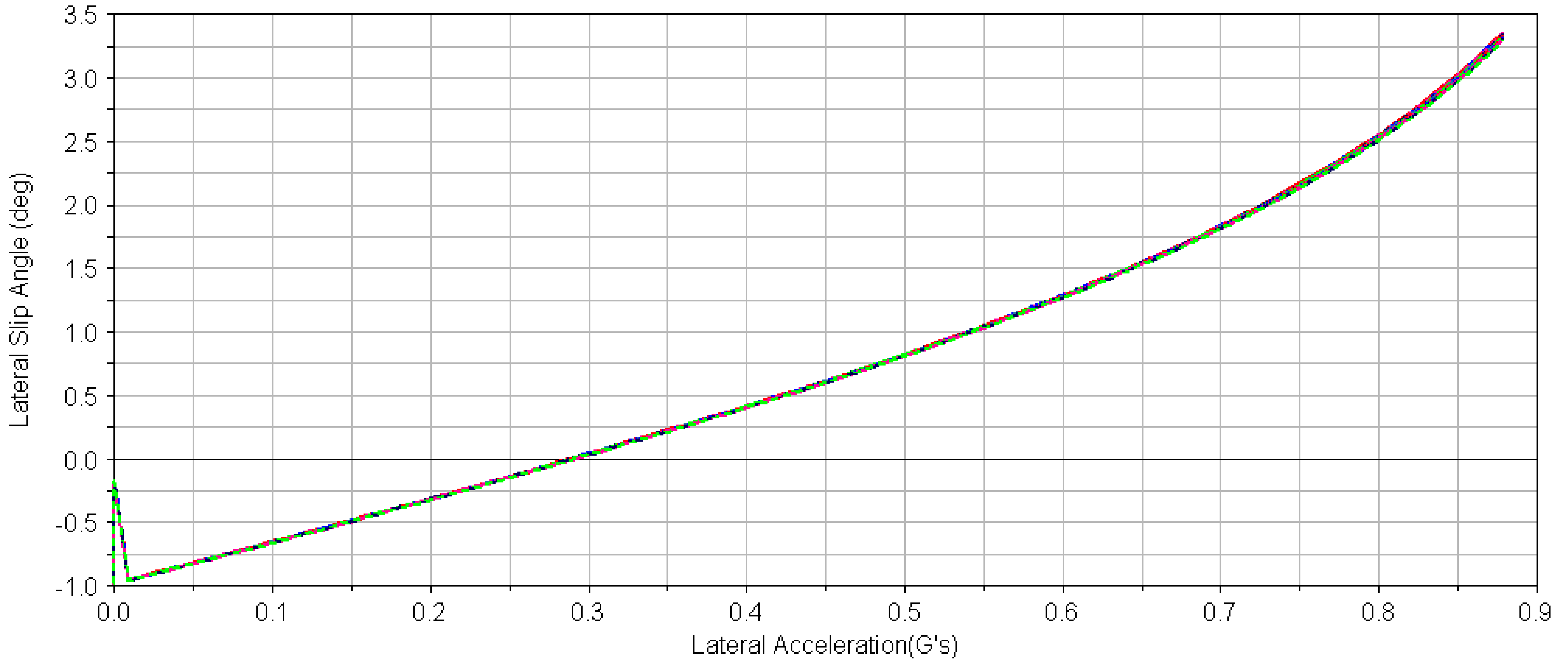
Τελικά συνοψίζοντας,όσο το camber έπαιρνε μικρότερες τιμές τόσο αυξανόταν η πλευρική δύναμη του ελαστικού,και άρα η πρόσφυση του εμπρός άξονα.

Στη συνέχεια παραθέτω το διάγραμμα της γωνίας του τιμονιού,συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης.Αυτό το διάγραμμα όπως είδαμε στη θεωρία χρησιμοποιείται για αξιολόγηση της υπο/υπερ-στροφικής συμπεριφοράς του αυτοκινήτου.


Steering Angle Displacement vs. Lateral Acceleration
50.0
0.0
-50.0
-100.0
-150.0
-200.0
Steering Angle [deg]
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration [Gs]

Παρατηρούμε,όπως περιμέναμε,πως όσο οι τιμές του camber μικραίνουν,τόσο το αυτοκίνητο γίνεται όλο και λιγότερο υποστροφικό.Αυτό είναι λογικό,καθώς όπως είδαμε,όσο μικραίνει η γωνία camber,τόσο περισσότερη πρόσφυση διαθέτει ο εμπρός άξονας,ενώ απ’τη στιγμή που στον πίσω άξονα δεν κάναμε καμία αλλαγή,τα ποσά πρόσφυσης που παράγει είναι περίπου σταθερά.

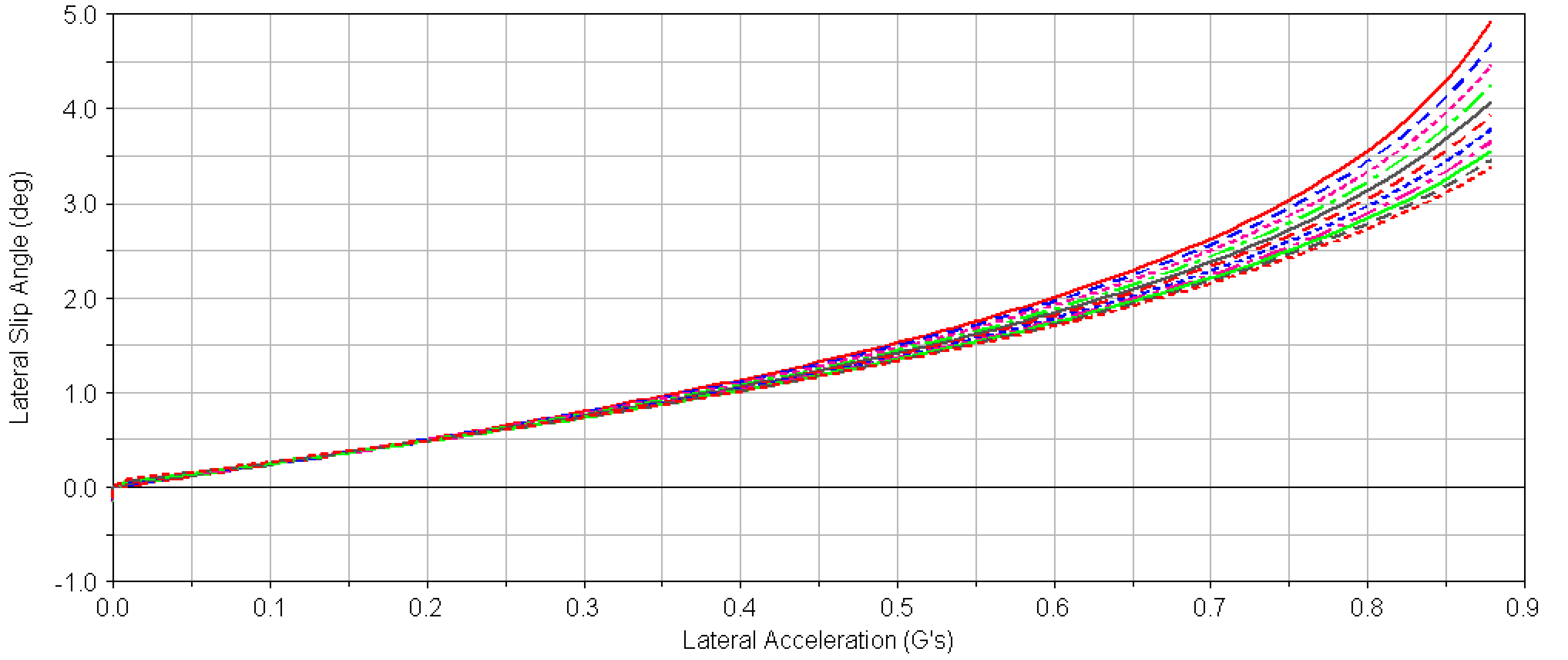
Για να ελέγξω τον παραπάνω ισχυρισμό,παραθέτω τα διαγράμματα των γωνιών ολίσθησης των εμπρός και πίσω αριστερών τροχών.



Lateral Slip Angle (deg)
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration(G's)

Πρώτα παρατηρούμε πως αφού στον πίσω άξονα η τιμή του camber ήταν πάντα ίδια,ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η γωνία ολίσθησης σε σχέση με την πλευρική επιτάχυνση,είναι σχεδόν ταυτόσημος.Άρα και η πλευρική δύναμη που παράγει το ελαστικό είναι ίδια κάθε φορά.

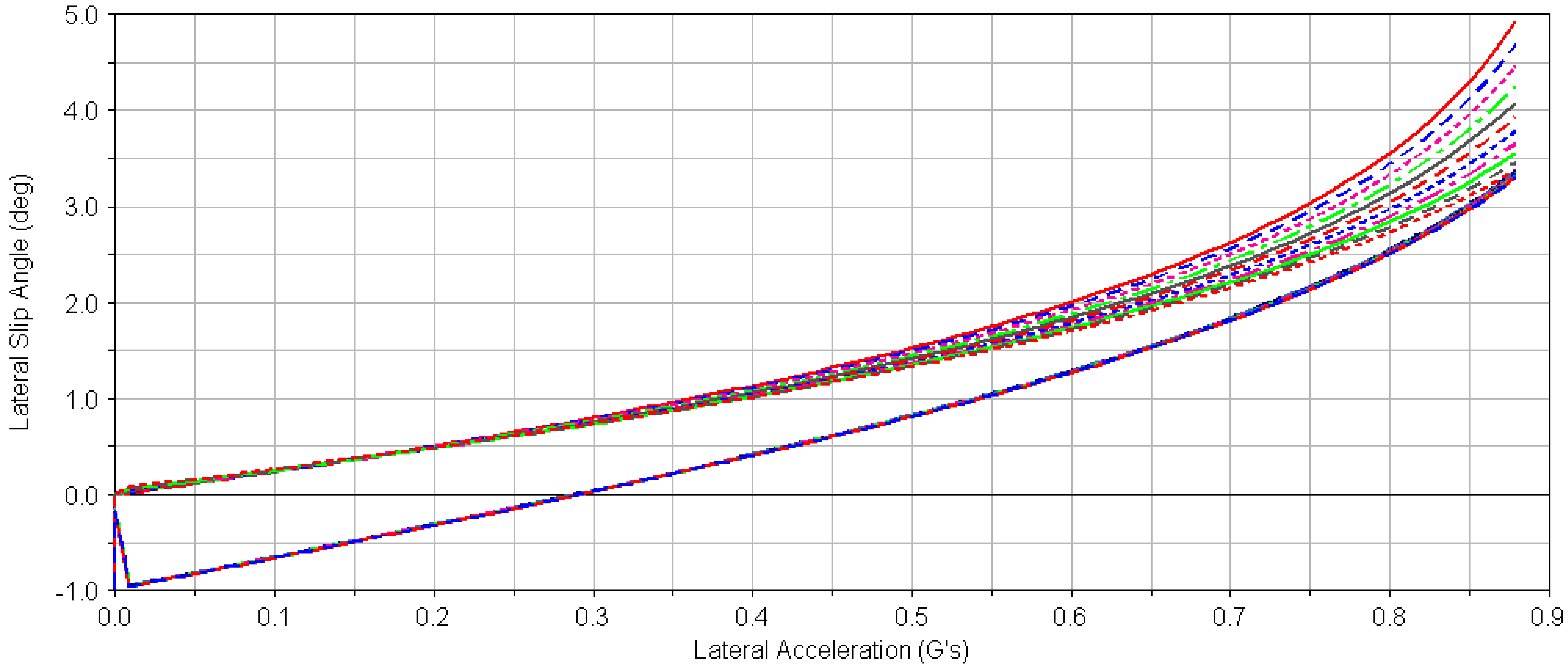
Στη συνέχεια παραθέτω το διάγραμμα της γωνίας ολίσθησης του εμπρός αριστερού τροχού,σε συνάρτηση με την πλευρική επιτάχυνση.



5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
-1.0
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration (G's)

Παρατηρούμε πως όσο ελαττώνεται η γωνία camber,τόσο μειώνονται οι τιμές οι οποίες παίρνει η γωνία ολίσθησης συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης.Άρα τόσο η διαφορά μεταξύ της εμπρός και της πίσω γωνίας ολίσθησης μικραίνει,κάτι που στη θεωρία είδαμε ότι σημαίνει λιγότερη υποστροφή.

Παραθέτω στο ίδιο διάγραμμα τη μεταβολή των εμπρός και πίσω γωνιών ολίσθησης σε συνάρτηση με την πλευρική επιτάχυνση,για να φανεί καλύτερα πως μικραίνει η διαφορά μεταξύ τους,όσο μικραίνει η γωνία camber.

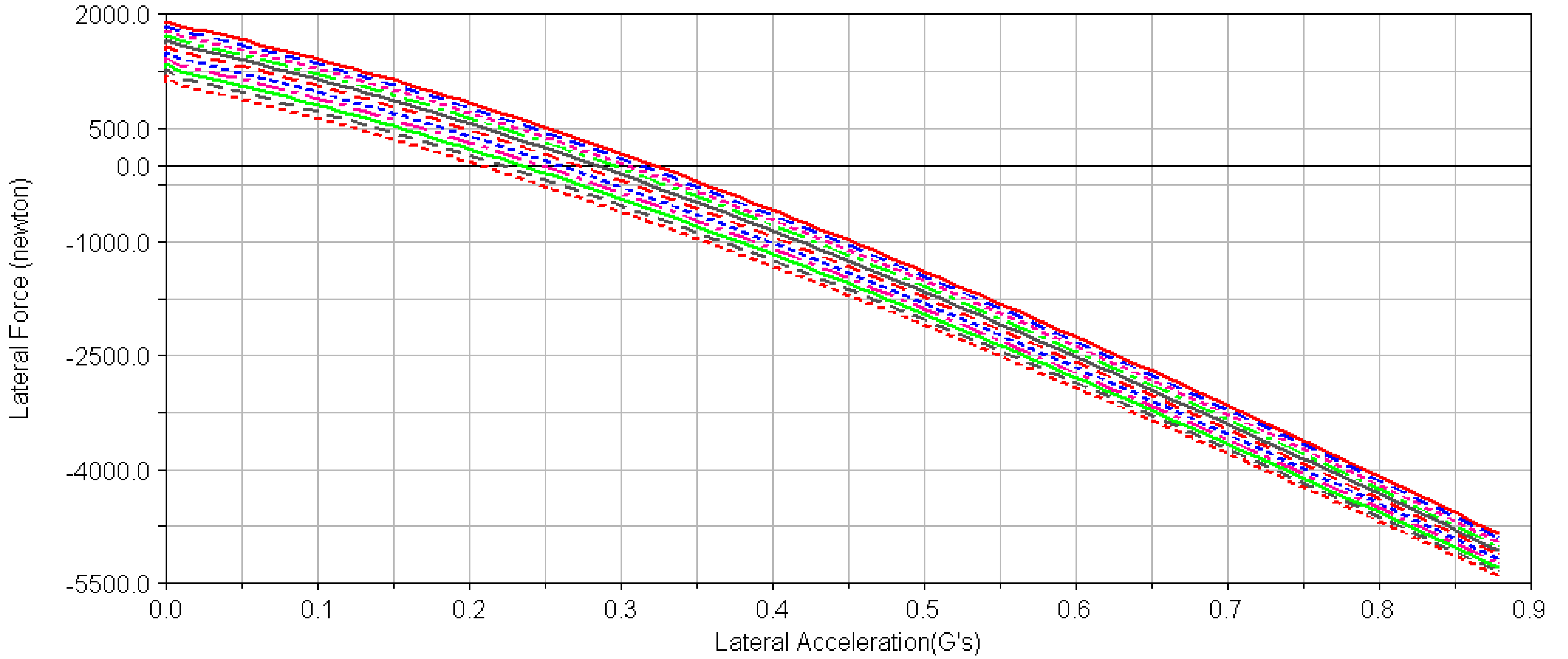


5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
-1.0
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration (G's)

Στη συνέχεια θα διατηρήσουμε σταθερή την γωνία camber των εμπρός τροχών στις 0^o,και θα μεταβάλλουμε την γωνία camber των πίσω τροχών,ξεκινώντας από $+5^o$,έως τις -5^o,με βήμα -1^o.

Παραθέτω αρχικά το διάγραμμα της πλευρικής δύναμης που παράγει το πίσω αριστερό ελαστικό συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης.Επέλεξα να μελετήσω το πίσω αριστερό ελαστικό,καθώς η στροφή είναι δεξιά,και έτσι είναι το ελαστικό του πίσω άξονα που φορτίζεται περισσότερο,και έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά σε πλευρική δύναμη στον άξονα αυτό,ο οποίος είναι κ ο άξονας που μας ενδιαφέρει στην διερεύνηση που διεξάγουμε.

Το μετρητικό όργανο μετράει την αντίδραση της δύναμης που ασκεί το ελαστικό στο δρόμο,έτσι αρνητικές είναι οι τιμές με φορά προς το εσωτερικό της στροφής,ενώ οι θετικές τιμές έχουν φορά προς το εξωτερικό της στροφής.

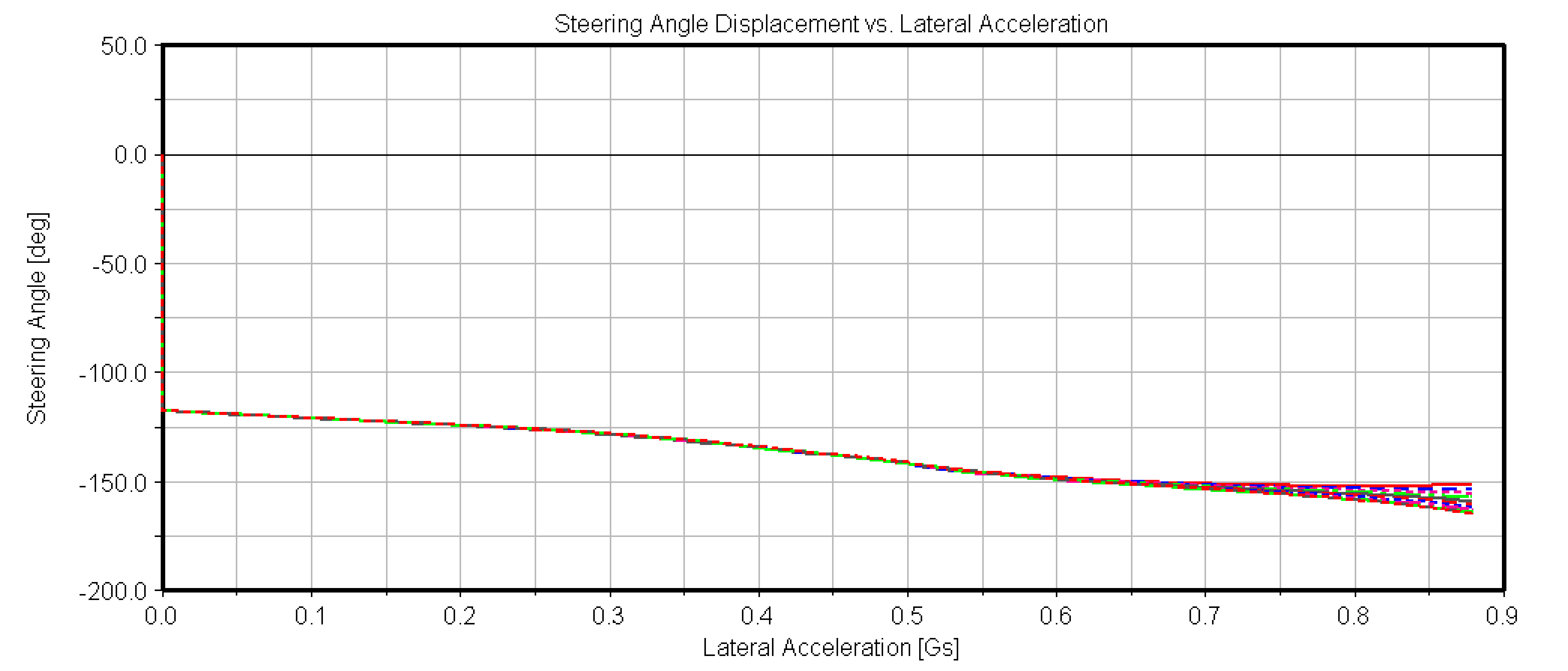


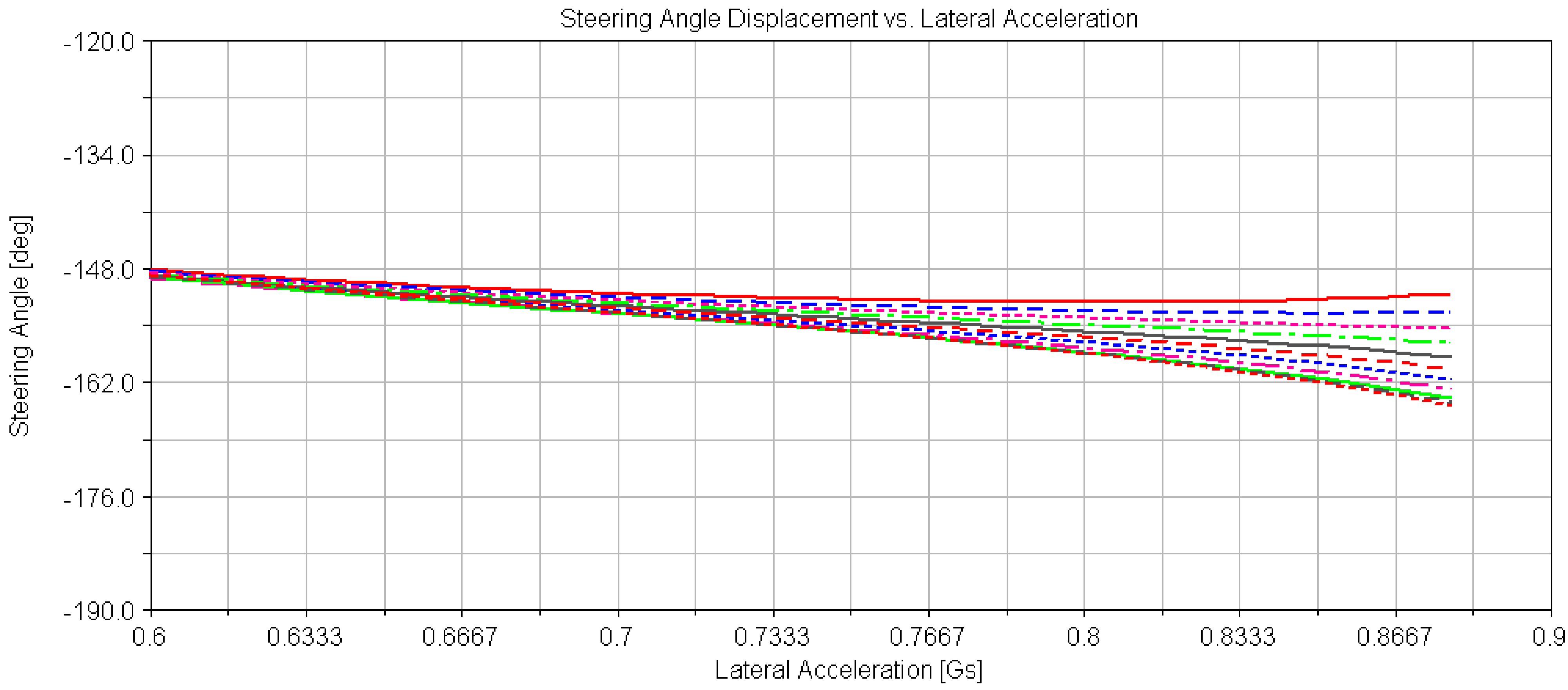
2000.0
500.0
0.0
-1000.0
-2500.0
-4000.0
-5500.0
Lateral Force (newton)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration(G's)

Αρχικά παρατηρούμε πως για μικρές πλευρικές επιταχύνσεις,και άρα μικρές ταχύτητες,ο εξωτερικός πίσω τροχός παράγει μία δύναμη προς το εξωτερικό της στροφής.Αυτό οφείλεται σε έντονη απόκλιση των πίσω τροχών,και είναι ένα φαινόμενο που θα εξηγήσουμε αργότερα.Παρατηρούμε επίσης πως για αυτές τις μικρές ταχύτητες,όσο πιο θετική είναι η τιμή του κάμπερ,τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προς το εξωτερικό της στροφής,πράγμα λογικό,καθώς όπως είδαμε το ελαστικό έχει την τάση να παράγει μία πλευρική δύναμη επιπλέον,η οποία οφείλεται στο κάμπερ,με φορά ίδια με αυτήν της κλίσης του.Οπότε για θετικό κάμπερ(η κλίση του ελαστικού είναι προς το εξωτερικό της στροφής),η δύναμη αθροίζεται σε αυτήν που οφείλεται στην έντονη απόκλιση,και βγάζει μεγαλύτερη συνισταμένη από ότι για αρνητικές τιμές κάμπερ.

Βλέπουμε πως η πλευρική δύναμη που παράγει το ελαστικό αυξάνεται όσο το camber παίρνει μικρότερες τιμές,όπως περιμέναμε.Άρα ο πίσω άξονας έχει περισσότερη πρόσφυση όσο το camber ελαττώνεται.

Στη συνέχεια παραθέτω το διάγραμμα της γωνίας του τιμονιού,συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης.Αυτό το διάγραμμα όπως είδαμε στη θεωρία χρησιμοποιείται για αξιολόγηση της υπο/υπερ-στροφικής συμπεριφοράς του αυτοκινήτου.


Steering Angle Displacement vs. Lateral Acceleration
50.0
0.0
-50.0
-100.0
-150.0
-200.0
Steering Angle [deg]
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration [Gs]

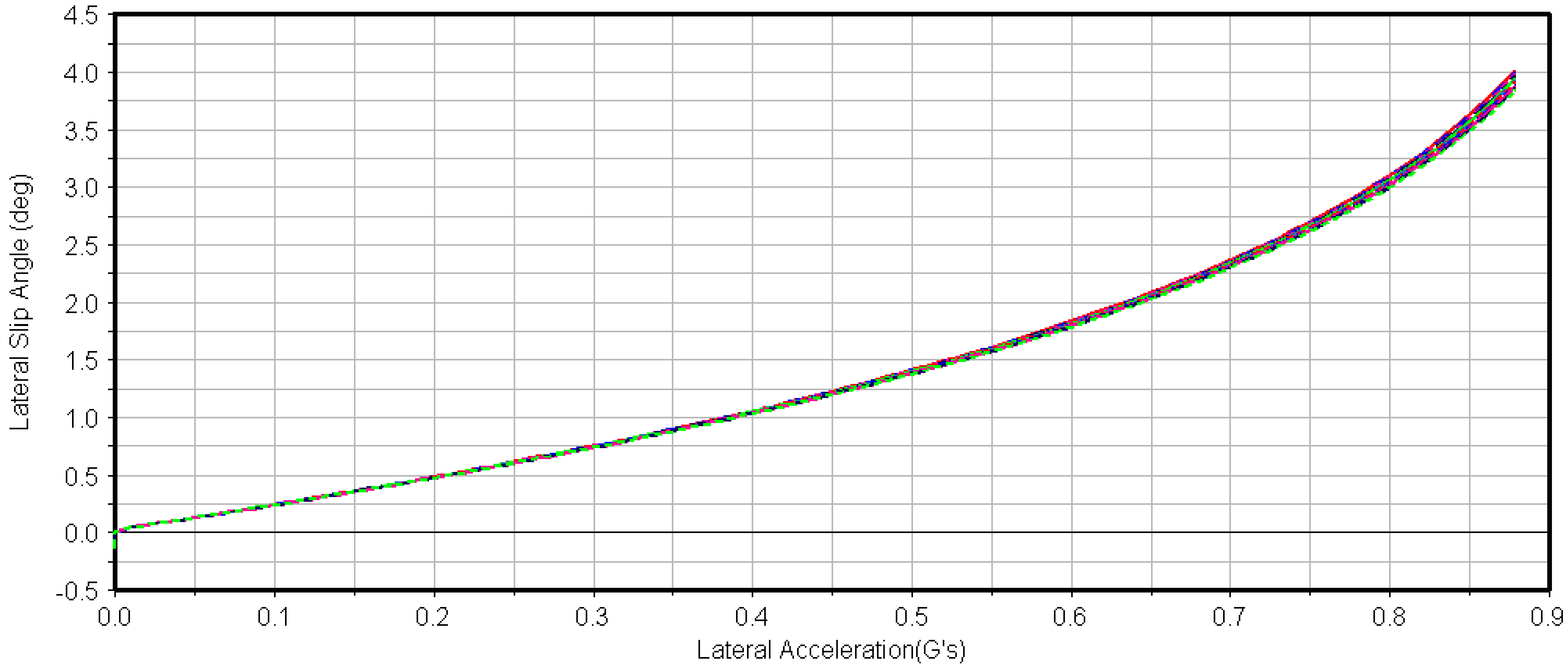


Steering Angle Displacement vs. Lateral Acceleration
Steering Angle [deg]
-120.0
-134.0
-148.0
-162.0
-176.0
-190.0
0.6
0.6333
0.6667
0.7
0.7333
0.7667
0.8
0.8333
0.8667
0.9
Lateral Acceleration [Gs]

Όσο οι τιμές της πλευρικής επιτάχυνσης είναι μικρές,η τιμή της γωνίας του τιμονιού είναι σχεδόν ίδια ανεξάρτητα της γωνίας camber.Διαφορές παρατηρούμε μόνο όσο η πλευρική επιτάχυνση αυξάνει.

Τότε είναι ευδιάκριτο πως όσο το camber στον πίσω άξονα ελαττώνεται,τόσο η γωνία του τιμονιού είναι απαραίτητο να αυξηθεί ώστε να διατηρηθεί η ακτίνα της τροχιάς ίδια.Άρα το αυτοκίνητο γίνεται περισσότερο υποστροφικό,όσο μικραίνει η γωνία camber,πράγμα που περιμέναμε.Αυτό συμβαίνει αφού όπως είδαμε όσο ελαττώνεται η γωνία camber στους πίσω τροχούς,τόσο αυξάνεται η πρόσφυση αυτού του άξονα.Η πρόσφυση του εμπρός άξονα είναι πάντα σταθερή.Άρα το αυτοκίνητο τείνει να υποστρέψει.

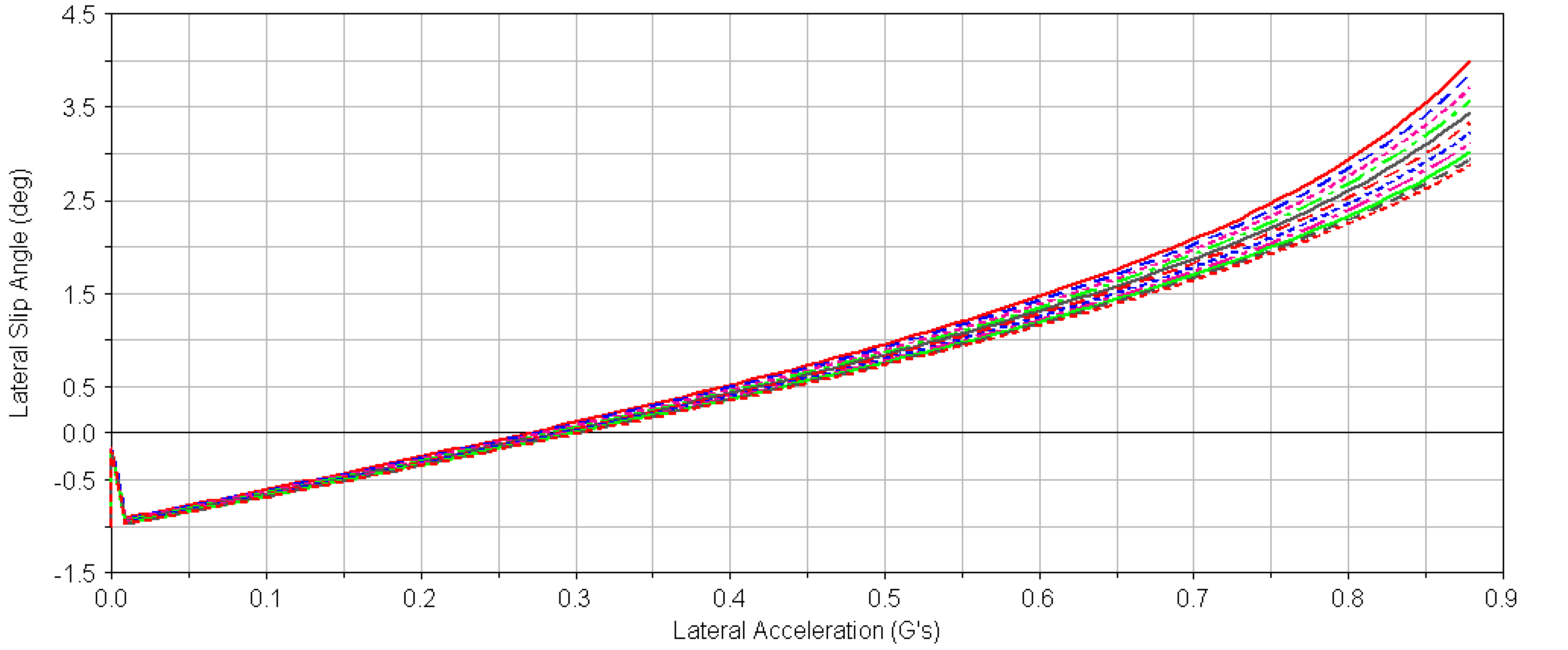
Για να ελέγξω τον παραπάνω ισχυρισμό,παραθέτω τα διαγράμματα των γωνιών ολίσθησης των εμπρός και πίσω αριστερών τροχών.



Lateral Slip Angle (deg)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration(G's)

Πρώτα παρατηρούμε πως αφού στον εμπρός άξονα η τιμή του camber ήταν πάντα ίδια,ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η γωνία ολίσθησης σε σχέση με την πλευρική επιτάχυνση,είναι σχεδόν ταυτόσημος.Άρα και η πλευρική δύναμη που παράγει το ελαστικό είναι ίδια κάθε φορά.

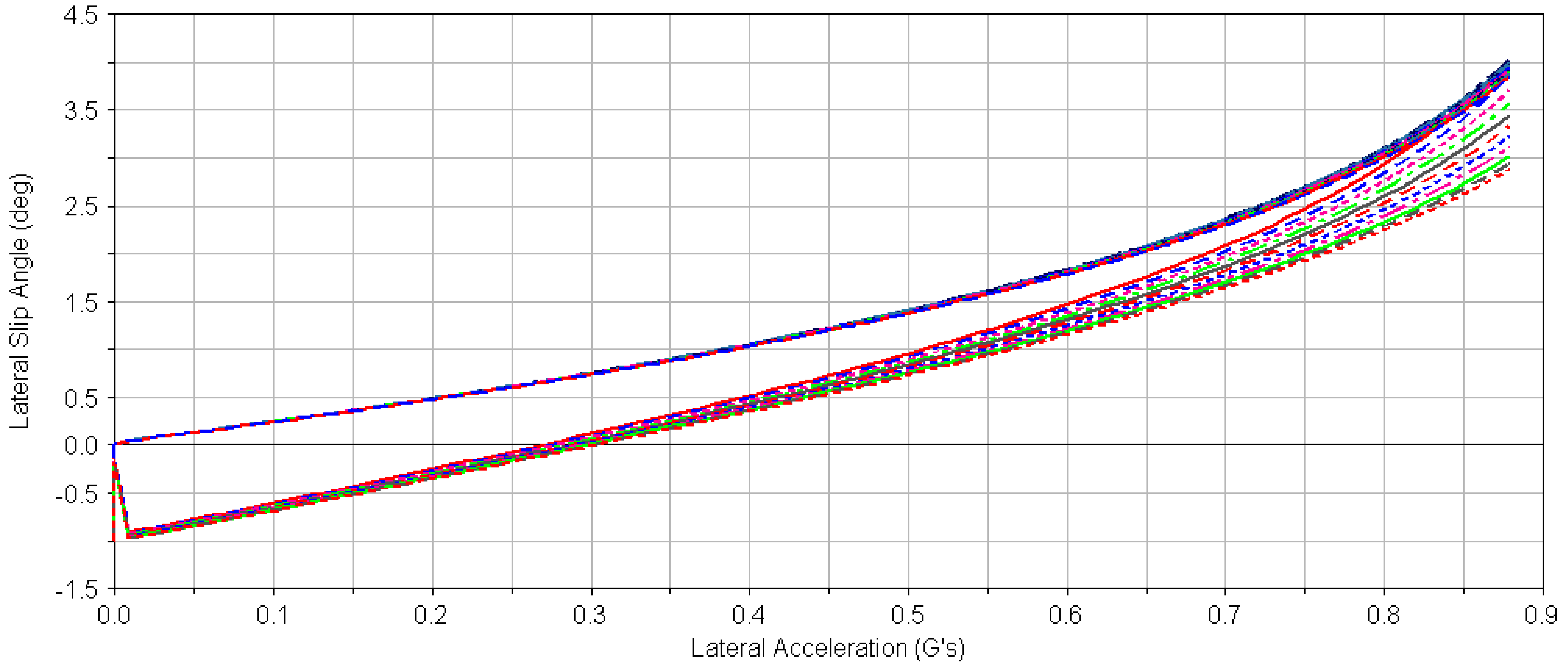
Στη συνέχεια παραθέτω το διάγραμμα της γωνίας ολίσθησης του πίσω αριστερού τροχού,σε συνάρτηση με την πλευρική επιτάχυνση.



4.5
3.5
2.5
1.5
0.5
0.0
-0.5
-1.5
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration (G's)

Παρατηρούμε πως όσο ελαττώνεται η γωνία camber,τόσο μειώνονται οι τιμές οι οποίες παίρνει η γωνία ολίσθησης συναρτήσει της πλευρικής επιτάχυνσης.Άρα τόσο η διαφορά μεταξύ της εμπρός και της πίσω γωνίας ολίσθησης μεγαλώνει,κάτι που στη θεωρία είδαμε ότι σημαίνει περισσότερη υποστροφή.

Παραθέτω στο ίδιο διάγραμμα τη μεταβολή των εμπρός και πίσω γωνιών ολίσθησης σε συνάρτηση με την πλευρική επιτάχυνση,για να φανεί καλύτερα πως μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ τους,όσο μικραίνει η γωνία camber.

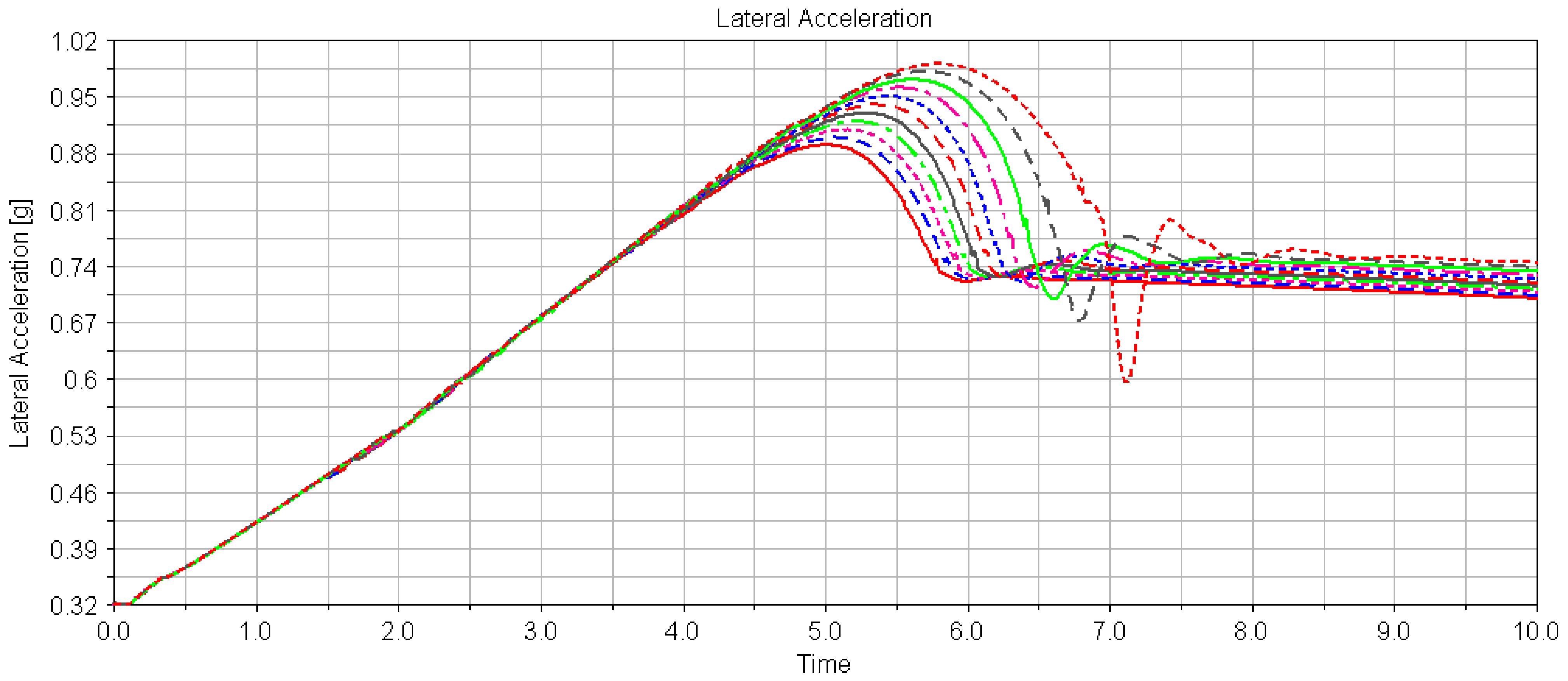


4.5
3.5
2.5
1.5
0.5
0.0
-0.5
-1.5
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
Lateral Acceleration (G's)

Για την επόμενη δοκιμή,το αυτοκίνητο θα κινηθεί ξανά σε κυκλική τροχιά 30 μέτρων,με τον οδηγό να προσπαθεί να διατηρήσει το αυτοκίνητο πάνω στην επιλεγμένη αυτή διαδρομή,επιταχύνοντας διαρκώς,σύμφωνα με τις δυνατότητες πρόσφυσης που του δίνει κάθε φορά η ρύθμιση στην ανάρτηση του αυτοκινήτου.Το τεστ θα σταματήσει όταν το αυτοκίνητο δεν μπορεί πια να διατηρήσει την καθορισμένη τροχιά.Η επιτάχυνση ξεκινά στα 35 km/h και ολοκληρώνεται στα 90 km/h.

Με όμοιο τρόπο θα διατηρήσουμε σταθερή την γωνία camber των πίσω τροχών στις 0^o,και θα μεταβάλλουμε την γωνία camber των εμπρός τροχών,ξεκινώντας από $+5^o$,έως τις -5^o,με βήμα -1^o.

Αρχικά παραθέτω το διάγραμμα της πλευρικής επιτάχυνσης συναρτήση του χρόνου.

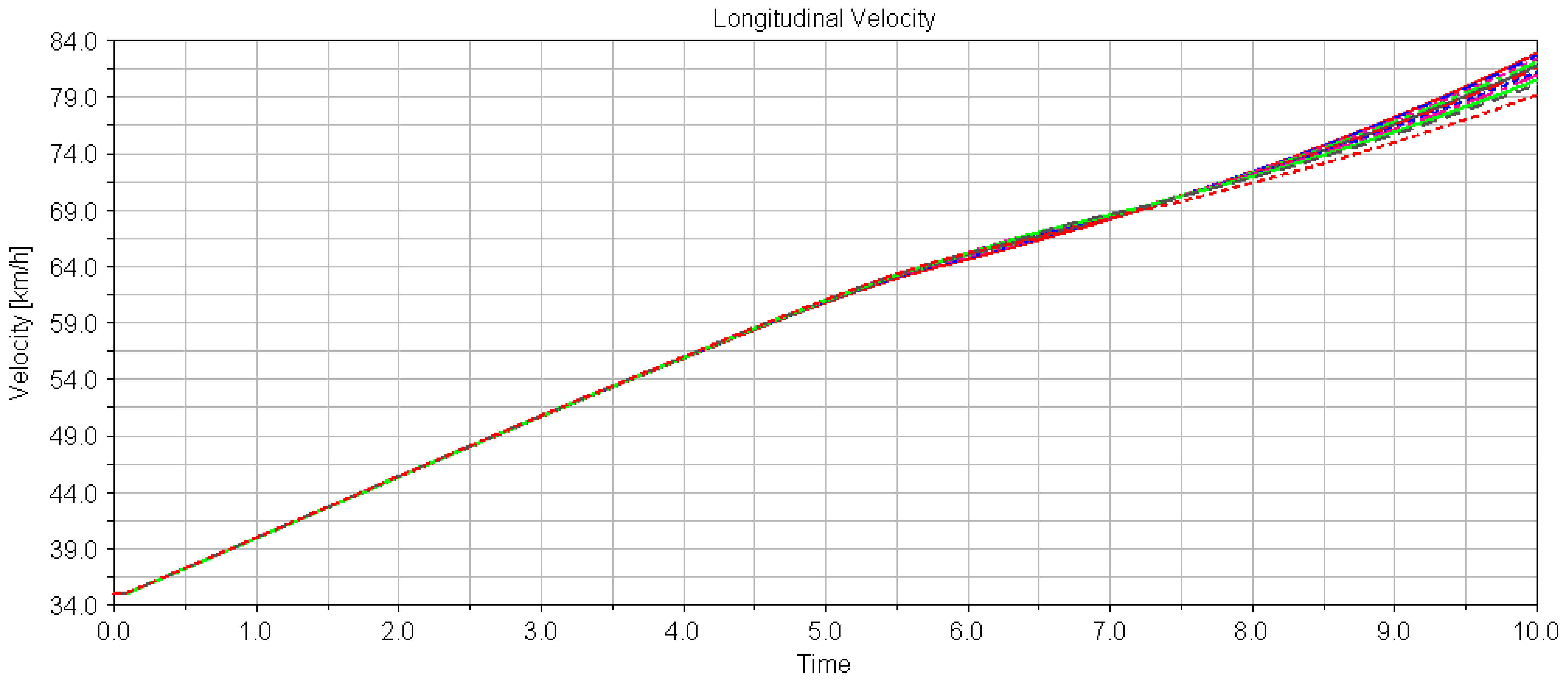


Lateral Acceleration
Lateral Acceleration [g]
1.02
0.95
0.88
0.81
0.74
0.67
0.6
0.53
0.46
0.39
0.32
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time

Παρατηρούμε πως η πλευρική επιτάχυνση αυξάνεται με το χρόνο,όσο ο οδηγός επιταχύνει,μέχρι που φτάνει στο μέγιστο,και ύστερα σταδιακά μειώνεται.Το μέγιστο της πλευρικής επιτάχυνσης είναι και το σημείο που το αυτοκίνητο έχει προσεγγίσει το όριο της πρόσφυσης,και από εκεί και πέρα εκτρέπεται από την τροχιά του.

Είναι φανερό πως όσο το camber παίρνει μικρότερες τιμές,τόσο το μέγιστο της πλευρικής πρόσφυσης που αναπτύσσει το αυτοκίνητο αυξάνεται,αλλά και μετατοπίζεται αριστερά.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα το διάγραμμα παραθέτω στη συνέχεια το διάγραμμα της ταχύτητας με το χρόνο.



Longitudinal Velocity
84.0
79.0
74.0
69.0
64.0
59.0
54.0
49.0
44.0
39.0
34.0
Velocity [km/h]
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time

Βλέπουμε πως από τη στιγμή που το αυτοκίνητο έχει την κίνηση πίσω,οι διαφορές στον ρυθμό αύξησης ταχύτητας είναι σχεδόν ταυτόσημες,καθώς οι πίσω τροχοί έχουν πάντα την ίδια ευθυγράμμιση.Στη συνέχεια θα κοιτάξουμε αναλυτικά τις τιμές πλευρικής επιτάχυνσης και ταχύτητας για να γίνουν πιο ευδιάκριτες οι διαφορές.

Χρόνος-Πλευρική Επιτάχυνση

Χρόνος	$+5^o$	-5^0
4.98	0.89	0.9336
4.99	0.89	0.9347
5.0	0.89	0.9358
5.01	0.89	0.9369
5.02	0.89	0.938
5.03	0.8899	0.9391
5.04	0.8898	0.9402
5.05	0.8896	0.9413
……	……	……
5.76	0.745	0.9906
5.77	0.7412	0.9907
5.78	0.7487	0.9907
5.79	0.7424	0.9908
5.8	0.7361	0.9908
5.81	0.7328	0.9907
5.82	0.7314	0.9907
5.83	0.7305	0.9906
5.84	0.7296	0.9906

Χρόνος-Ταχύτητα

Χρόνος	$+5^o$	-5^0
4.98	60.6962	60.8876
4.99	60.7425	60.9361
5.0	60.7887	60.9845
5.01	60.8347	61.0329
5.02	60.8807	61.0811
5.03	60.9266	61.1294
5.04	60.9723	61.1775
5.05	61.018	61.2256
……	……	……
5.76	63.8401	64.3124
5.77	63.8724	64.3491
5.78	63.9035	64.3856
5.79	63.9345	64.4218
5.8	63.9657	64.4578
5.81	63.9974	64.4936

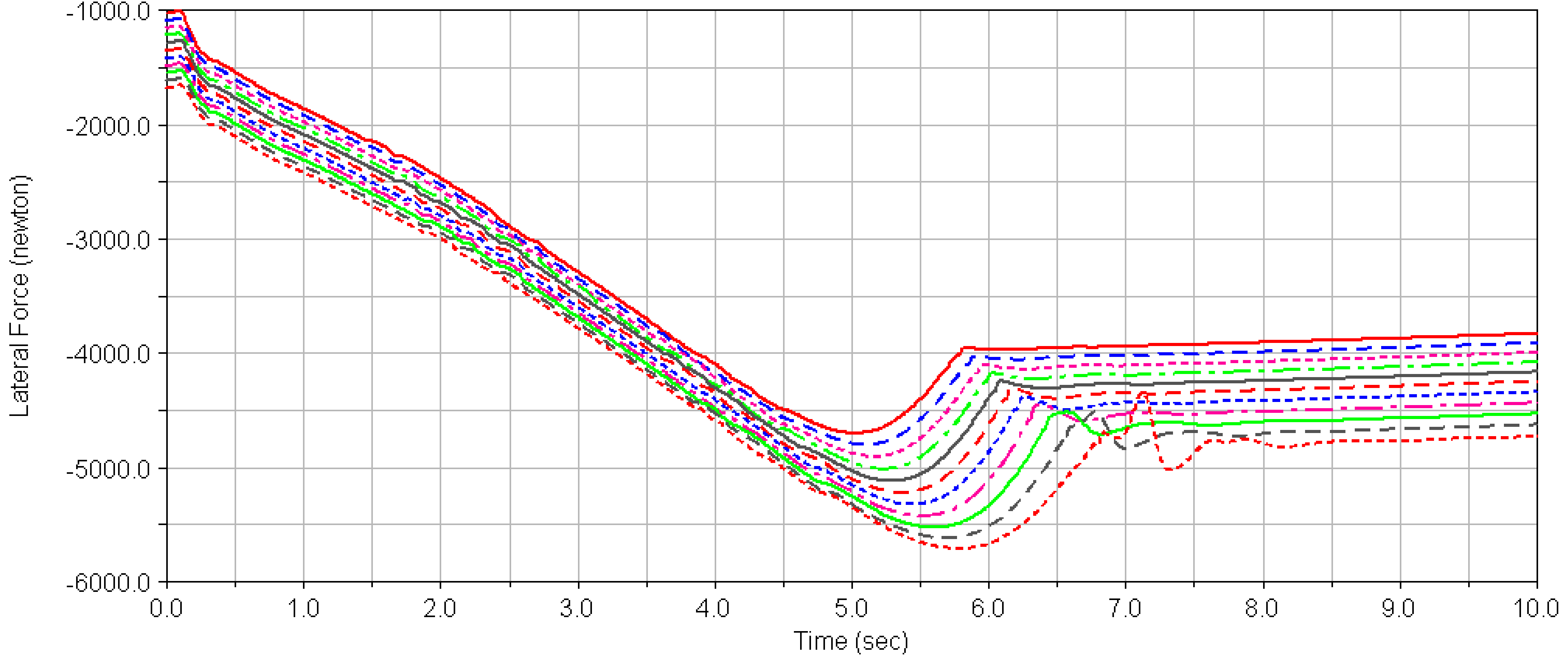
5.82	64.0291	64.529
5.83	64.0611	64.5643
5.84	64.0933	64.5992

Βλέπουμε πως για +5^o camber,το αυτοκίνητο φτάνει την μέγιστη τιμή της πλευρικής επιτάχυνσης(0,89g.) στα 5,02 sec. Έως εκείνη τη στιγμή έχει αναπτύξει 60,8807 km/h.

Για -5^o camber,το αυτοκίνητο επιτυγχάνει μέγιστο πλευρικής πρόσφυσης 0,9908 g. στα 5,8 sec.Έως εκείνη τη στιμή έχει καταφέρει να αναπτύξει 64,4578 km/h.

Παρατηρούμε πως με την αρνητική τιμή camber,το αυτοκίνητο ανέπτυξε αξιοσημείωτα μεγαλύτερη ταχύτητα και πλευρική επιτάχυνση,αφού είχε τη δυνατότητα να επιταχύνει για 0,78 sec περισσότερα,μέχρι να χάσει την πρόσφυση.Είναι φανερό πως όσο η τιμή του κάμπερ μικραίνει,τόσο είχαμε αύξηση της παραγόμενης πρόσφυσης στον μπροστινό άξονα.

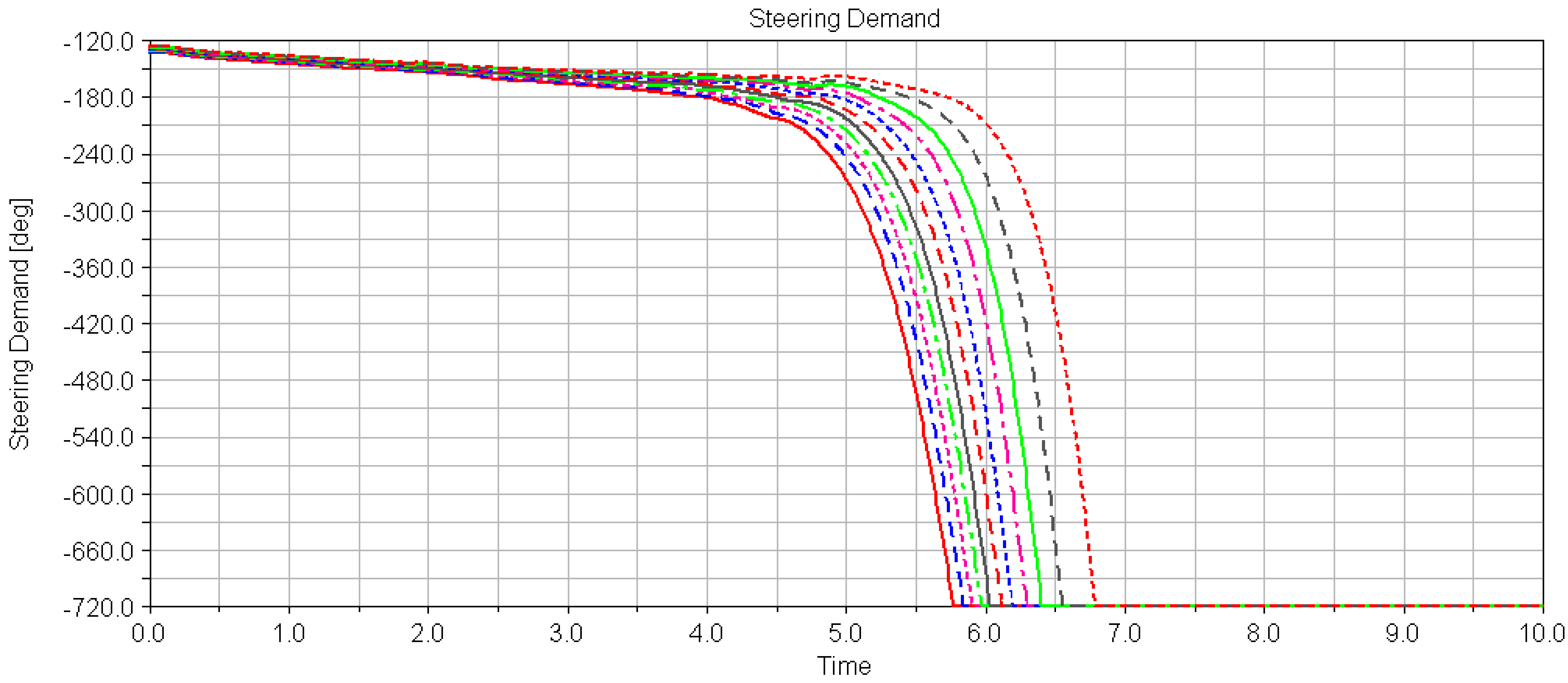
Το διάγραμμα πλευρικής δύναμης του εμπρός αριστερού τροχού(ο οποίος είναι αυτός που έχει το πιο δύσκολο έργο,καθώς η στροφή είναι δεξιά),σε συνάρτηση με το χρόνο,δείχνει ακριβώς αυτό.



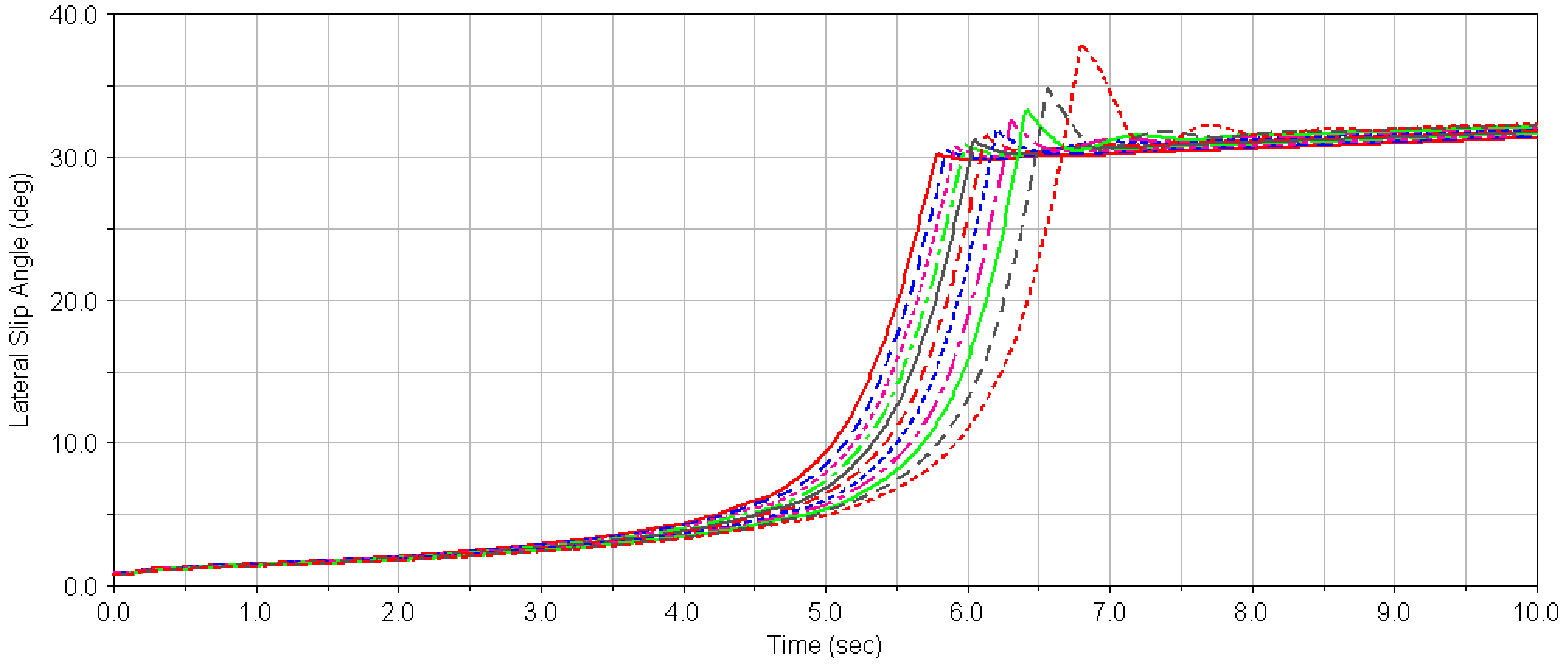
Lateral Force (newton)
-1000.0
-2000.0
-3000.0
-4000.0
-5000.0
-6000.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)

Παρατηρούμε ότι η πλευρική δύναμη που παράγει το ελαστικό μεγαλώνει,όσο μειώνεται η τιμή του κάμπερ,όπως ακριβώς είδαμε στην θεωρία.

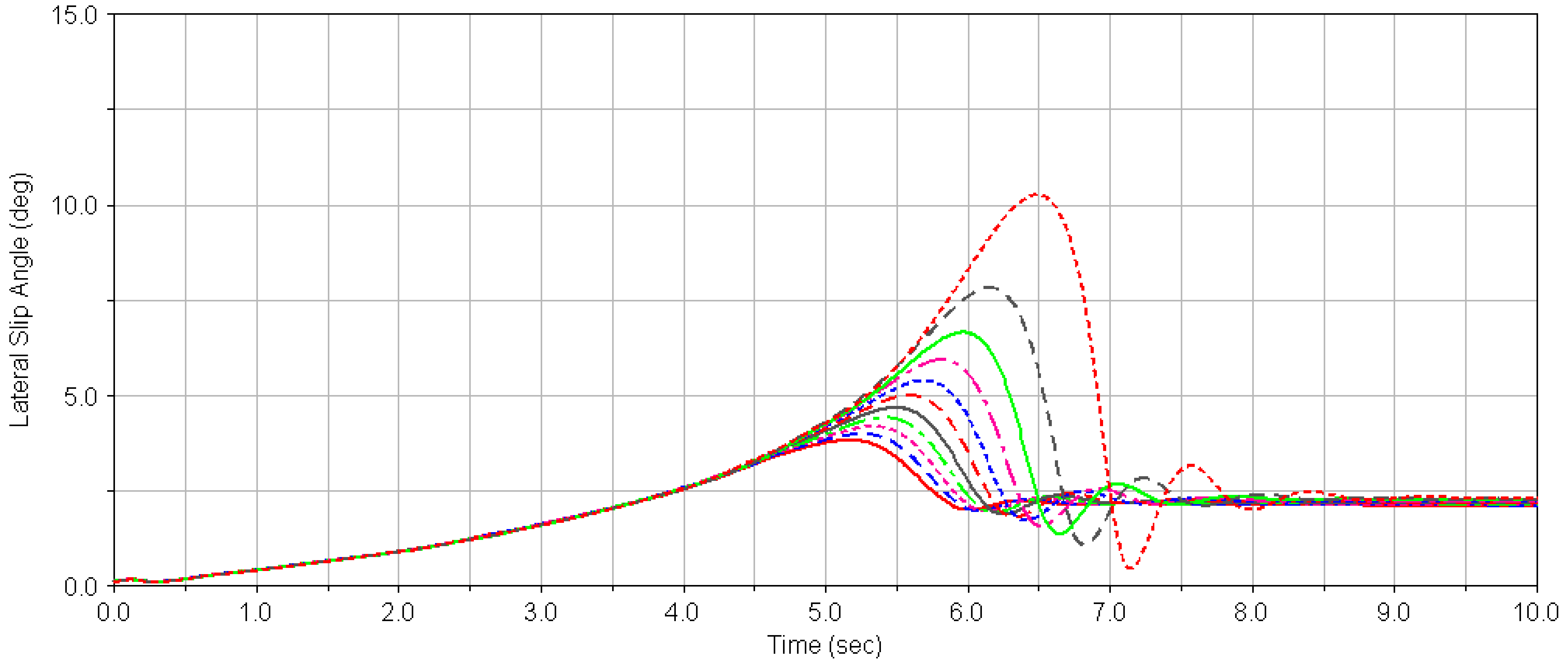
Στο διάγραμμα της γωνίας του τιμονιού με το χρόνο,βλέπουμε αυτό που περιμέναμε.Αφού η δυνατότητα παραγωγής πρόσφυσης του πίσω άξονα είναι σταθερή σε κάθε δοκιμή,ενώ η πρόσφυση του εμπρός άξονα αυξάνεται όσο μειώνεται το κάμπερ,βλέπουμε πως το αυτοκίνητο γίνεται περισσότερο υπερστροφικό και χρειάζεται μικρότερη γωνία στο τιμόνι,όσο το κάμπερ παίρνει μικρότερες τιμές.

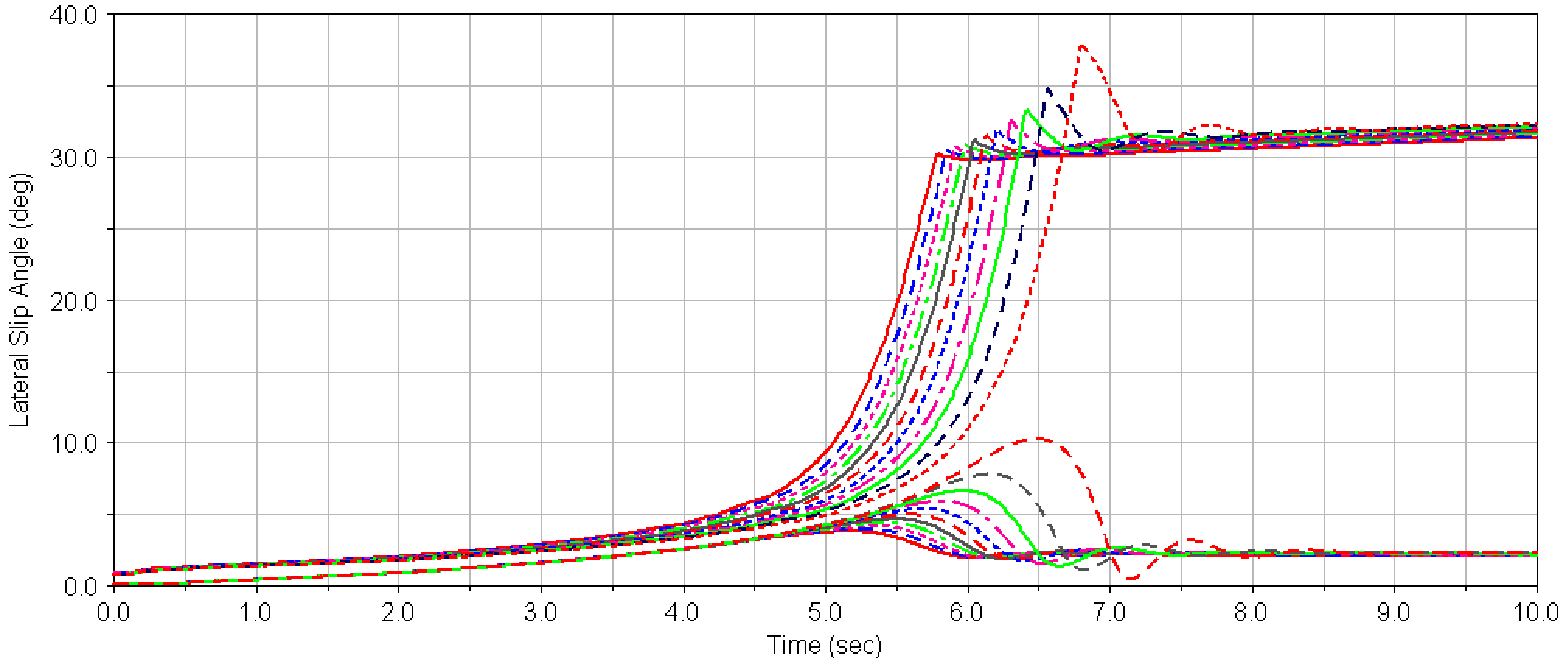

Steering Demand
Steering Demand [deg]
-120.0
-180.0
-240.0
-300.0
-360.0
-420.0
-480.0
-540.0
-600.0
-660.0
-720.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time

Το τελευταίο συμπέρασμα έρχονται να στηρίξουν ακόμα περισσότερο τα διαγράμματα της γωνίας ολίσθησης του εμπρός και πίσω αριστερού τροχού.



40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)


15.0
10.0
5.0
0.0
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)



40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
Lateral Slip Angle (deg)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)

Όταν τα παραβάλλουμε και τα 2 μάζι,είναι φανερό πως όσο το κάμπερ παίρνει αρνητικές τιμές,τόσο μειώνεται η διαφορά της εμπρός από της πίσω γωνίας ολίσθησης,που όπως είδαμε σημαίνει λιγότερη υποστροφή.

Για την γωνία ολίσθησης του πίσω άξονα,βλέπουμε πως αφού έχουμε πάντα την ίδια γωνία κάμπερ,μέχρι τα 5 sec περίπου που σε όλες τις περιπτώσεις βρισκόμαστε κάτω από τα όρια της πρόσφυσης,οι καμπύλες είναι ταυτόσημες.Από εκεί και πέρα διαφοροποιούνται,γιατί οι θετικές τιμές κάμπερ αρχίζουν η μία μετά την άλλη να φτάνουν στα όρια τους και να χάνουν την πρόσφυση-άρα και οι γωνίες ολίσθησης αρχίζουν να μειώνονται,ενώ όσο μικραίνουν οι τιμές κάμπερ,τόσο η γωνία ολίσθησης αυξάνεται για περισσότερο χρόνο,μέχρι τελικά να χαθεί η πρόσφυση και να αρχίσει να πέφτει.

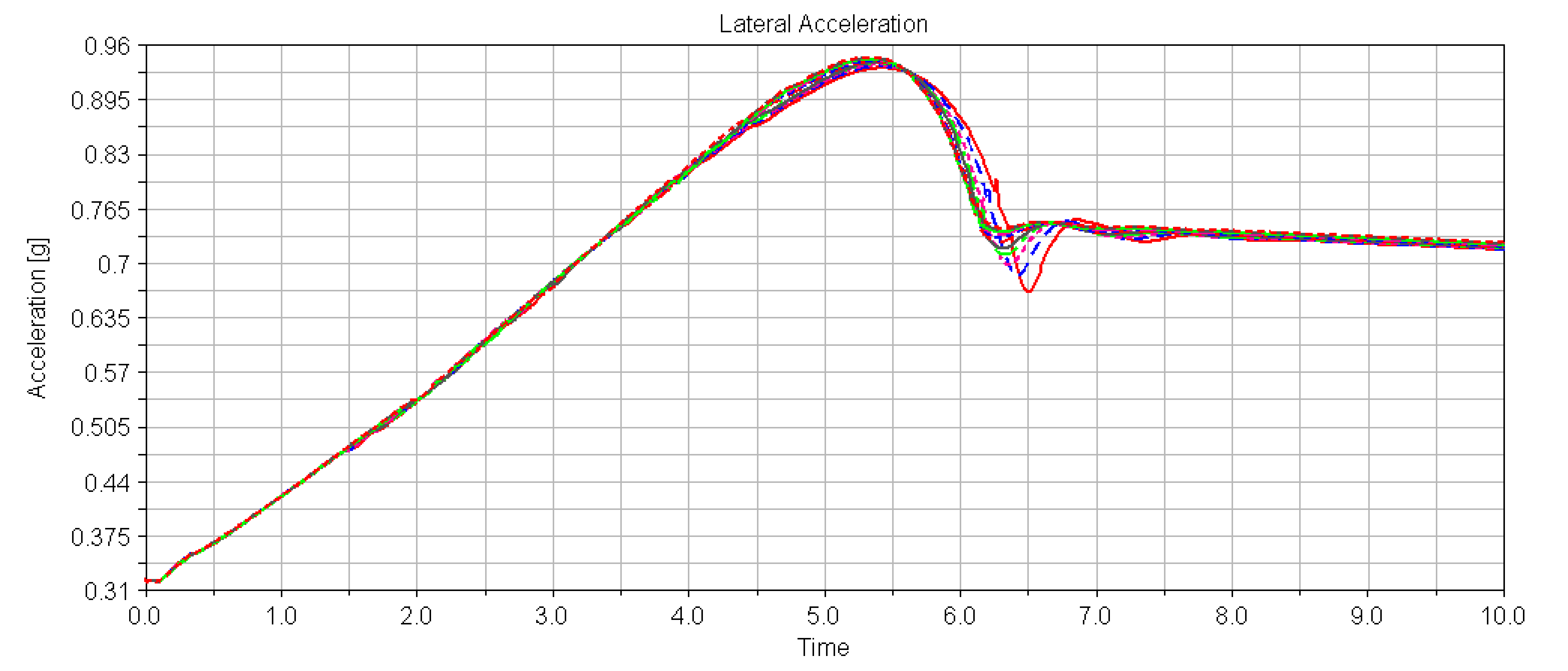
Παρ όλα αυτά είναι ευδιάκριτο πως η διαφορά μεταξύ εμπρός και πίσω γωνίας ολίσθησης μειώνεται,όσο μειώνεται η γωνία κάμπερ.

Είδαμε λοιπόν για άλλη μία φορά,πως η πρόσφυση του άξονα στον οποίο μεταβάλλαμε την τιμή κάμπερ,αυξανόταν όσο μειώναμε την εν λόγω γωνία.

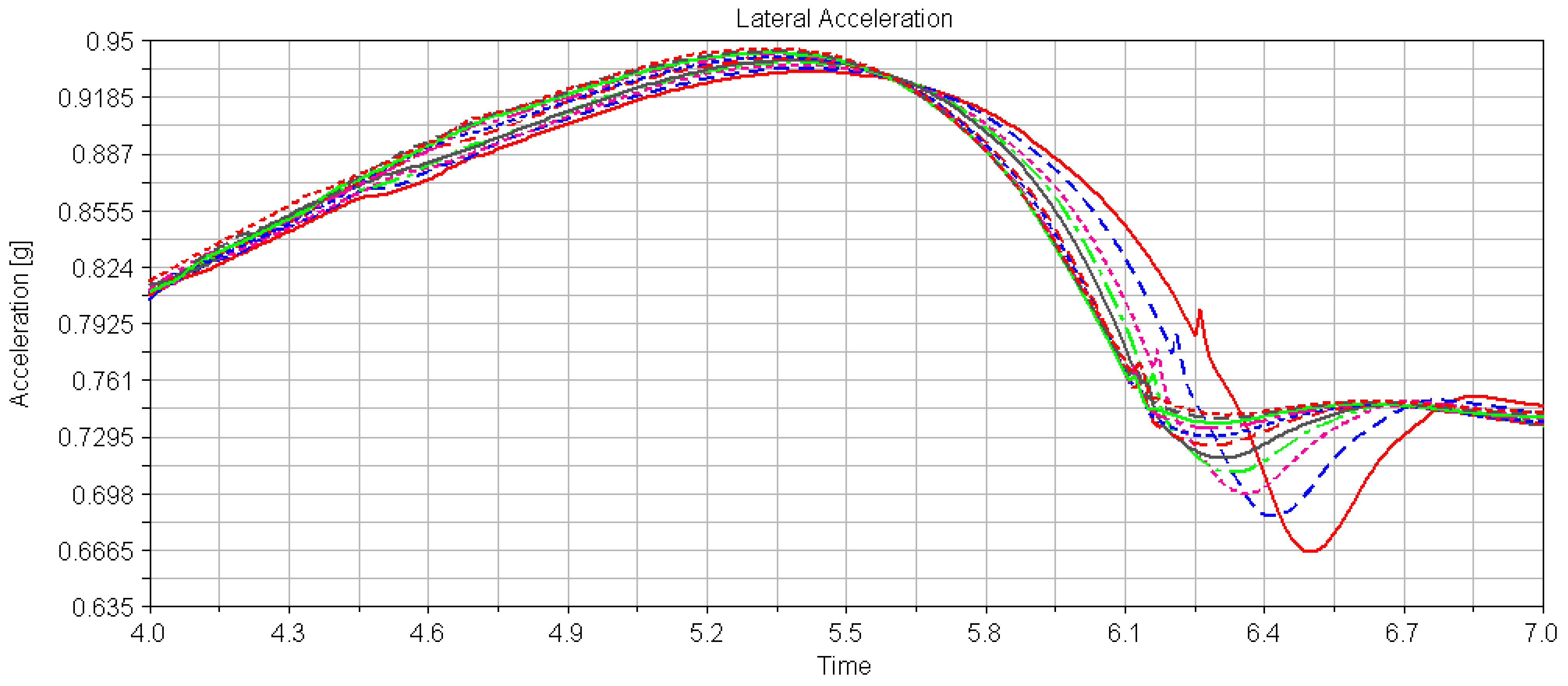
Τώρα θα επαναλάβουμε την διαδικασία αλλά για τον πίσω άξονα.Θα διατηρήσουμε σταθερή την γωνία camber των εμπρός τροχών στις 0^o,και θα μεταβάλλουμε την γωνία camber των πίσω τροχών,ξεκινώντας από $+5^o$,έως τις -5^o,με βήμα -1^o.

Παραθέτω το διάγραμμα της πλευρικής επιτάχυνσης με τον χρόνο.

Επειδή στο συγκεκριμένο αυτοκίνητο που μελετάμε,τα πίσω λάστιχα είναι σημαντικά φαρδύτερα από τα εμπρός,ο άξονας που χάνει πρώτος την πρόσφυση είναι ο μπροστά.Έτσι αφού τώρα οι τιμές της ευθυγράμμισης του εμπρός άξονα είναι σταθερές,κάθε φορά η πρόσφυση χάνεται για πολύ κοντινές τιμές χιλιομέτρων ανά ώρα και οι διαφορές στην πλευρική επιτάχυνση είναι δυσδιάκριτες.Γι αυτό θα απομωνόσουμε τις τιμές μεταξύ 4 και 7 sec,όπου το αυτοκίνητο προσεγγίζει τα όρια του,για να δούμε πιο εύκολα τις όποιες διαφορές.



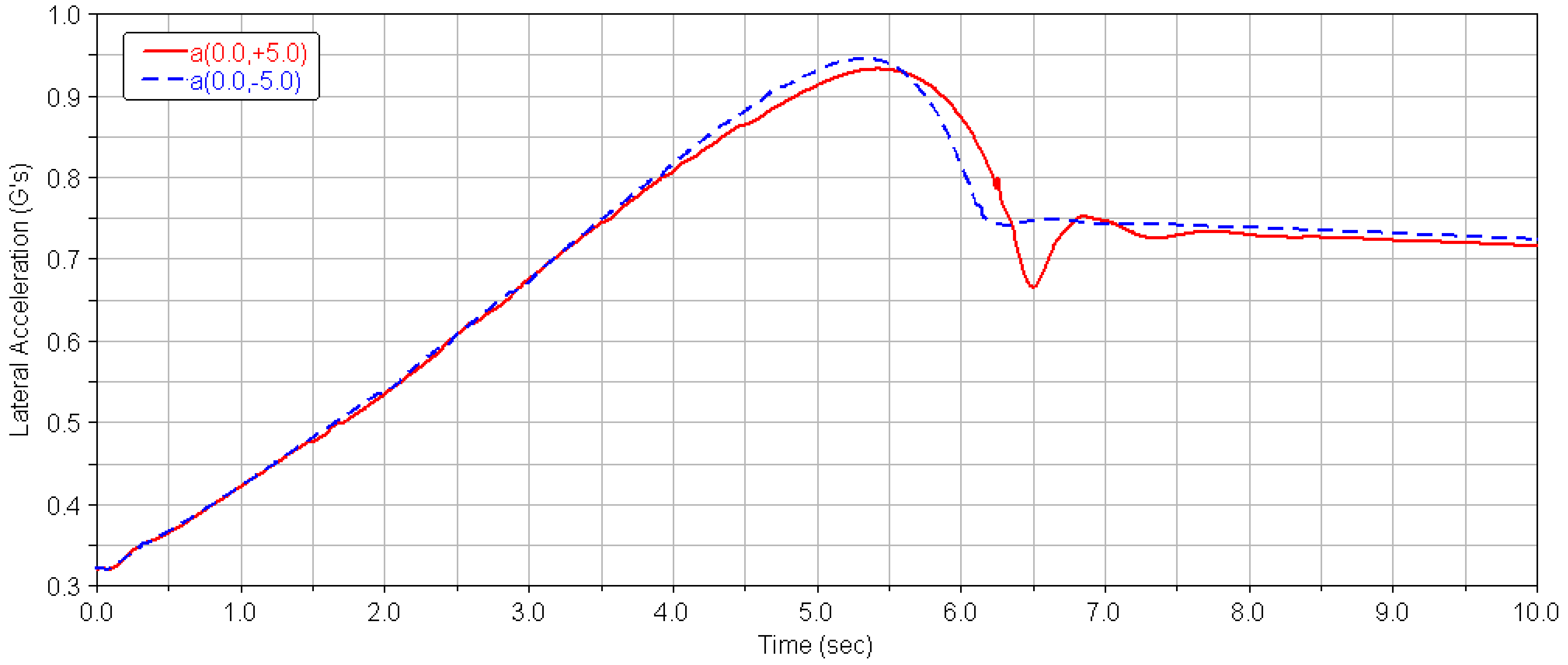
Lateral Acceleration
0.96
0.895
0.83
0.765
0.7
0.635
0.57
0.505
0.44
0.375
0.31
Acceleration [g]
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time



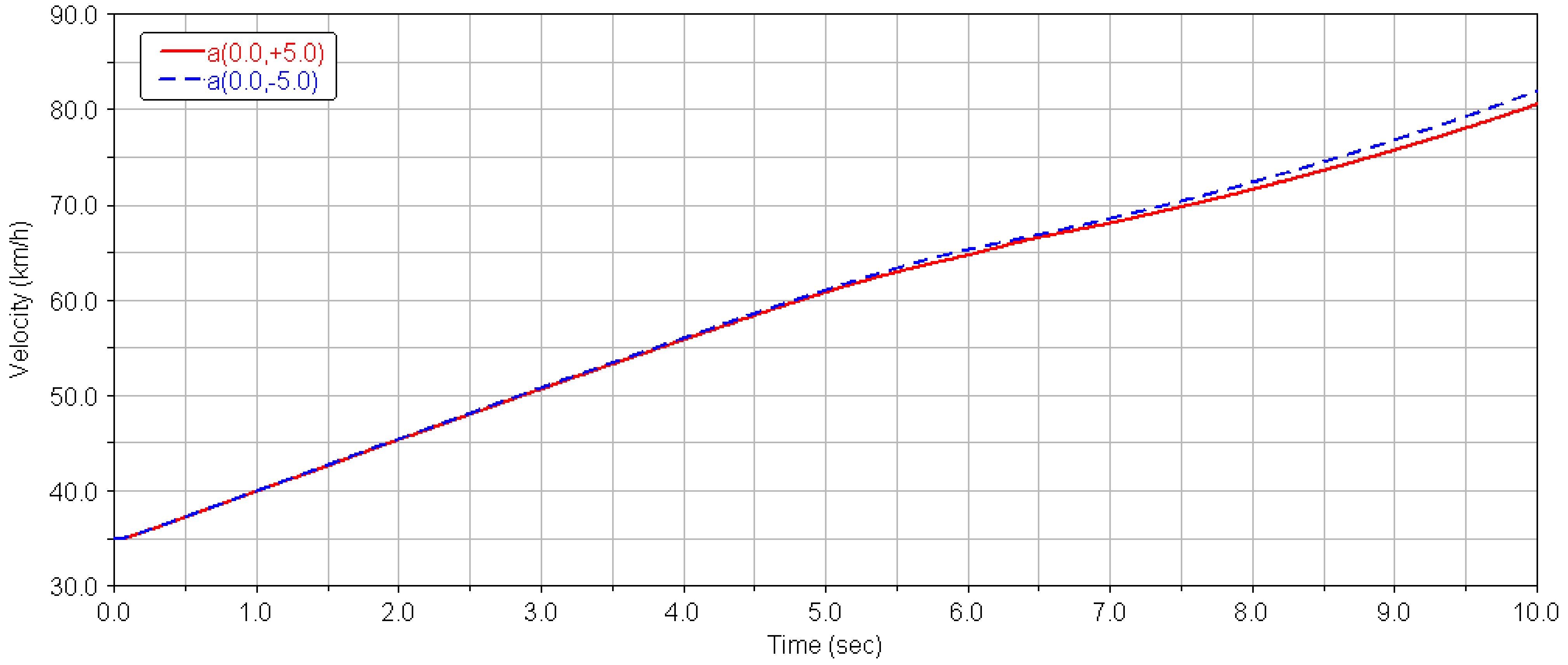
Lateral Acceleration
Acceleration [g]
0.95
0.9185
0.887
0.8555
0.824
0.7925
0.761
0.7295
0.698
0.6665
0.635
4.0
4.3
4.6
4.9
5.2
5.5
5.8
6.1
6.4
6.7
7.0
Time

Τώρα είναι εύκολο να δούμε πως όσο μικραίνουν οι τιμές κάμπερ,τόσο αυξάνεται η μέγιστη τιμή της πλευρικής επιτάχυνσης.Παρατηρούμε όμως και μία μετατόπιση της μέγιστης αυτής τιμής πιο αριστερά στον άξονα του χρόνου.Δηλαδή για μικρότερες τιμές κάμπερ στον πίσω άξονα,το αυτοκίνητο χάνει την πρόσφυση νωρίτερα.

Για να κατανοήσουμε γιατί συμβαίνει αυτό,θα κοιτάξουμε αναλυτικά τις διαφοροποιήσεις τις πλευρικής επιτάχυνσης,και της ταχύτητας σε συνάρτηση με το χρόνο,για τις 2 ακραίες τιμές κάμπερ.



a(0.0,+5.0)
a(0.0,-5.0)
Lateral Acceleration (G's)
Time (sec)
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0



a(0.0,+5.0)
a(0.0,-5.0)
Velocity (km/h)
90.0
80.0
70.0
60.0
50.0
40.0
30.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)

Φαίνεται πιο καθαρά η μετατόπιση του μεγίστου της πλευρικής επιτάχυνσης σε υψηλότερες τιμές,αλλά σε μικρότερο χρόνο.Επίσης παρατηρούμε πως για την αρνητική τιμή κάμπερ,ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας είναι μεγαλύτερος.

Κοιτάζοντας αναλυτικά τις τιμές βλέπουμε τα εξής.

Χρόνος-Πλευρική Επιτάχυνση

Χρόνος	$+5^o$	-5^0
5.32	0.9314	0.945
5.33	0.9316	0.9446
5.34	0.9319	0.9455
5.35	0.9321	0.9452
5.36	0.9322	0.9452
5.37	0.9324	0.9451
5.38	0.9325	0.9452
5.39	0.9326	0.9448
5.4	0.9327	0.9445
......	......	......
5.5	0.932	0.9398
5.51	0.9318	0.939
5.52	0.9312	0.9382
5.53	0.9312	0.9374
5.54	0.9304	0.9365
5.55	0.9309	0.9355
5.56	0.9303	0.9344
5.57	0.9299	0.9333

Χρόνος-Ταχύτητα

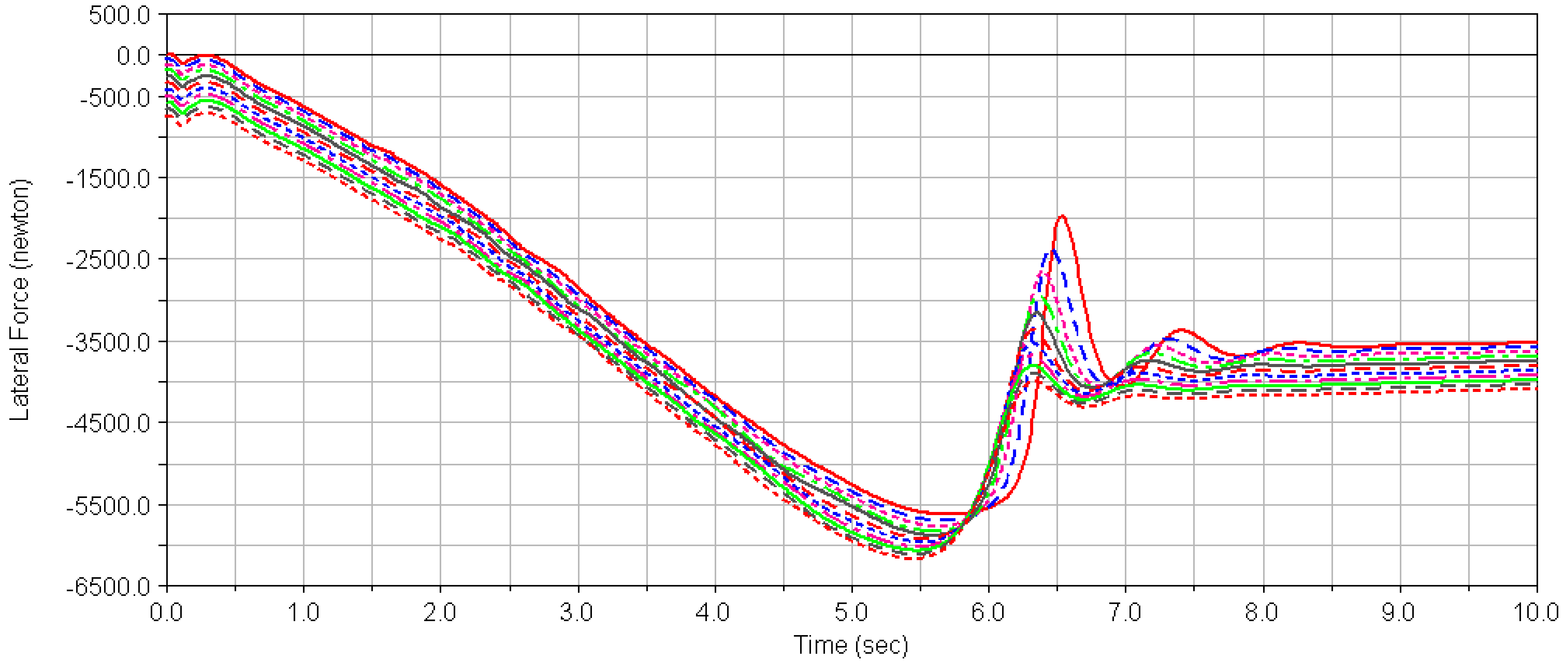
Χρόνος	$+5^o$	-5^0
5.32	62.2005	62.4951
5.33	62.2418	62.5404
5.34	62.2828	62.5856
5.35	62.3237	62.6308
5.36	62.3644	62.6759
5.37	62.405	62.7209
5.38	62.4453	62.7658
5.39	62.4854	62.8107
5.4	62.5254	62.8554
......	......	......
5.5	62.9146	63.2961
5.51	62.9525	63.3394
5.52	62.9916	63.3827
5.53	63.0295	63.4257

5.54	63.0673	63.4687
5.55	63.105	63.5115
5.56	63.1426	63.5541
5.57	63.18	63.5966

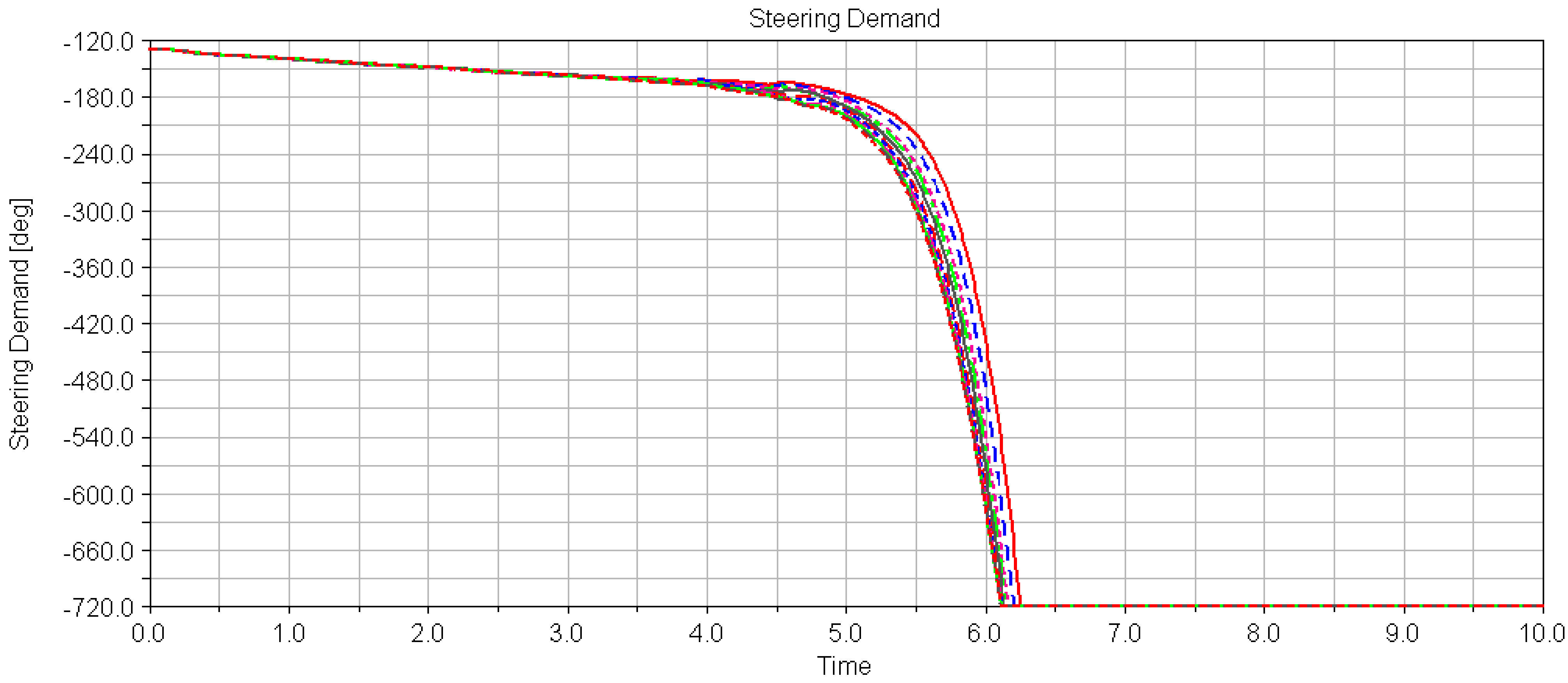
Βλέπουμε πως για +5^o camber,το αυτοκίνητο φτάνει την μέγιστη τιμή της πλευρικής επιτάχυνσης(0,9309g.) στα 5,55 sec. Έως εκείνη τη στιγμή έχει αναπτύξει 63,105 km/h.Για -5^o camber,το αυτοκίνητο επιτυγχάνει μέγιστο πλευρικής πρόσφυσης 0,9452 g. στα 5,38 sec.Έως εκείνη τη στιμή έχει καταφέρει να αναπτύξει 62,7658 km/h.

Παρατηρούμε πως και τις 2 φορές ο εμπρός άξονας χάνει την πρόσφυση για σχεδόν ταυτόσημη ταχύτητα,αφού η πρόσφυση που παρέχει δεν αλλάζει ουσιαστικά.Όταν η τιμή του κάμπερ όμως είναι αρνητική,ο οδηγός έχει τη δυνατότητα να επιταχύνει με μεγαλύτερο ρυθμό,και να φτάσει τα χιλιόμετρα ανά ώρα που θέτουν τον εμπρός άξονα εκτός πορείας,νωρίτερα.Από αυτό συμπεραίνουμε πως για μικρότερες τιμές κάμπερ ο πίσω άξονας είχε περισσότερη πρόσφυση διαθέσιμη,ώστε να επιταχύνει νωρίτερα,και για αυτόν ακριβώς τον λόγο,το όριο του ελαστικού προσεγγίζεται ταχύτερα,και τελικά η απώλεια πρόσφυσης συμβαίνει ταχύτερα.

Στο επόμενο διάγραμμα(πλευρικής δύναμης του πίσω αριστερού τροχού συναρτήσει του χρόνου)παρατηρούμε πως το ελαστικό παρήγαγε περισσότερη πλευρική δύναμη για μικρότερες γωνίες κάμπερ.

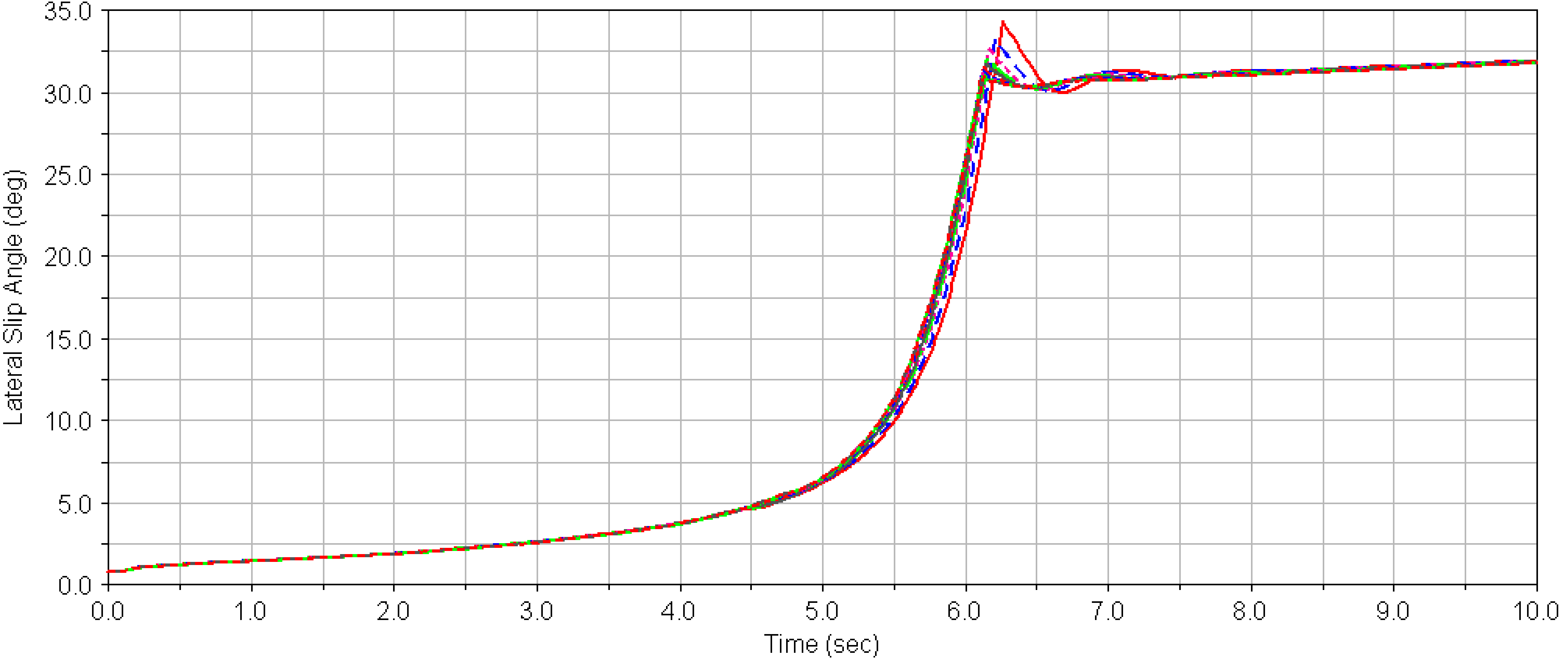

500.0
0.0
-500.0
-1500.0
-2500.0
-3500.0
-4500.0
-5500.0
-6500.0
Lateral Force (newton)
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)

Το επόμενο διάγραμμα-γωνίας τιμονιού συναρτήσει του χρόνου-δείχνει πως για μικρότερες τιμές κάμπερ στον πίσω άξονα,χρειάζεται μεγαλύτερη γωνία στο τιμόνι για να διαγραφεί πορεία ίδιας ακτίνας.Αυτό είναι κάτι που περιμέναμε καθώς αφού η πρόσφυση του εμπρός άξονα παραμένει σταθερή,ενώ του πίσω αυξάνεται,το αυτοκίνητο γίνεται περισσότερο υποστροφικό.

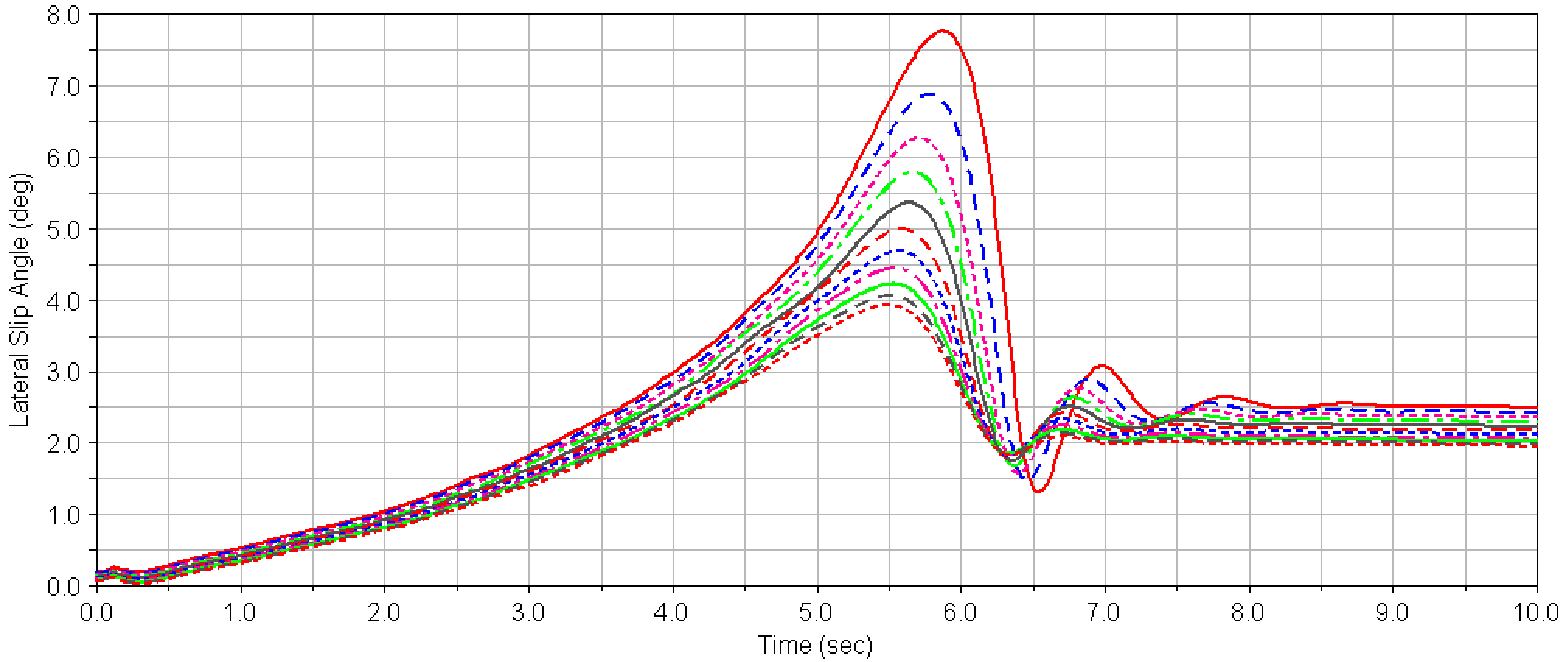


Steering Demand
Steering Demand [deg]
-120.0
-180.0
-240.0
-300.0
-360.0
-420.0
-480.0
-540.0
-600.0
-660.0
-720.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time

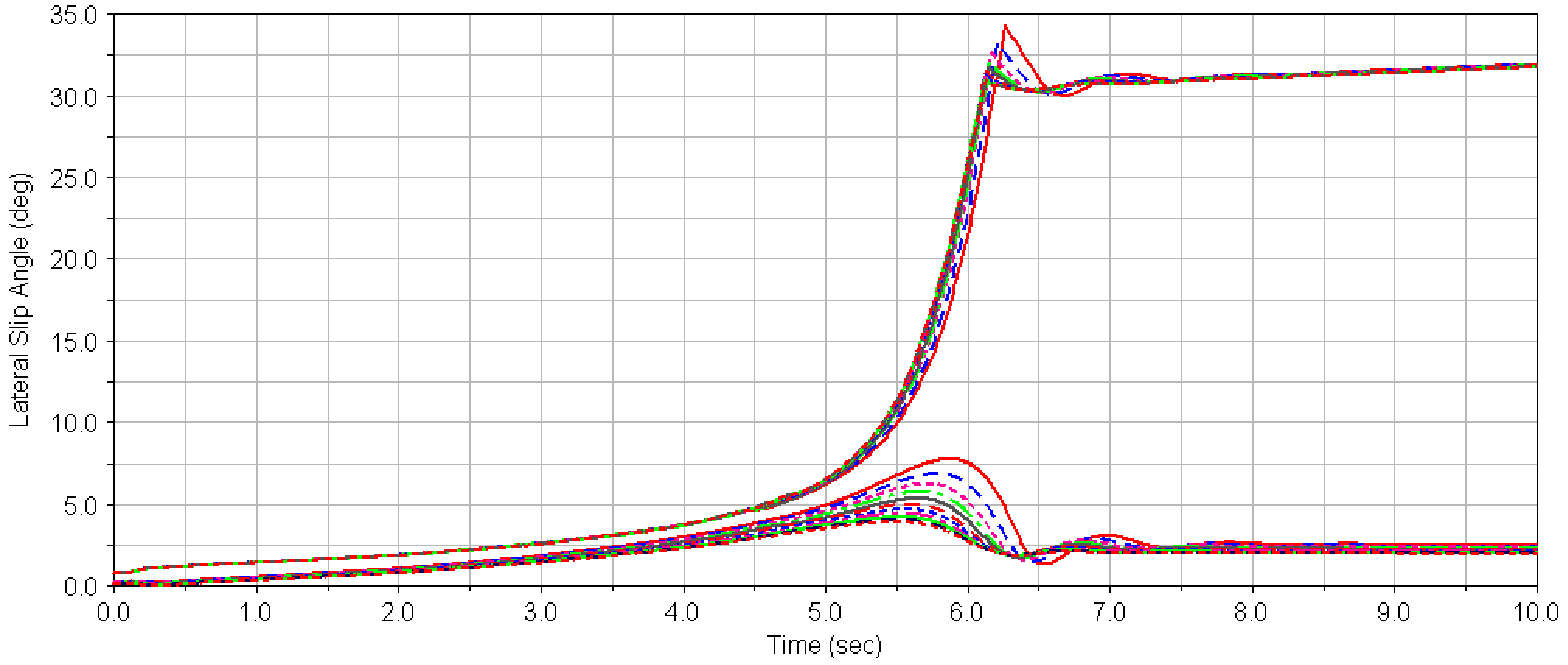
Τα διαγράμματα γωνίας ολίσθησης του πίσω και εμπρός αριστερού τροχού κάνουν αυτό το συμπέρασμα πιο φανερό.



Lateral Slip Angle (deg)
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)



Lateral Slip Angle (deg)
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)



Lateral Slip Angle (deg)
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
Time (sec)

Παρατηρούμε πως όσο η γωνία κάμπερ παίρνει μικρότερες τιμές,τόσο αυξάνεται η διαφορά της εμπρός με της πίσω γωνίας ολίσθησης,που όπως είδαμε σημαίνει περισσότερη υποστροφή.

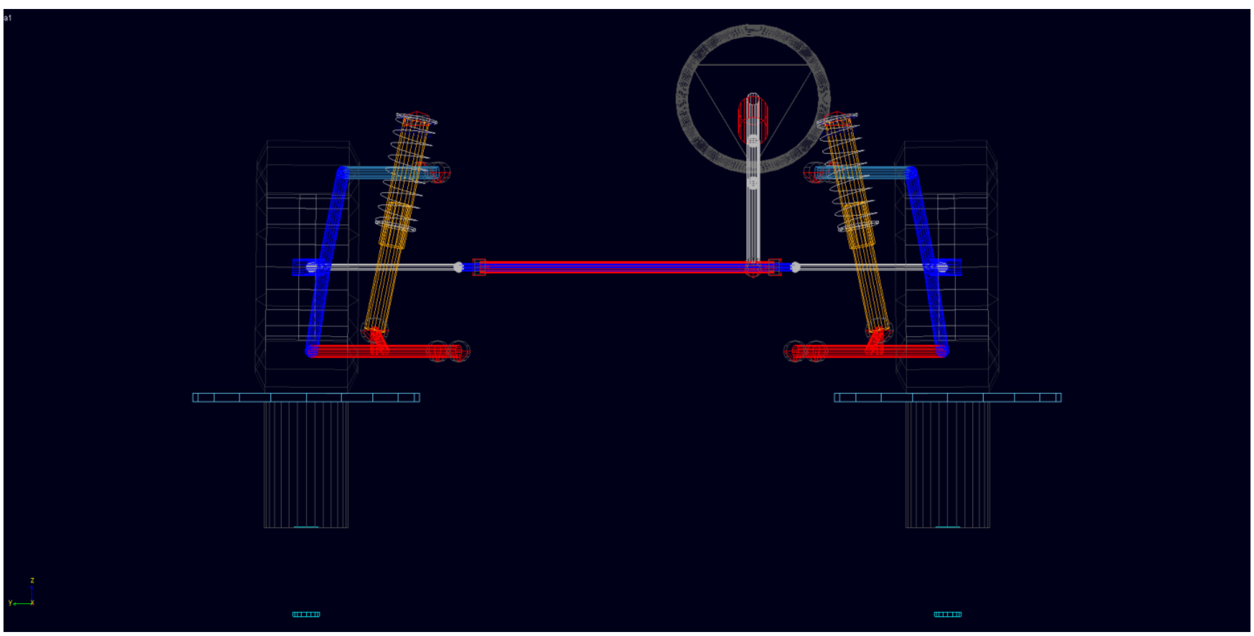
Ξανά βλέπουμε πως η γωνία ολίσθησης του εμπρός άξονα μεταβάλλεται με ταυτόσημο τρόπο αφού κάθε φορά η γωνία κάμπερ του εμπρός άξονα παραμένει ίδια.

Μετά από την παραπάνω διερεύνηση,είναι φανερό πως η επιλογή αρνητικών τιμων στην γωνία camber δρα ευεργετικά προς την παρεχόμενη πρόσφυση όταν το αυτοκίνητο κινείται σε καμπύλη πορεία.Φυσικά δεν μπορούμε να δοκιμάζουμε επ άπειρον όλο και περισσότερο αρνητικές τιμές περιμένοντας αντίστοιχα αποτελέσματα.Μετά από ένα σημείο είναι φανερό πως το ελαστικό δεν θα βρίσκεται σχεδόν καθόλου σε επαφή με το οδόστρωμα.Επίσης όταν το αυτοκίνητο κινείται σε ευθεία πορεία,πολύ έντονα θετικές ή αρνητικές τιμές στην γωνία camber μειώνουν την παρεχόμενη πρόσφυση από το ελαστικό για επιτάχυνση η επιβράδυνση, αφού η επιφάνεια του ελαστικόυ που είναι σε επαφή με το οδόστρωμα είναι μικρή.Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων επιλέγουν τιμές κοντά στο μηδέν ή πολύ ελαφρά αρνητικές στα αυτοκίνητα που παράγουν.Έτσι η φθορά των ελαστικών από τον μέσο οδηγό είναι ομοιόμορφη,και η παρεχόμενη πρόσφυση επαρκής σε όλες τις συνθήκες.Σε αυτοκίνητα με σπορ ή αγωνιστικό προσανατολισμό,χρησιμοποιούνται περισσότερο αρνητικές τιμές,καθώς πλέον σημαντικότερο ρόλο παίζει η δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων πλευρικών επιταχύνσεων.

Κεφάλαιο 6:Επίδραση της γωνίας των ψαλιδιών στην μεταβολή της γωνίας κάμπερ,κατά την έκταση,ή συμπίεση της ανάρτησης

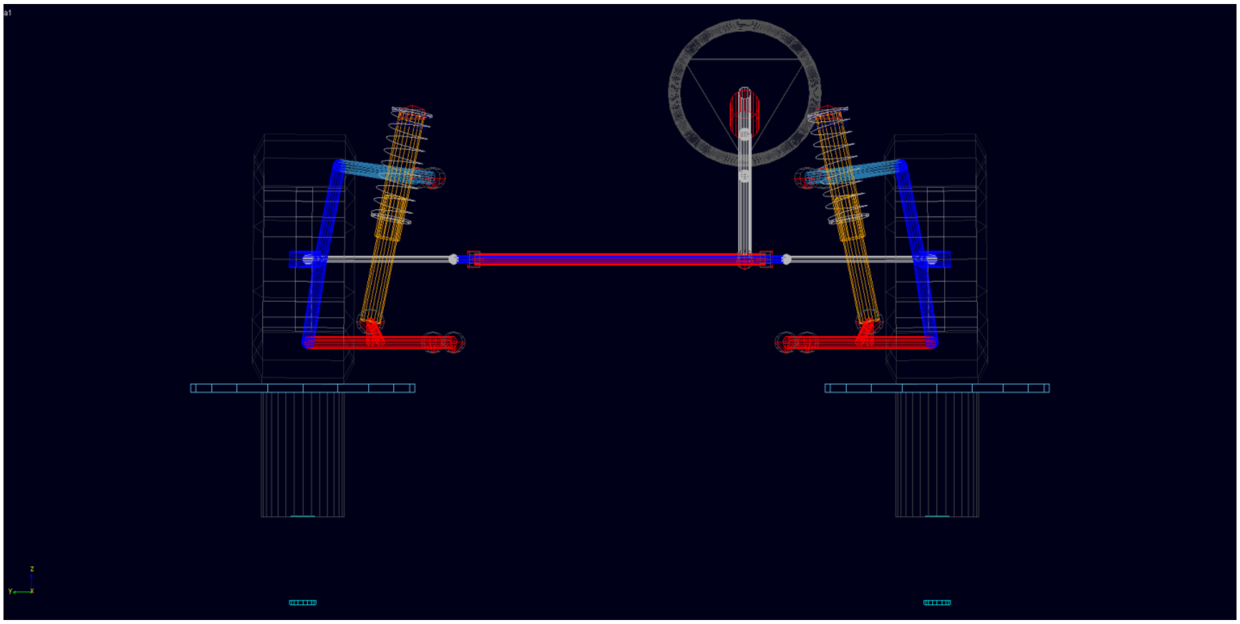
Η ανάρτηση που εξετάζουμε είναι τύπου διπλών ψαλιδιών.Το μήκος του πάνω και του κάτω ψαλιδιού είναι διαφορετικό,με το κάτω ψαλίδι να είναι μακρύτερο.Στην διερεύνηση που θα κάνουμε το μήκος των ψαλιδιών θα είναι σταθερό,και θα αλλάζει η μεταξύ τους γωνία.Υπάρχουν 4 βασικές διατάξεις των ψαλιδιών ως προς την μεταξύ τους γωνία,και απο εκεί και πέρα πολλές διαφοροποιήσεις ανάλογα με το τι θέλει να πετύχει ο κατασκευαστής.

6.1:Τα δύο ψαλίδια παράλληλα μεταξύ τους και ως προς το έδαφος.



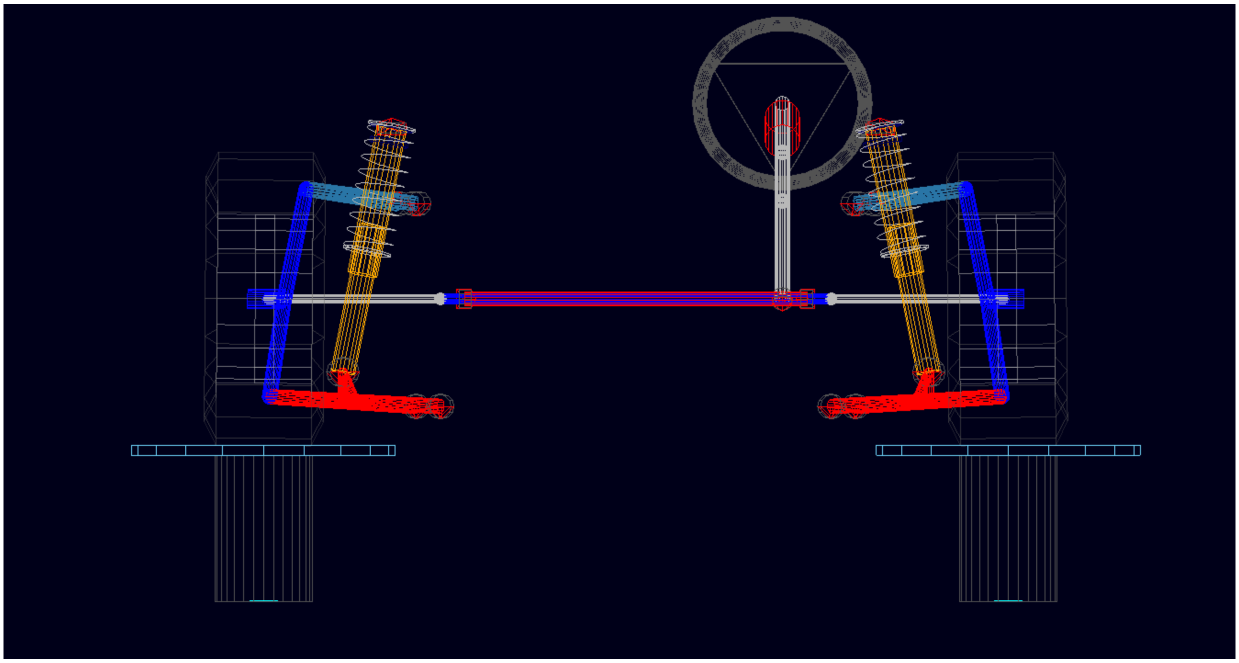
Είναι η παλαιότερη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.Δίνει την πιο κοντινή προσέγγιση στην παράληηλη κίνηση των τροχών.Το κέντρο περιστροφής βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους.

6.2:Το πάνω ψαλίδι σχηματίζει γωνία.



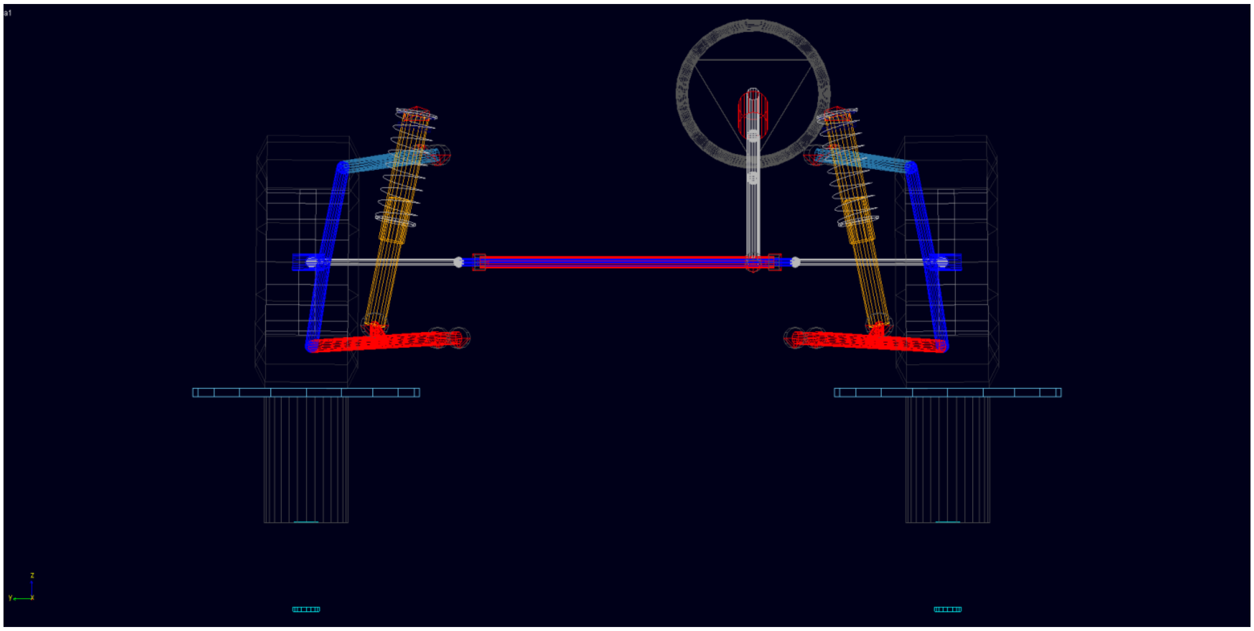
Σε αυτή τη διάταξη,το εξωτερικό άκρο του πάνω ψαλιδιού τοποθετήθηκε ψηλότερα,ενώ το κάτω ψαλίδι έμμεινε οριζόντιο.Τώρα το κέντρο περιστροφής βρίσκεται ψηλότερα από το έδαφος.Αυτή η διάταξη χρησιμοποιήθηκε πολύ.Αυξάνει το αρνητικό κάμπερ(απόλυτη τιμή)στην συμπίεση,ενώ το μειώνει στην έκταση.Έτσι έχει ευεργετικά αποτελέσματα και για τον εσωτερικό(έκταση),αλλά και για τον εξωτερικό τροχό(συμπίεση)κατά τη διάρκεια μίας στροφής.

6.3:Το πάνω και το κάτω ψαλίδι σχηματίζουν γωνία



Σε αυτή τη διάταξη,το πάνω ψαλίδι διατηρείται στην προηγούμενη γωνία,αλλά το εξωτερικό άκρο του κάτω ψαλιδιού ανυψώνεται,δημιουργώντας και αυτό γωνία.Τώρα το κέντρο περιστροφής είναι ξανά στο επίπεδο του εδάφους.Ο τρόπος που μεταβάλλεται το κάμπερ τώρα,είναι παρόμοιος με αυτόν της προηγούμενης διάταξης,με τη διαφορά πως τώρα η καμπύλη μεταβολής του κάμπερ είναι λιγότερο απότομη.Είναι μια πολύ καλή διάταξη ανάρτησης,με μόνο μειονέκτημα τη μειωμένη απόσταση του κάτω ψαλιδιού από το έδαφος.

6.4:Το πάνω και το κάτω ψαλίδι σχηματίζει αντεστραμμένη γωνία



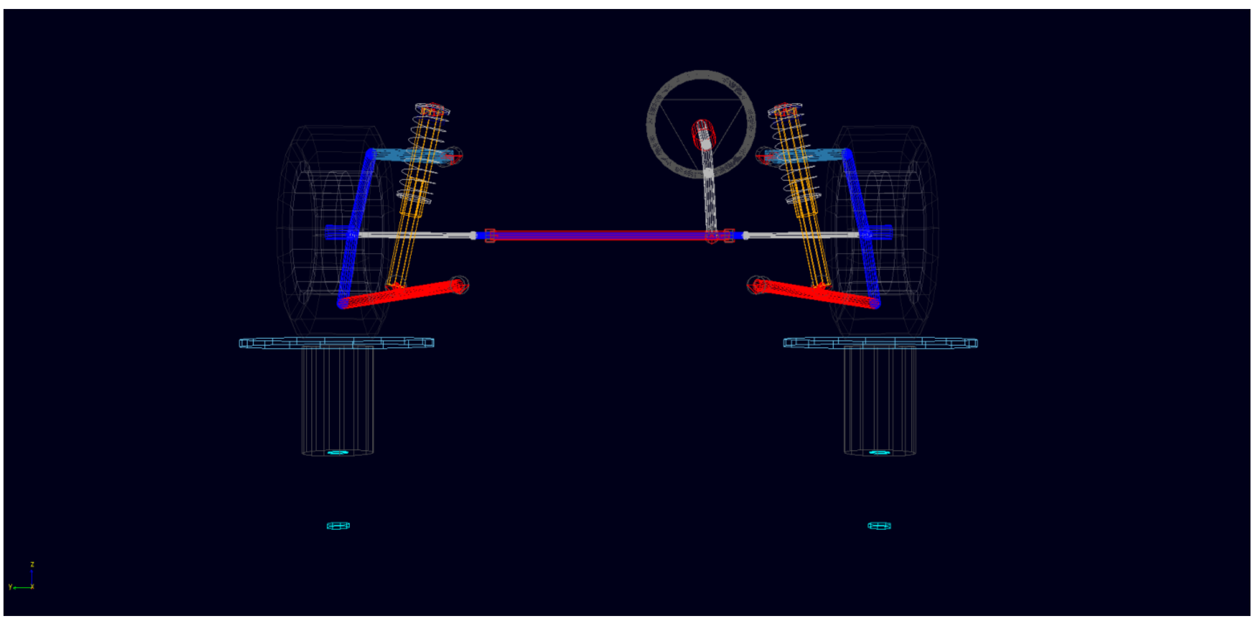
Αυτή η διάταξη χρησιμοποίειται πολύ περιορισμένα με μόνο σκοπό τον περιορισμό του wheelfight.Στην συμπίεση το κάμπερ αλλάζει προς θετικές τιμές,ενώ στην έκταση προς αρνητικές.Αυτό το φαινόμενο δημιουργέι έντονη υποστροφή και φθορά των ελαστικών,και για αυτό τον λόγο έχει ελάχιστες εφαρμογές.

Κεφάλαιο 7:Υπολογισμός της καμπύλης μεταβολής της γωνίας camber για κάθε διάταξη

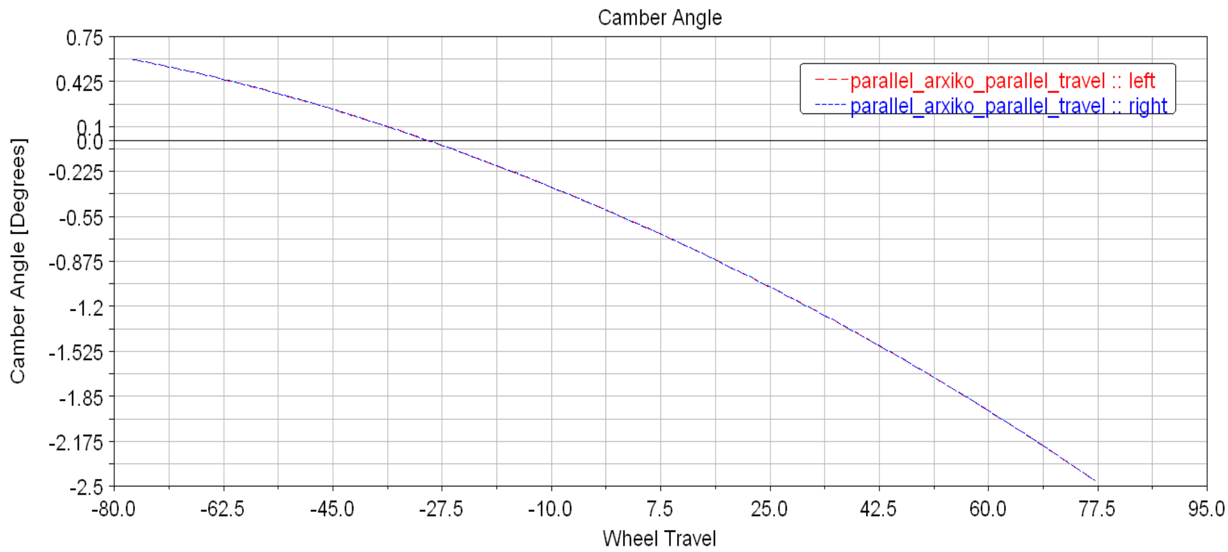
Θα κάνουμε ένα τεστ σε κάθε διαφορετική διάταξη της ανάρτησης,για να μελετήσουμε την καμπύλη μεταβολής του κάμπερ σε κάθε μία,και να την συγκρίνουμε με την αρχική του μοντέλου μας.

Στο τεστ τοποθετείται η εμπρός ανάρτηση σε μία δοκιμαστική διάταξη,που την αναγκάζει να συμπιεστεί πλήρως,και να εκταθεί πλήρως.Στη συνέχεια παίρνουμε τις μετρήσεις που μας ενδιαφέρουν.

Το μοντέλο που χρησιμοποιούσαμε ως τώρα,έχει στην εμπρός ανάρτηση μία παραλλαγή-συνδυασμό των διατάξεων που είδαμε.Το πάνω ψαλίδι σχηματίζει γωνία έχοντας μετακινήσει προς τα πάνω το εξωτερικό άκρο του,ενώ το κάτω ψαλίδι σχηματίζει αντεστραμμένη γωνία.

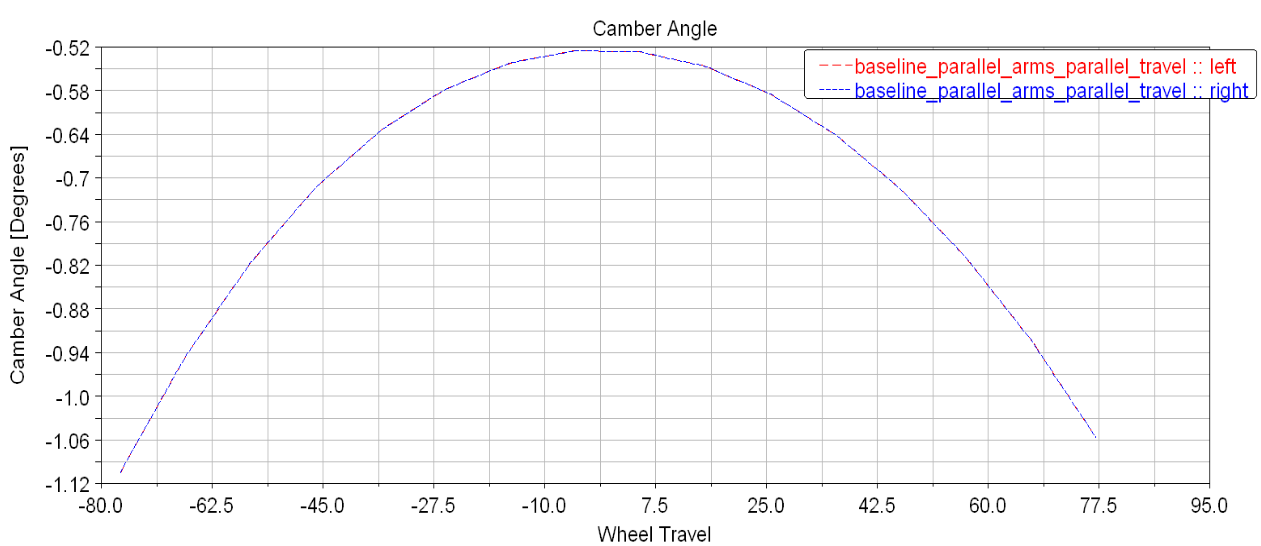


Οι θετικές τιμές του διαγράμματος στον οριζόντιο άξονα,δηλώνουν την συμπίεση της ανάρτησης,ενώ οι αρνητικές την έκτασή της.

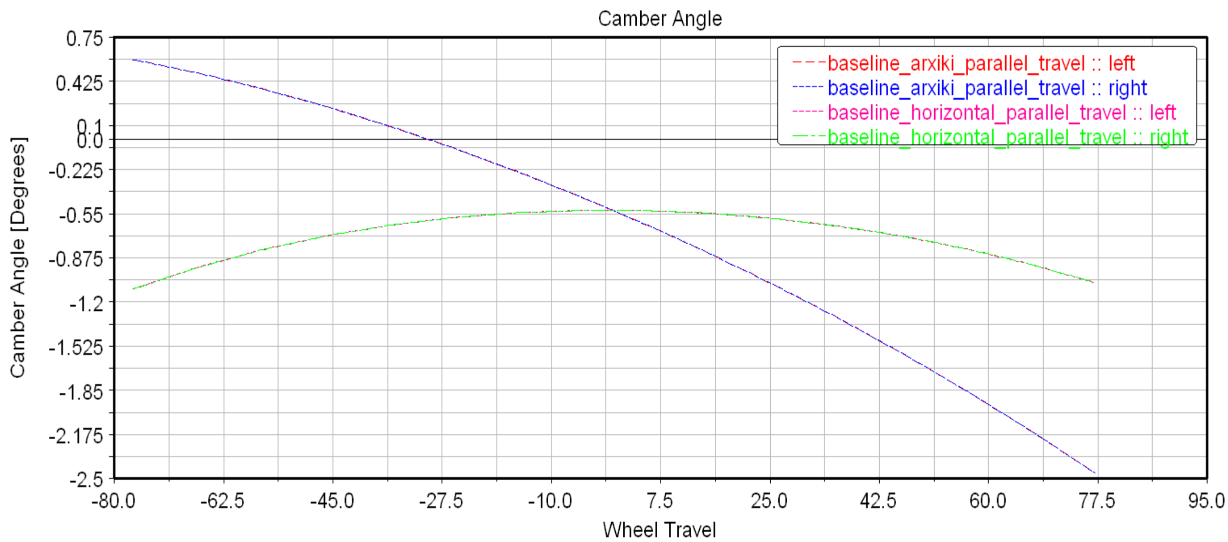


Βλέπουμε πως η ανάρτησή μας αυξάνει το αρνητικό κάμπερ(απόλυτη τιμή)στην συμπίεση,ενώ το μειώνει στην έκταση.

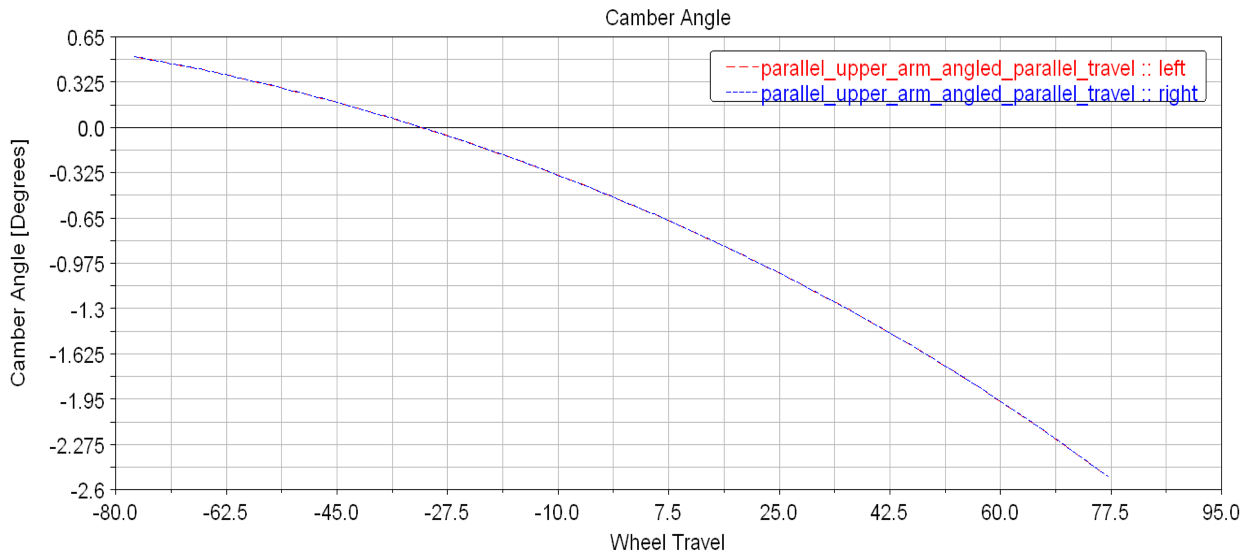
Με όμοιο τρόπο δοκιμάζουμε την ανάρτηση με τα δύο ψαλίδια παράλληλα μεταξύ τους και ως προς το έδαφος.Παρατηρούμε πως και στην συμπίεση,αλλά και στην έκταση το κάμπερ κινείται προς ακόμα περισσότερο αρνητικές τιμές.



Συγκρίνουμε στο ίδιο διάγραμμα αυτόν τον τύπο ανάρτησης με τον αρχικό,και είναι φανερή η μεγάλη διαφορά τους.

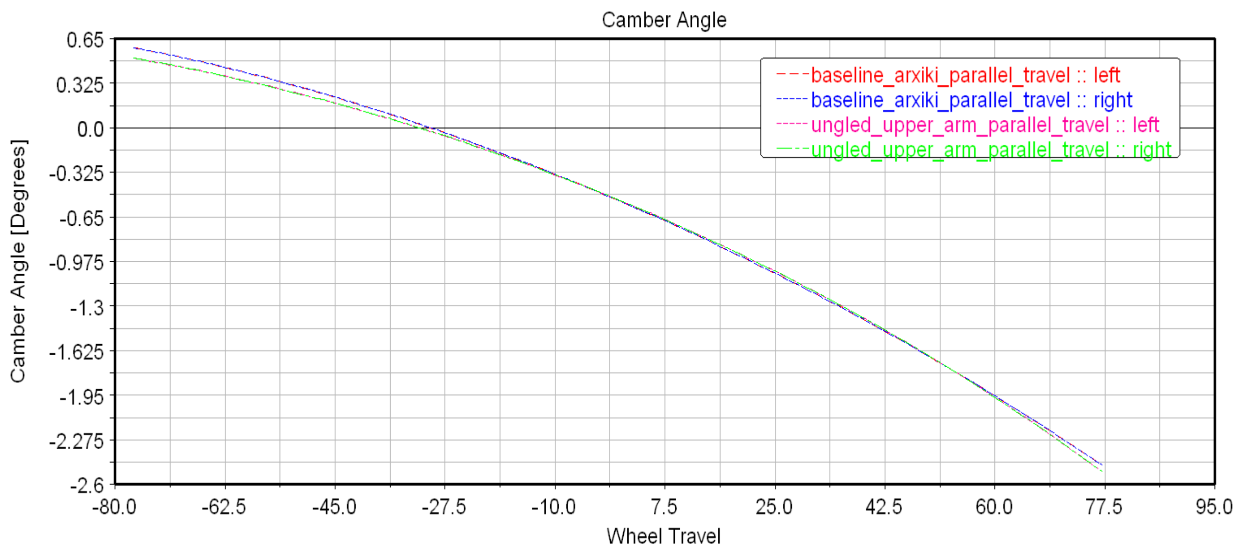


Τώρα θα υποβάλλουμε στο ίδιο τεστ την ανάρτηση με το πάνω ψαλίδι να σχηματίζει γωνία,ενώ το κάτω να είναι παράλληλο.

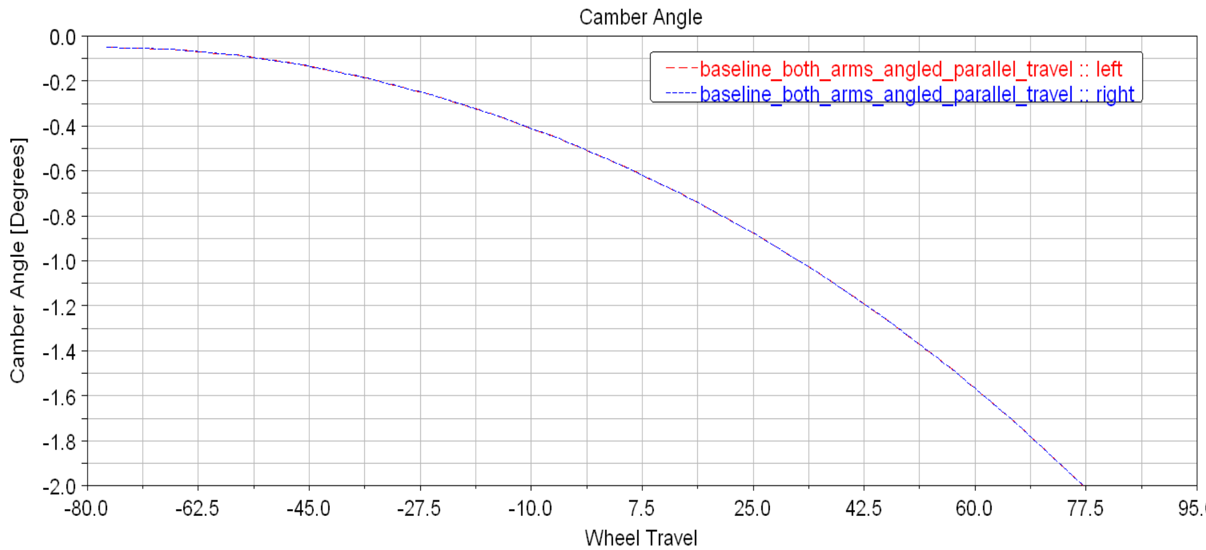


Όπως περιμέναμε στην συμπίεση το κάμπερ κινείται προς μεγαλύτερες(σε απόλυτη τιμή)αρνητικές τιμές κάμπερ,ενώ στην έκταση κινείται προς θετικές τιμές.

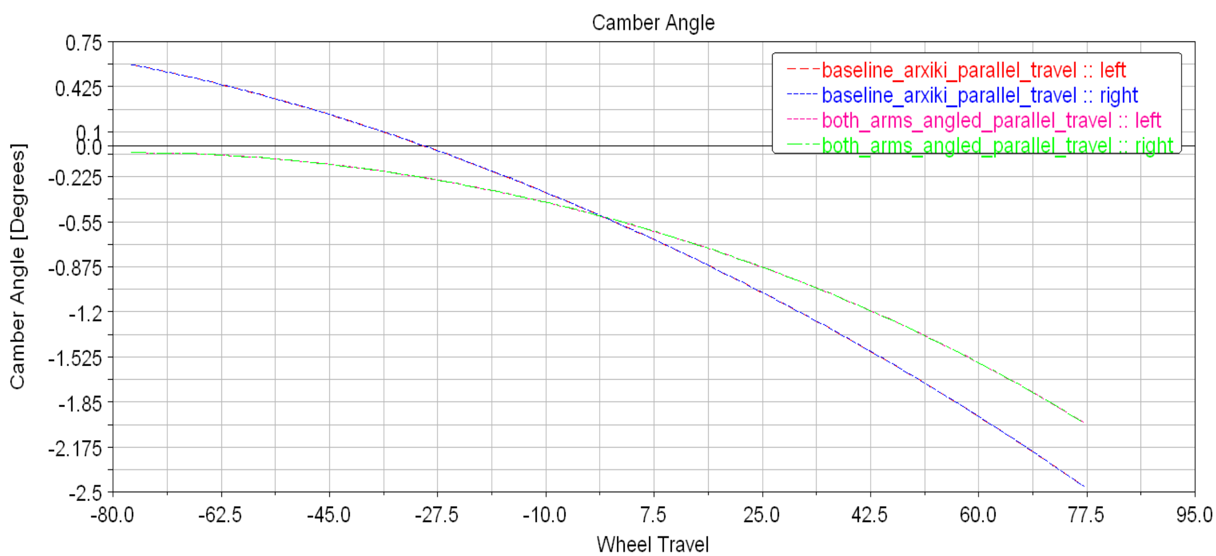
Συγκρίνουμε την καμπύλη με αυτήν της αρχικής διάταξης και παρατηρούμε πως η μεταβολή είναι ελαφρά λιγότερο απότομη.

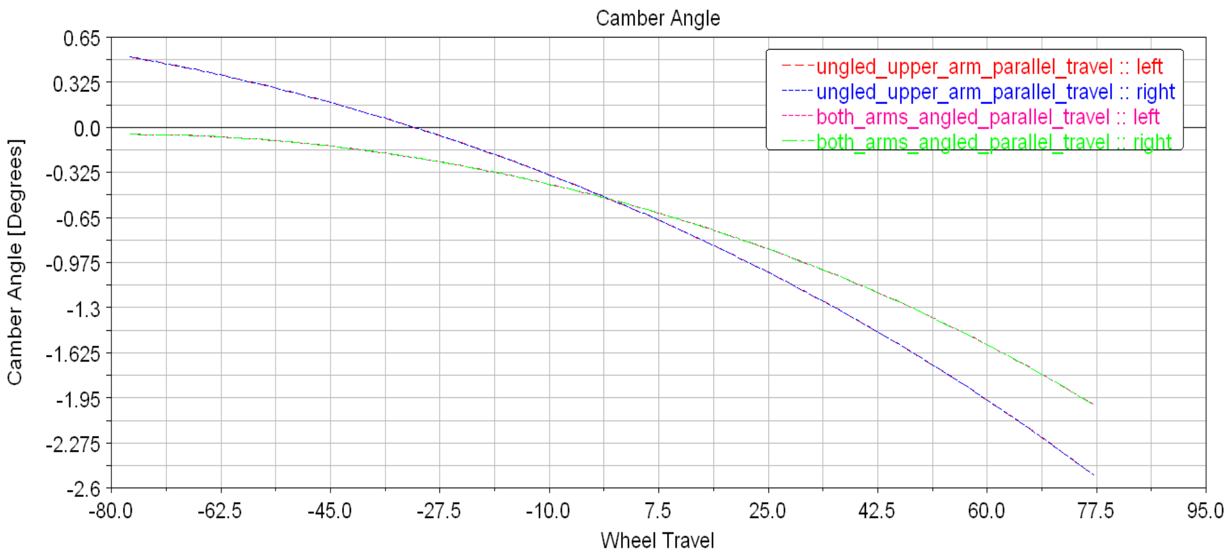


Στην συνέχεια δοκιμάζουμε την ανάρτηση,με τα 2 ψαλίδια να σχηματίζουν γωνία.

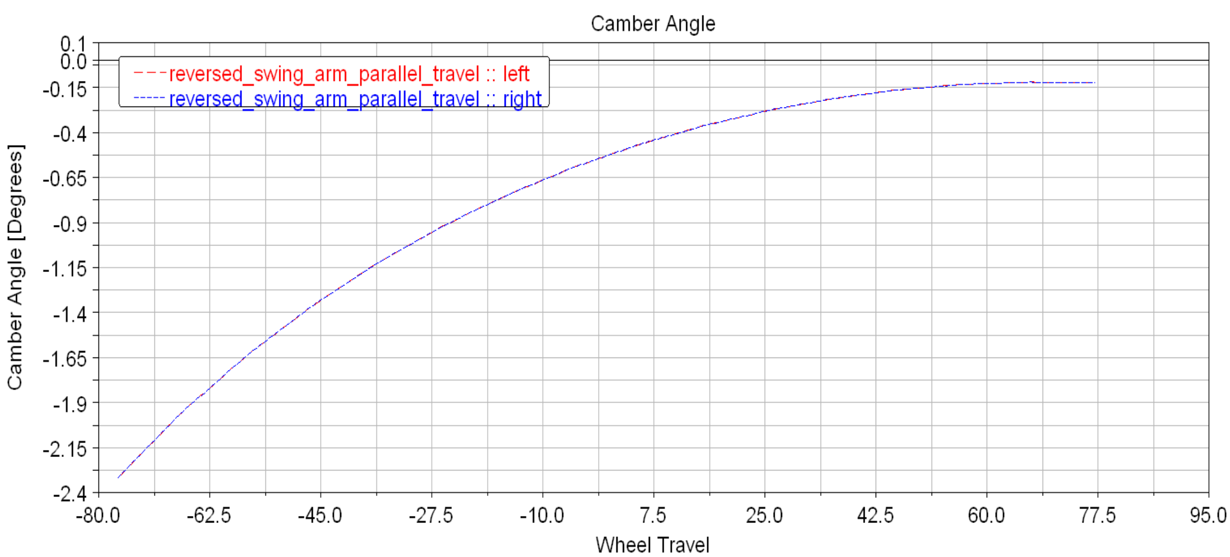


Συγκρίνοντας την μεταβολή με αυτήν της αρχικής ανάρτησης,αλλά και με την διάταξη στην οποία μόνο το πάνω ψαλίδι σχηματίζει γωνία,παρατηρούμε αυτό που περιμέναμε.Η μεταβολή είναι κατά πολύ ομαλότερη και από τις 2 προηγούμενες διατάξεις.

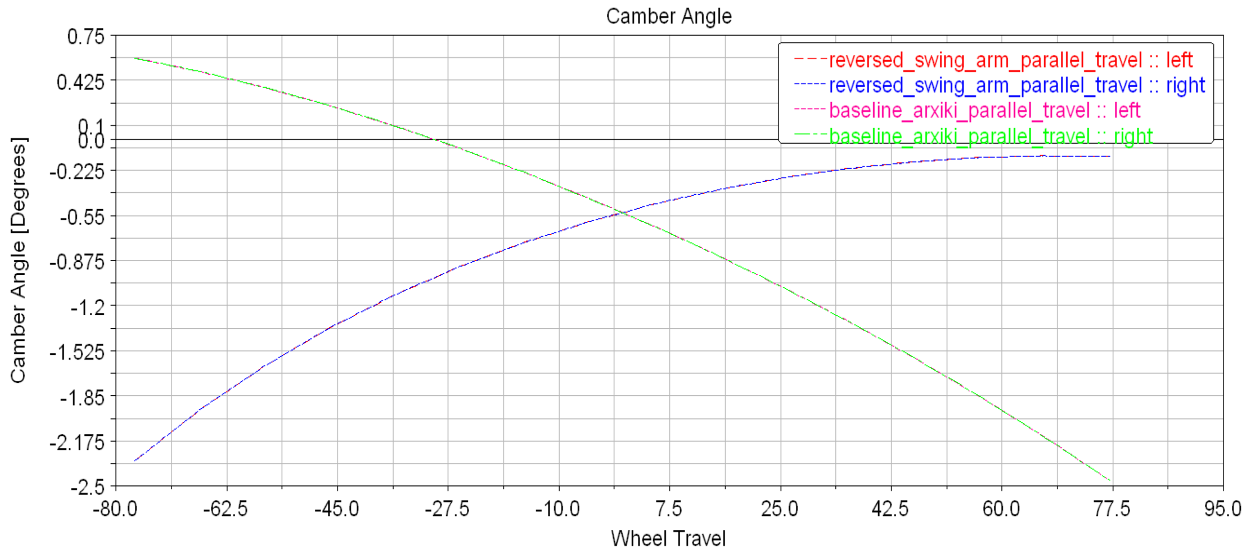




Τέλος,δοκιμάζουμε την τελευταία διάταξη,όπου και τα 2 ψαλίδια σχηματίζουν αντεστραμμένη γωνία.



Βλέπουμε όπως γνωρίζαμε και από την θεωρία,πως στην συμπίεση το κάμπερ αλλάζει προς θετικές τιμές,ενώ στην έκταση προς αρνητικές.Σε σύγκριση με την αρχική είναι φανερή η μεγάλη διαφορά.



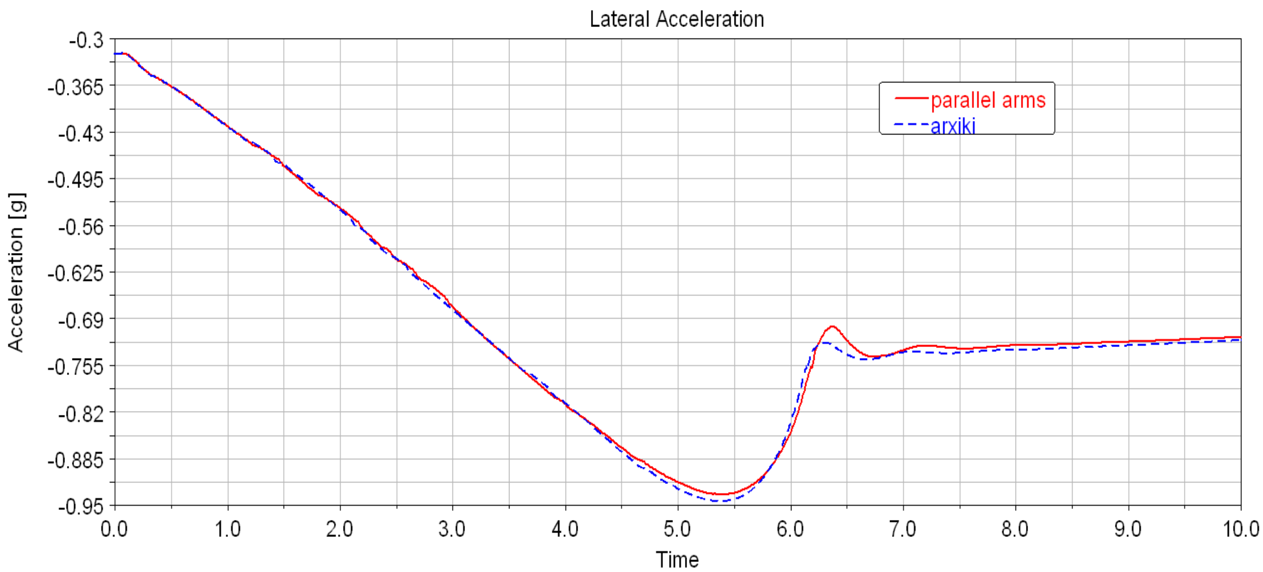
Κεφάλαιο 8:Μελέτη επίδρασης των διαφόρων παραλλαγών της ανάρτησης στην οδική συμπεριφορά του αυτοκινήτου

Για να μελετήσουμε τελικά τις αλλαγές που δημιουργούν στην δυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου,οι διατάξεις της εμπρός ανάρτησης που αναφέραμε,θα κάνουμε ξανά ένα τεστ κυκλικής τροχιάς.

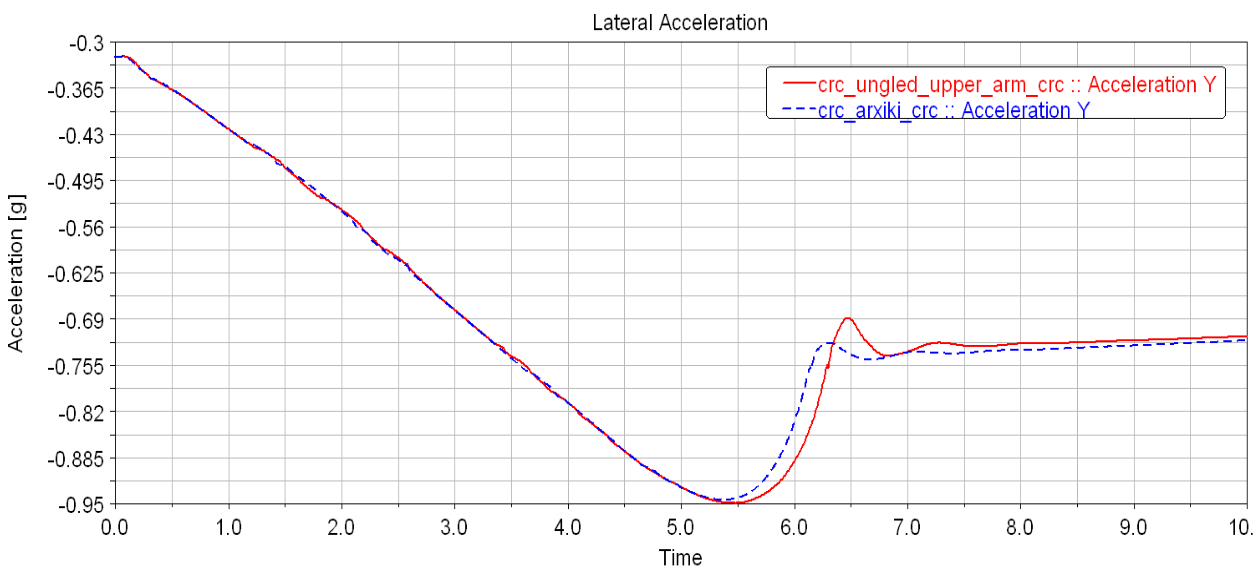
Το αυτοκίνητο θα κινηθεί ξανά σε κυκλική τροχιά 30 μέτρων,με τον οδηγό να προσπαθεί να διατηρήσει το αυτοκίνητο πάνω στην επιλεγμένη αυτή διαδρομή,επιταχύνοντας διαρκώς,σύμφωνα με τις δυνατότητες πρόσφυσης που του δίνει κάθε φορά η ρύθμιση στην ανάρτηση του αυτοκινήτου.Το τεστ θα σταματήσει όταν το αυτοκίνητο δεν μπορεί πια να διατηρήσει την καθορισμένη τροχιά.Η επιτάχυνση ξεκινά στα 35 km/h και ολοκληρώνεται στα 90 km/h.

Θα γίνουν δοκιμές για κάθε διάταξη ανάρτησης,και θα συγκριθούν με την αρχική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε.Οι στατικές γωνίες κάμπερ θα είναι κάθε φορά ίσες στις -0.5^{o} για την εμπρός και την πίσω ανάρτηση.Συμπεράσματα θα βγούν συγκρίνοντας συγκρίνοντας κάθε φορά τα διαγράμματα πλευρικής επιτάχυνσης-χρόνου.Οι τιμές πλευρικής επιτάχυνσης είναι αρνητικές εξαιτίας του συστήματος αξόνων.Τα θετικά του άξονα είναι στα δεξιά του αυτοκινήτου για κάποιον που κάθεται στη θέση του οδηγού,ενώ η στροφή είναι αριστερή.Έτσι και η πλευρική επιτάχυνση έχει αρνητικό πρόσημο,καθώς η φορά της είναι προς το εσωτερικό της αριστερής στροφής.

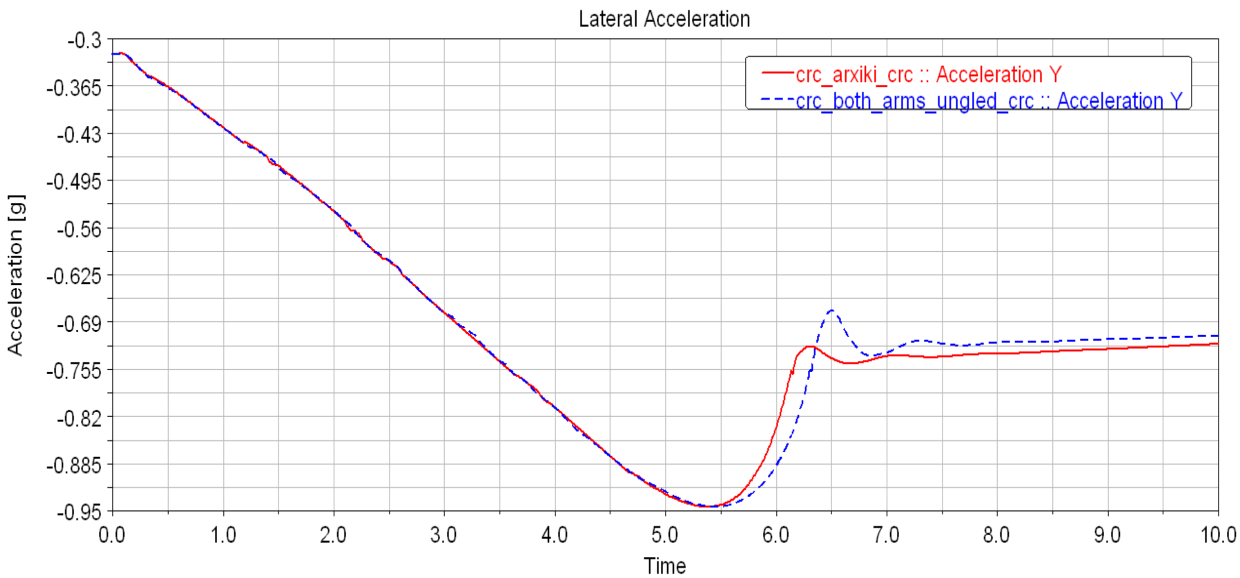
Συγκρίνοντας την αρχική διάταξη του μοντέλου με την διάταξη όπου και τα 2 ψαλίδια είναι παράλληλα,είναι φανερό πως η πρώτη δίνει σημαντικά μεγαλύτερη πρόσφυση στον εμπρός άξονα,αφου αναπτύσσει μεγαλύτερη πλευρική επιτάχυνση πριν χαθεί η πρόσφυση.



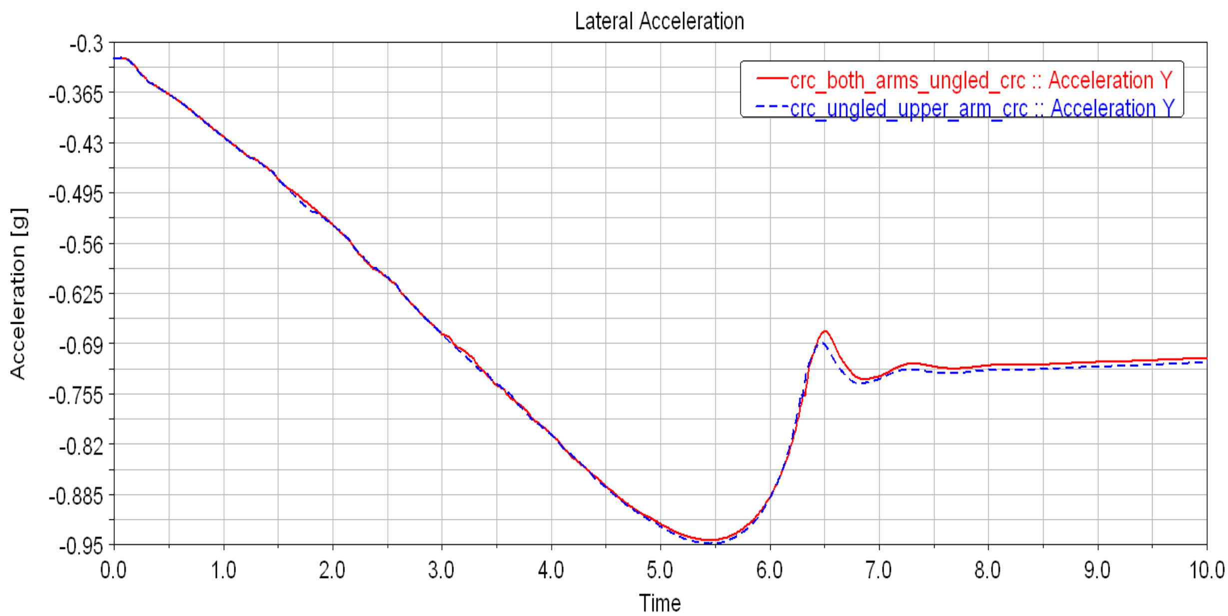
Στη σύγκριση της αρχικής διάταξης με την διάταξη με το επάνω μόνο ψαλίδι υπο γωνία,παρατηρούμε πως η δεύτερη διάταξη παρέχει και περισσότερη πρόσφυση,αλλά και για περισσότερο χρόνο,καθυστερώντας την ολίσθηση του οχήματος.



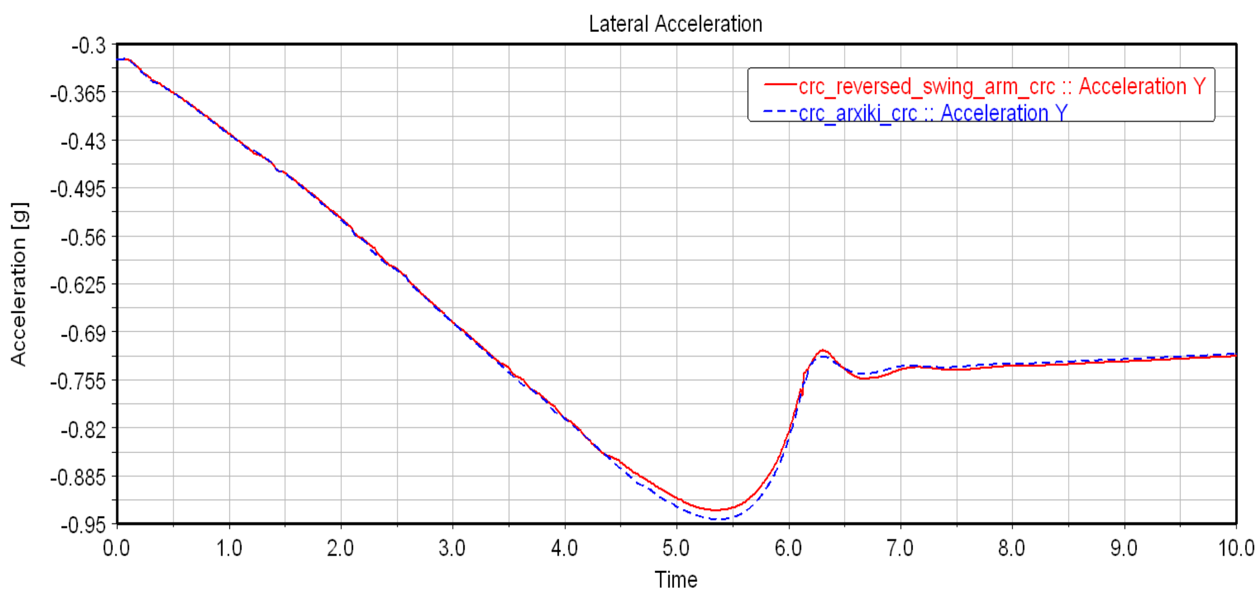
Το ίδιο συμβαίνει και στην σύγκριση της αρχικής διάταξης,με εκείνη στην οποία βρίσκονται και τα 2 ψαλίδια υπό γωνία.Εδώ το κέρδος σε απόλυτη τιμή πλευρικής επιτάχυνσης είναι μικρότερο,αλλά η ολίσθηση του εμπρός άξονα έρχεται ξανά αρκετά αργότερα.



Συγκρίνοντας την διάταξη όπου μόνο το πάνω ψαλίδι σχηματίζει γωνία,με εκείνη όπου και τα 2 ψαλίδια βρίσκονται υπο γωνία,βλέπουμε πως οι καμπύλες είναι ελάχιστα διαφορετικές.Η ολίσθηση ξεκινάει την ίδια χρονική στιγμή,όμως μέχρι τότε η διάταξη όπου μόνο το πάνω ψαλίδι σχηματίζει γωνία,εξασφαλίζει ελαφρά περισσότερη πλευρική επιτάχυνση.

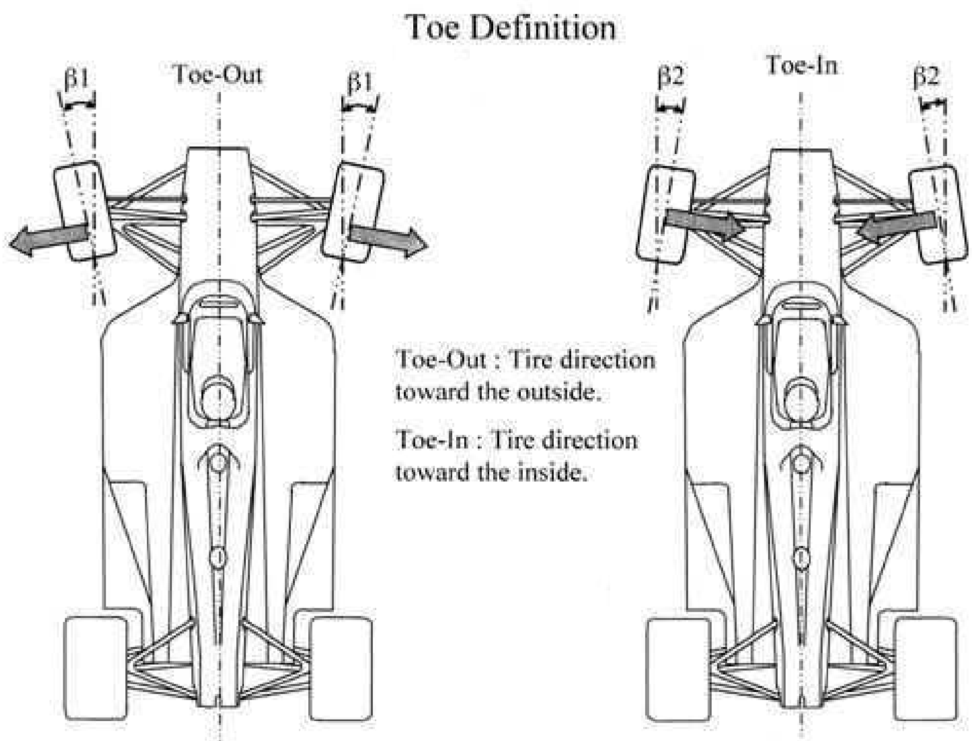


Τέλος συγκρίνοντας την αρχική διάταξη με αυτήν όπου και τα 2 ψαλίδια σχηματίζουν αντεστραμμένη γωνία,είναι φανερή η υπεροχή της πρώτης,τόσο σε απόλυτη τιμή πλευρικής επιτάχυνσης,όσο και σε χρόνο έως προκύψει η απώλεια πρόσφυσης,υπό διαρκή επιτάχυνση.



Συμπεραίνουμε τελικά πως η προτιμότερη διάταξη είναι εκείνη που εξασφαλίζει αύξηση της απόλυτης τιμής του αρνητικού κάμπερ κατά την συμπίεση,ενώ ωθεί τον τροχό σε θετικότερες γωνίες κάμπερ κατά την έκταση.Από εκεί και πέρα μεταξύ σε διατάξεις που εξασφαλίζουν την παραπάνω συμπεριφορά,προβάδισμα έχουν εκείνες που παρέχουν τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ σε μία καμπύλη του κάμπερ που μεταβάλλεται πολύ απότομα,και σε μία που μεταβάλλεται πολύ ομαλά.

Κεφάλαιο 9:Σύγκλιση-Απόκλιση τροχών(toe-in,toe-out)



Εικ.28

Όταν το ζέυγος τροχών ενός άξονα είναι ρυθμισμένο έτσι ώστε τα εμπρός άκρα τον τροχών είναι ελαφρά στραμμένα προς το εσωτερικό του αυτοκινήτου,έχουμε σύγκλιση.

Όταν τα εμπρός άκρα των τροχών είναι ελαφρά στραμμένα προς το εξωτερικό του αυτοκινήτου,έχουμε απόκλιση.

Είναι δηλαδή η γωνία που σχηματίζει ο τροχός,ως προς τον άξονα του μεταξονίου.Η γωνία αυτή έχει τρεις κύριες επιρροές στην συμπεριφορά του αυτοκινήτου.Επηρρεάζει:

- Την σταθερότητα όταν το αυτοκίνητο κινείται στην ευθεία
- Την φθορά των ελαστικών
- Και την συμπεριφορά του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια της εισόδου στην στροφή

Για την ελάχιστη φθορά στα ελαστικά,και τις ελάχιστες τριβές κύλισης,οι τροχοί ενός άξονα πρέπει να κοιτάζουν απόλυτα ευθεία εμπρός,όταν το αυτοκίνητο κινείται σε ευθεία γραμμή.Έντονη σύγκλιση ή απόκλιση,δημιουργούν στα ελαστικά γωνίες ολίσθησης,αφού πάντα θα κινούνται σε διαφορετική κατεύθυνση από το επίπεδο που κοιτάζουν.Έντονη σύγκλιση φθείρει νωρίς τα ελαστικά στο εξωτερικό τμήμα του πέλματος,ενώ η έντονη απόκλιση προκαλεί το ίδιο στο εξωτερικό τους.

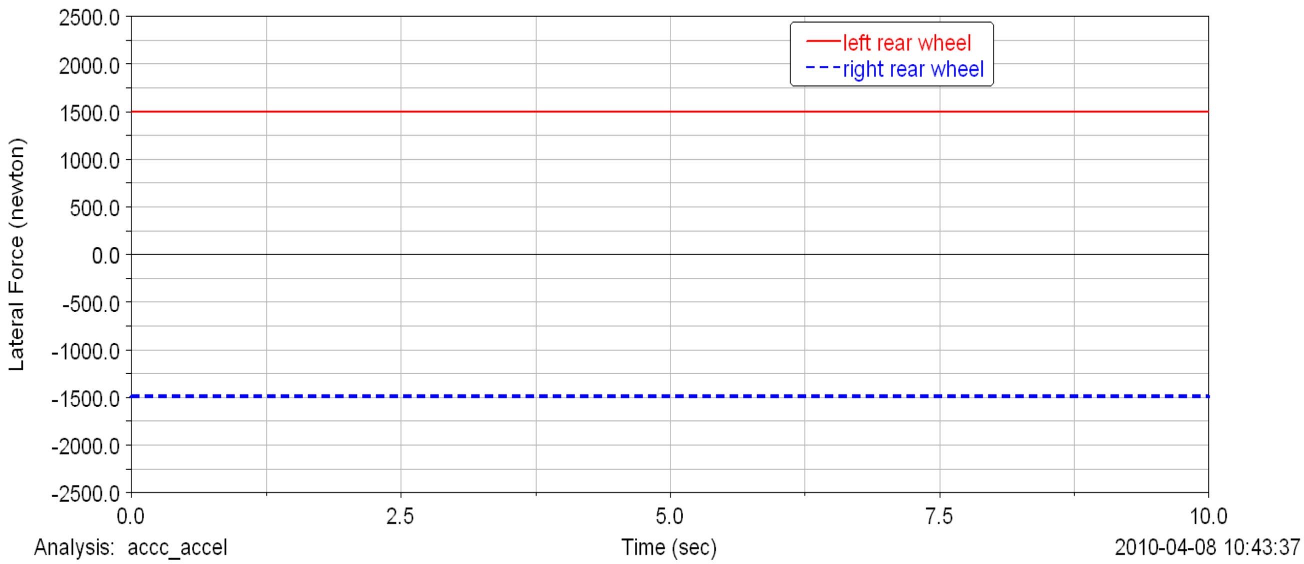
Ο λόγος που δεν προτιμάται πάντα μηδενική σύκλιση-απόκλιση είναι το αποτέλεσμα που έχει αυτή η γωνία στην σταθερότητα του αυτοκινήτου.Με το τιμόνι σε μηδενική γωνία,και το αυτοκίνητο να κατευθύνεται ευθεία,η σύγκλιση κάνει τους τροχούς να τείνουν να διαγράψουν τροχιές οι οποίες τέμνονται μεταξύ τους.Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι αντιδράσεις των τροχών εξισσοροπούνται και δεν έχουν την τάση να στρίψουν.

Όταν ο ένας από τους τροχούς συναντήσει μία αιτία (μικρό σαμαράκι ή άλλη διαμόρφωση) στο οδόστρωμα που τείνει να τον στρίψει,θα παρσύρει τον ίδιο τροχό στην ίδια κίνηση.Αν η διατάραξη αυτή είναι μικρή οι τροχοί θα στρίψουν κατά μία πολύ μικρή ποσότητα,και ίσως βρεθούν να κοιτάζουν ευθεία.Ακόμα όμως οι τροχιές τους δεν τείνουν να κάνουν το αυτοκίνητο να στρίψει.Έτσι οι τροχοί απορρόφησαν την μική αυτή διατάραξη,χωρίς να υπάρξει αξιοσημείωτη αλλαγή στην πορεία του αυτοκινήτου.Έτσι η σύγκλιση αυξάνει την σταθερότητα στην ευθεία.

Αν όμως οι τροχοί έχουν ρυθμιστεί σε απόκλιση,μικρές διαταράξεις θα οδηγήσουν τους τροχούς σε τροχιές που ορίζουν στροφή.Κάθε στιγμή,η παραμικρή γωνία στο τιμόνι,οδηγεί τον εσωτερικό τροχό να διαγράψει στροφή μικρότερης ακτίνας από τον εσωτερικό.Έτσι το αυτοκίνητο έχει την τάση να θέλει συνεχώς να εισέλθει σε κάποια στροφή,παρά να διατηρήσει την ευθεία κατεύθυνση.Είναι λοιπόν φανερό ότι η απόκλιση ενθαρρύνει την έναρξη μίας στροφής,ενώ η σύγκλιση ευνοεί την σταθερότητα στην ευθεία.

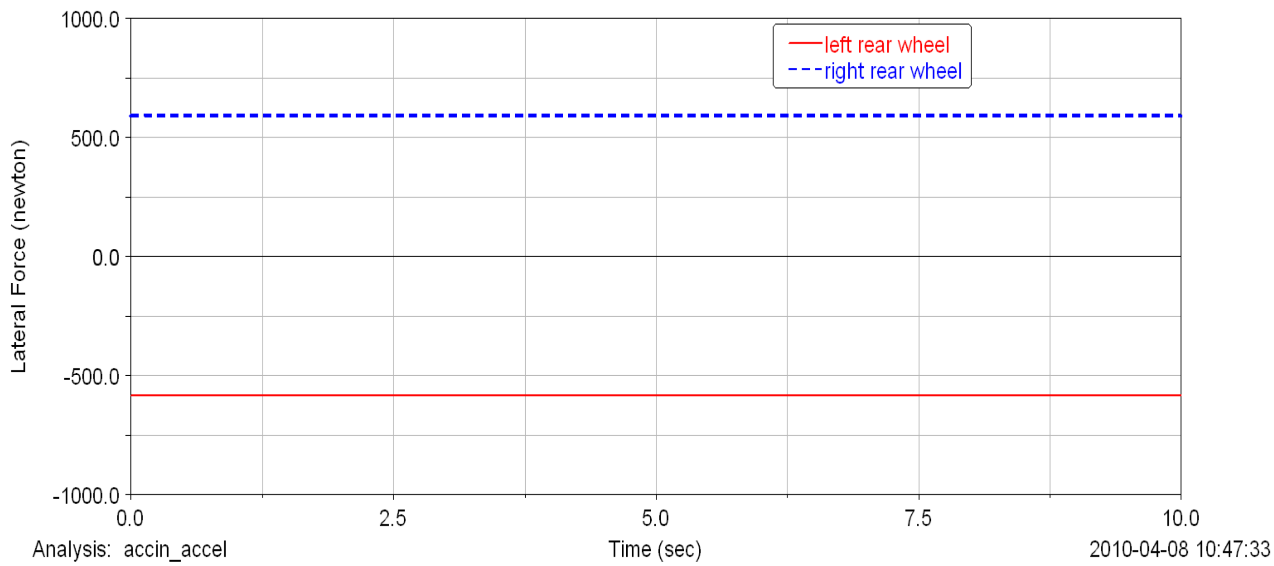
Η επιλογή της συγκεκριμένης γωνίας λοιπόν είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην σταθερότητα,και στην γρήγορη αντίδραση του αυτοκινήτου,σε εντολές του οδηγού που με σκοπό να στρίψει το αυτοκίνητο.

Στην περίπτωση του αυτοκινήτου που χρησιμοποιούμε ως μοντέλο,οι πίσω τροχοί βρίσκονται σε έντονη απόκλιση.Προσομοιώνοντας ευθεία κίνηση με σταθερή ταχύτητα βλέπουμε στο διάγραμμα πως οι πίσω τροχοί παράγουν ήδη πλευρική δύναμη με φορά προς το εξωτερικό του αυτοκινήτου,μεγέθους περίπου 1500 N.



Ας φανταστούμε λοιπόν το αυτοκίνητο να κινείται ευθεία με χαμηλή ταχύτητα και να ξεκινάει να στρίβει σε μία δεξια στροφή(όπως βρισκόταν στριμμένο κι διέγραφε κυκλική τροχία στο τεστ που κάναμε προηγουμένως).Η γωνία ολίσθησης που θα δημιουργηθεί στον πίσω εξωτερικό τροχό θα παράγει δύναμη προς το εσωτερικό της στροφής.Πρώτα όμως πρέπει να εξαλείψει την δύναμη εξαιτίας της απόκλισης,η οποία κοιτάζει στο εξωτερικό της στροφής.Όσο η ταχύτητα στην στροφή είναι μεγαλύτερη,τόσο μεγαλύτερη είναι και η γωνία ολίσθησης,άρα τόσο μεγαλύτερη και η δύναμη η οποία παράγεται εξαιτίας της.Έτσι για μία ταχύτητα-πλευρική επιτάχυνση,η συνισταμένη της πλευρικής δύναμης εξαιτίας της γωνίας ολίσθησης με την πλευρική δύναμη λόγω απόκλισης γίνεται μηδέν.Από την ταχύτητα αυτή και πάνω η συνισταμένη πλευρική δύναμη είναι πια προς το εσωτερικό της στροφής.Ο πίσω εσωτερικός τροχός,ήδη από την κίνηση στην ευθεία παρήγαγε δύναμη προς το εσωτερικό της επικείμενης στροφής,οπότε μέσα στην δεξιά στροφή η συνισταμένη πλευρική δύναμη του τροχού αυτού,είναι πάντα προς το εσωτερικό της.

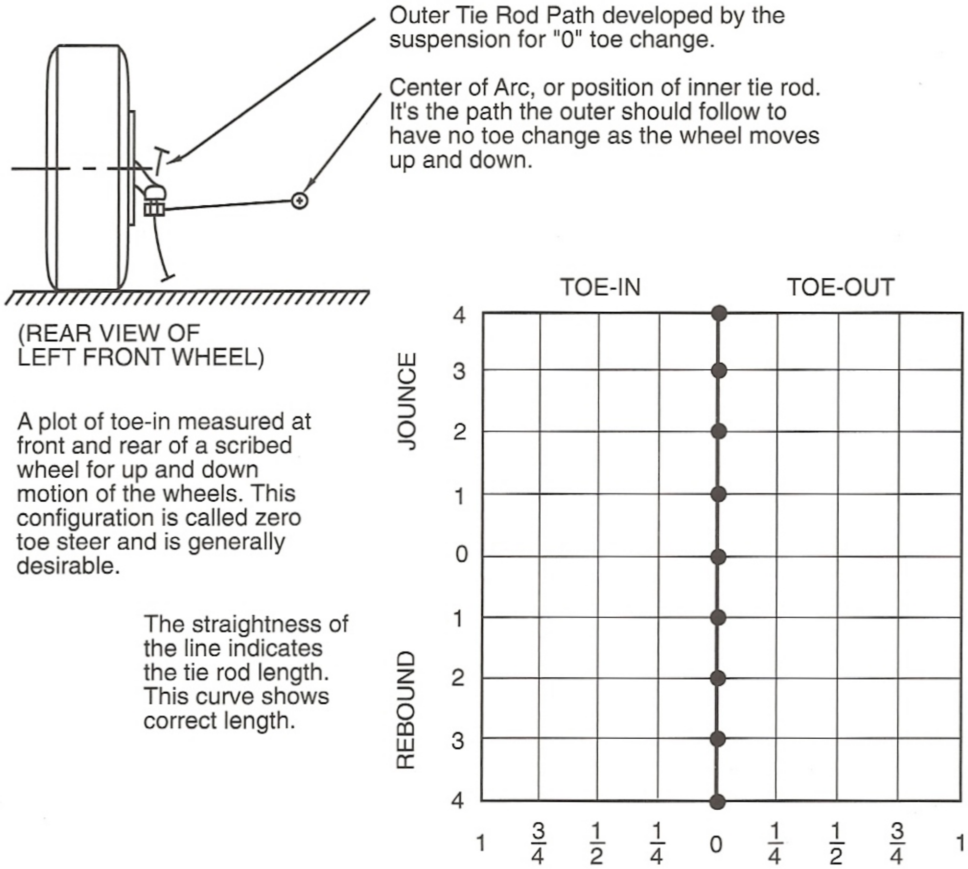
Τώρα θα μειώσουμε σε απόλυτη τιμή την γωνία,και θα της δώσουμε θετικό πρόσημο.Θα έχουμε δηλαδή στους πίσω τροχούς σύγκλιση,αλλά μικρής γωνίας.Αν κάνουμε ξανά την προσομοίωση της κίνησης του αυτοκινήτου σε ευθεία,παρατηρούμε πως οι δυνάμεις άλλαξαν φορά(λόγω σύγκλισης),αλλά και μέτρο (λόγω μικρότερης τιμής της γωνίας κατ’απόλυτη τιμή) που σημαίνει και λιγότερες τριβες.



Κεφάλαιο 10:Μεταβολή της σύγκλισης-απόκλισης κατά την κίνηση-Bump Steer-Roll Steer

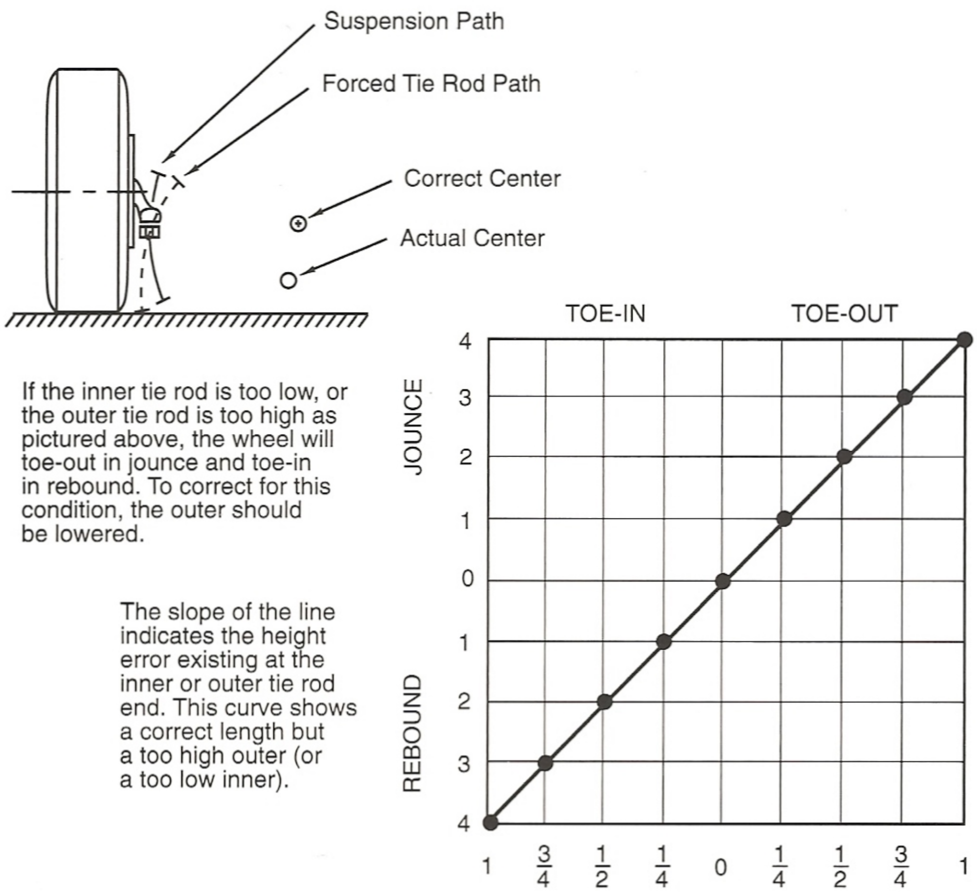
Εξαιτίας της γεωμετρίας των τμημάτων της ανάρτησης,η γωνία στροφής των τροχών αλλάζει όταν οι τροχοί κινούνται πάνω ή κάτω.Ο όρος bump steer αναφέρεται σε αλλαγή της γωνίας του τροχού,όταν ένας τροχός κινείται πάνω ή κάτω σε σχέση με το αμάξωμα,κατά την συμπίεση,ή έκταση της ανάρτησης.Ο όρος roll steer αναφέρεται σε αλλαγή της γωνίας στροφής του ζεύγους τροχών ενός άξονα,κατά τη μεταφορά βάρους στην διάρκεια μίας στροφής,που οδηγεί την συμπίεση της ανάρτησης στην μία πλευρά,και την έκτασή της στην άλλη.Η αλλαγή της γωνίας στροφής των τροχών συμβαίνει εξαιτίας της μεταβολής της σύγκλισης ή απόκλισης,κατά τη διάρκεια αυτών των φαινομένων.Γενικά αυτή η μεταβολή είναι ανεπιθύμητη.Ο λόγος είναι απλός.Εάν ένας τροχός,ενώ βρίσκεται στριμμένος κάτα ένα ποσοστό που έχει επιλέξει ο οδηγός,συναντήσει μία ανωμαλία στο οδόστρωμα,ή κινηθεί κατακόρυφα λόγω μεταφοράς βάρους,το αυτοκίνητο θα ακολουθήσει διαφορετική πορεία από αυτήν που επέλεξε ο οδηγός.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτή η μεταβολή,είναι όπως είπαμε η γεωμετρία των τμημάτων που απαρτίζουν την ανάρτηση.Κάθε ανάρτηση έχει ένα στιγμιαίο κέντρο περιστροφής.Για να μην προκύπτει αλλαγή στην σύγκλιση ή απόκλιση των τροχών,πρέπει το tie rod,εάν προεκταθεί νοητά,να διέρχεται από αυτό το κέντρο περιστροφής.Εάν το tie rod δεν έχει την κατάλληλη γωνία ώστε να τέμνει νοητά το κέντρο περιστροφής,θα συμβαίνουν αλλαγές στην γωνία στροφής των τροχών κατά την συμπίεση ή έκταση της ανάρτησης.Επίσης εάν το tie rod δεν έχει το κατάλληλο μήκος για τη θέση του,δεν θα συνεχίσει να κοιτάζει προς το στιγμιαίο κέντρο περιστροφής της ανάρτησης,όταν αυτή συμπιέζεται ή εκτείνεται.Έτσι η επιλογή της θέσης και του μήκους του tie rod είναι πολύ σημαντικά.Στη συνέχεια παραθέτω κάποια διαγράμματα της σύγκλισης-απόκλισης σε συνάρτηση με την κατακόρυφη κίνηση της ανάρτησης,για διάφορες περιπτώσεις.



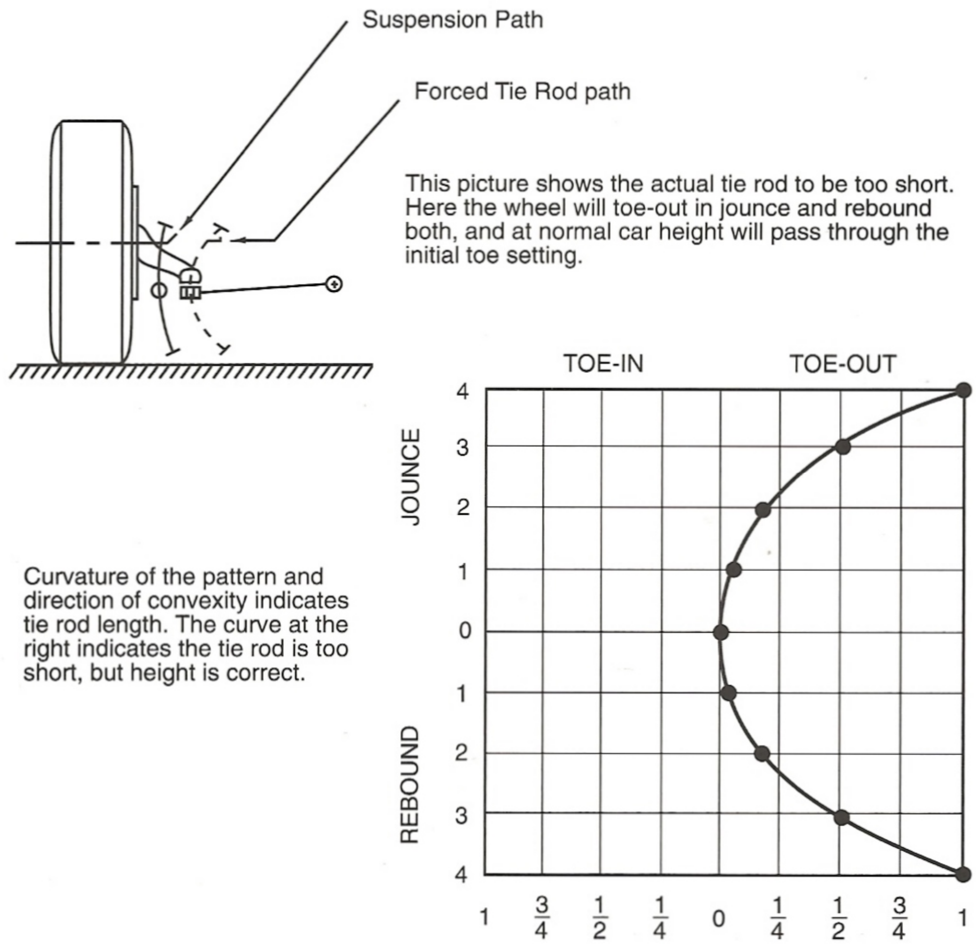
Outer Tie Rod Path developed by the suspension for "0" toe change.
Center of Arc, or position of inner tie rod. It's the path the outer should follow to have no toe change as the wheel moves up and down.
(REAR VIEW OF LEFT FRONT WHEEL)
A plot of toe-in measured at front and rear of a scribed wheel for up and down motion of the wheels. This configuration is called zero toe steer and is generally desirable.
The straightness of the line indicates the tie rod length. This curve shows correct length.
TOE-IN
TOE-OUT
JOUNCE
REBOUND
4
3
2
1
0
1
2
3
4
1
3/4
1/2
1/4
0
1/4
1/2
3/4
1

Εικ.29



Suspension Path
Forced Tie Rod Path
Correct Center
Actual Center
If the inner tie rod is too low, or the outer tie rod is too high as pictured above, the wheel will toe-out in jounce and toe-in in rebound. To correct for this condition, the outer should be lowered.
The slope of the line indicates the height error existing at the inner or outer tie rod end. This curve shows a correct length but a too high outer (or a too low inner).
TOE-IN
TOE-OUT
JOUNCE
REBOUND
4
3
2
1
0
1
2
3
4
1
3/4
1/2
1/4
0
1/4
1/2
3/4
1

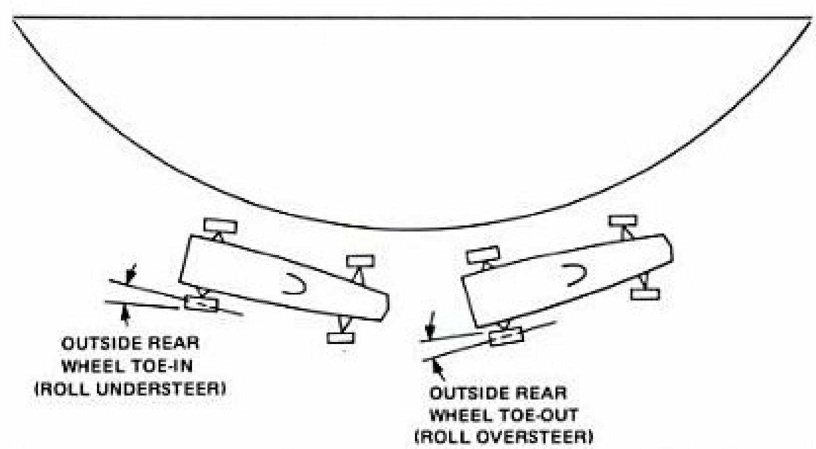
Εικ.30


Suspension Path
Forced Tie Rod path
This picture shows the actual tie rod to be too short. Here the wheel will toe-out in jounce and rebound both, and at normal car height will pass through the initial toe setting.
TOE-IN
TOE-OUT
JOUNCE
REBOUND
Curvature of the pattern and direction of convexity indicates tie rod length. The curve at the right indicates the tie rod is too short, but height is correct.
4
3
2
1
0
1
2
3
4
1 3/4 1/2 1/4 0 1/4 1/2 3/4 1

Εικ.31

10.1 Υποστροφή ή υπερστροφή λόγω roll

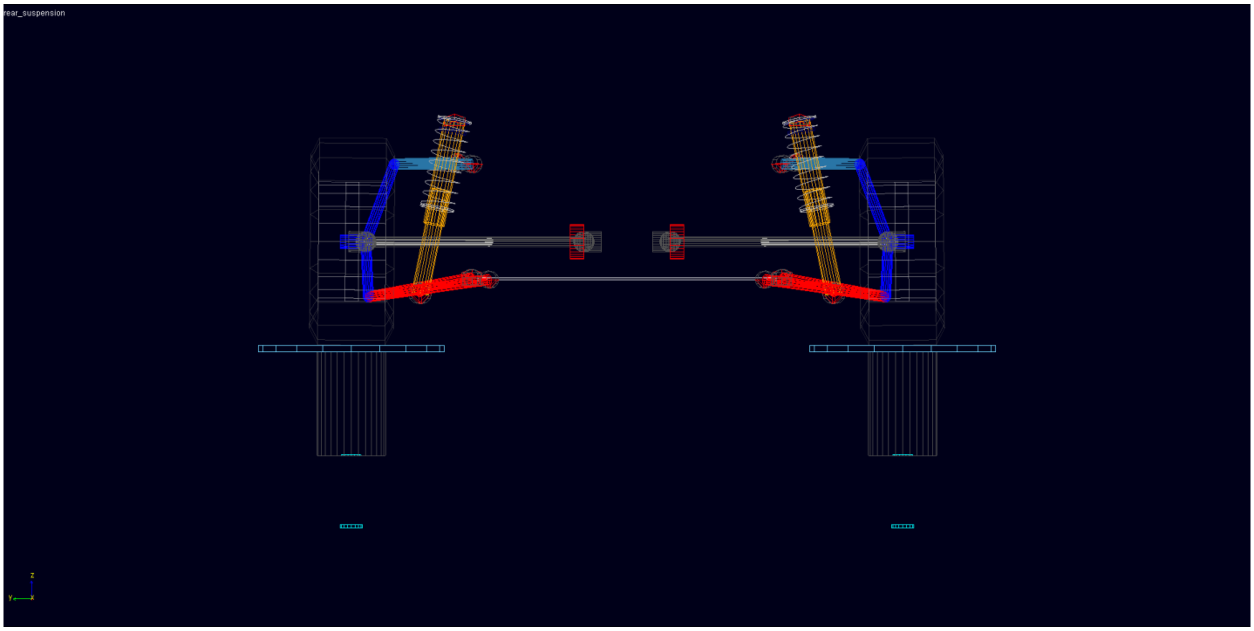
Αν κατά τη διάρκεια της στροφής,και λόγω της μεταφοράς βάρους που συμπιέζει την ανάρτηση στον εξωτερικό τροχό,ενώ την εκτείνει στον εξωτερικό,οι πίσω τροχοί τείνουν μετά την αλλαγή γωνίας να κοιτάξουν προς το εσωτερικό της στροφής,το αυτοκίνητο γίνεται περισσότερο υποστροφικό.Διαφορετικά αν οι πίσω τροχοί τείνουν να κοιτάξουν στο εξωτερικό της στροφής το αυτοκίνητο γίνεται περισσότερο υπερστροφικό.Αυτό εκμεταλλεύονται οι κατασκευαστές αυτοκινήτων,για να ρυθμίσουν την συμπεριφορά τους.

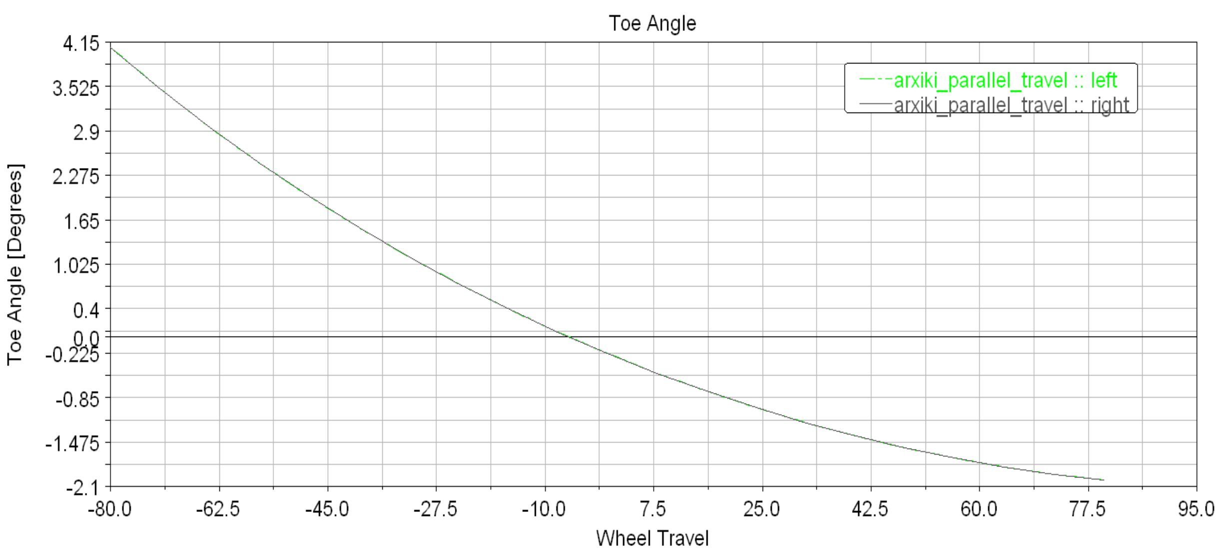


The car in front has roll oversteer and the car behind has roll understeer. This can occur with independent rear suspension or with solid-axle rear suspension. On independent suspension the toe change of the outside tire determines the roll steer, as the inside tire has a reduced amount of vertical force on it in a corner. Notice how the racing drivers are steering the front wheels to compensate for all that help from the rear wheels.

Εικ.32

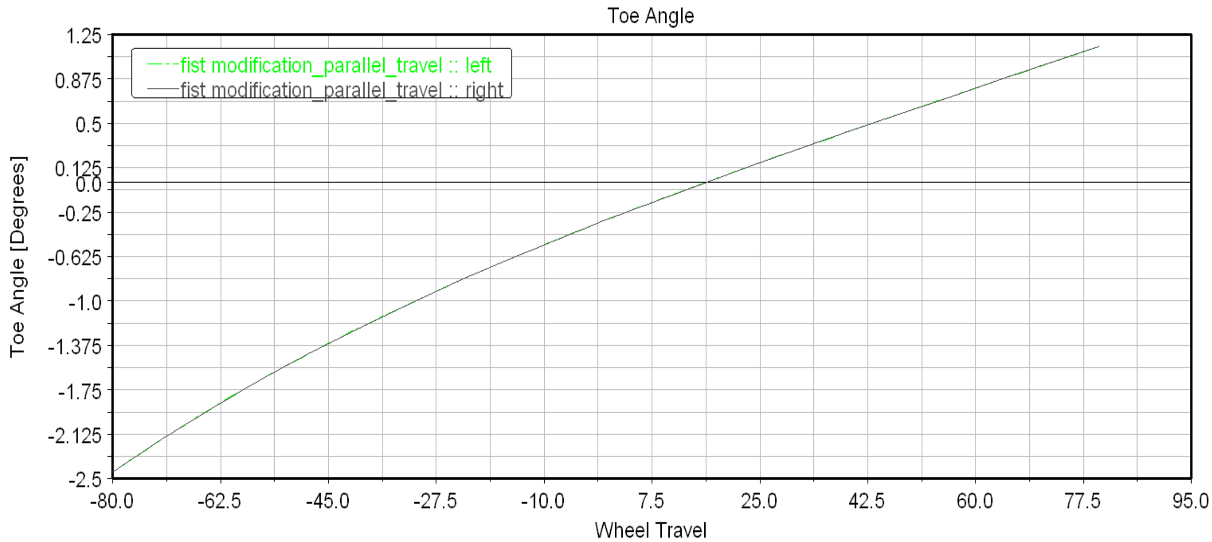
Η πίσω ανάρτηση που χρησιμοποιεί το μοντέλο μας φαίνεται παρακάτω.Εμείς για να μελετήσουμε αυτή την συμπεριφορά,πρώτα θα ελέγξουμε την μεταβολή της σύγκλισης-απόκλισης των πίσω τροχών κατά την συμπίεση της ανάρτησης.Έτσι την υποβάλλουμε σε ένα τέστ όπου από πλήρη έκταση κινούμε τους τροχούς έως την πλήρη συμπίεση της ανάρτησης,και μετράμε τη μεταβολή του η οποία φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.





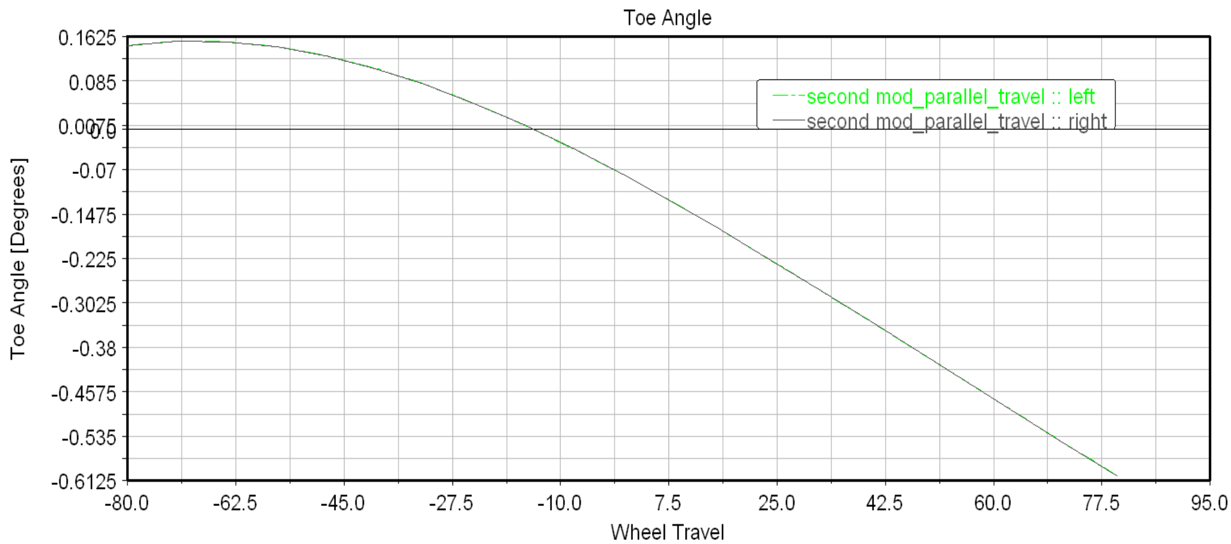
Βλέπουμε πως όσο η ανάρτηση στον εξωτερικό τροχός συμπιέζεται,τόσο μεγαλώνει η απόκλιση του,ενώ όσο η ανάρτηση στον εσωτερικός τροχό εκτείνεται,τόσο κινείται προς τιμές σύγκλισης.Δηλαδή έχουμε τους 2 τροχούς να τείνουν να στρίψουν προς το εξωτερικό της στροφής,που σημαίνει ότι δημιουργούν στο αυτοκίνητο μία υπερστροφική τάση.

Στην συνέχεια μεγαλώνοντας το μήκος του tie rod,και αλλάζοντας την γωνία του,μετακινώντας το εξωτερικό του άκρο 20 mm. χαμηλότερα,ενώ το εσωτερικό του άκρο 20 mm. ψηλότερα,καταλήγουμε στην παρακάτω καμπύλη.



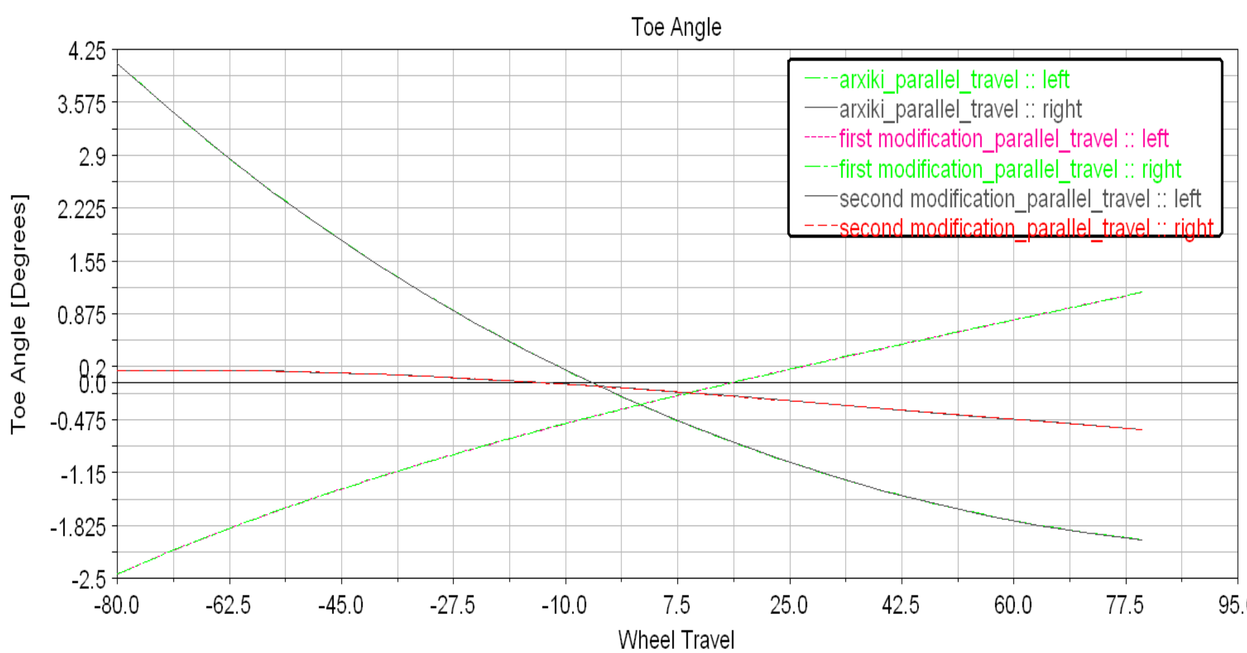
Τώρα όσο η ανάρτηση συμπιέζεται(εξωτερικός τροχός στην στροφή),τόσο ο τροχός αυτός τείνει προς σύγκλιση,ενώ βλέπουμε ότι όταν η ανάρτηση βρίσκεται σε έκταση(εσωτερικός τροχός στην στροφή),τόσο ο τροχός τείνει προς απόκλιση.Δηλαδή οι 2 τροχοί τείνουν να στρίψουν προς το εσωτερικό της στροφής,που σημαίνει ότι δημιουργούν στο αυτοκίνητο μία υποστροφική τάση.

Στη συνέχεια αλλάζουμε ξανά την αρχική θέση του tie rod,μεγαλώνοντας το σε μήκος,και αλλάζουμε τη γωνία του,μετακινώντας μόνο το εσωτερικό του άκρο 20 mm. ψηλότερα.Μετά το τεστ έχουμε την παρακάτω καμπύλη.



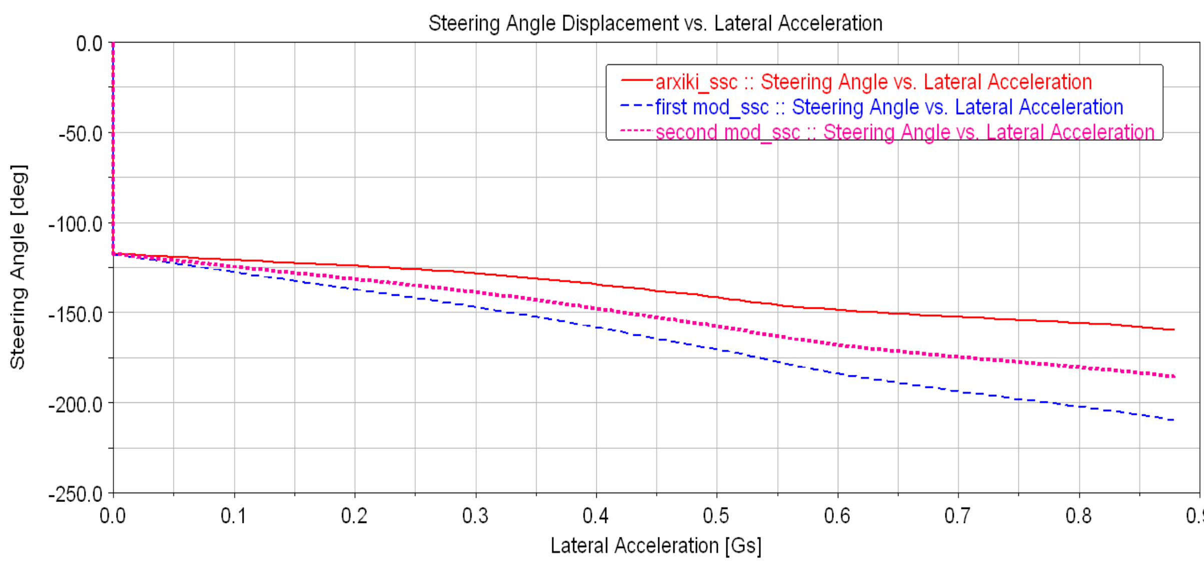
Τώρα παρατηρούμε ότι η ανάρτηση συμπεριφέρεται με όμοιο τρόπο με την αρχική ρύθμιση,αλλά οι αλλαγές στην σύγκλιση απόκλιση είναι πολύ μικρότερου μεγέθους,οπότε και η υπερστροφική συμπεριφορά θα είναι πολύ μικρότερης έκτασης.

Παραθέτω όλες τις διαφοροποιήσεις της ανάρτησης σε ένα διάγραμμα,όπου φαίνεται πως η δεύτερη μετατροπή,εξαλείφει σχεδόν το roll steer.



Στην συνέχεια για να επαληθεύσουμε τα συμπεράσματά μας,θα προσομοιώσουμε ένα τεστ σταθερής κυκλικής ακτίνας.Το αυτοκίνητο θα οδηγηθεί σε κυκλική τροχιά σταθερής ακτίνας 30 μέτρων,σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων-πλευρικών επιταχύνσεων,ξεκινώντας από πολύ χαμηλές τιμές,μέχρι την προσέγγιση των ορίων του αυτοκινήτου(0,88 g.).Η ταχύτητα-πλευρική επιτάχυνση,αυξάνεται με πολύ μικρό βήμα,και σε κάθε νέα τιμή διατηρείται σταθερή,μέχρι να ληφθούν οι κατάλληλες μετρήσεις για συνθήκες steady-state.Το τεστ θα επαναληφθεί για κάθε μία από τις 3 διαφοροποιήσεις της πίσω ανάρτησης,ώστε να δούμε την επίδραση του roll steer στην συμπεριφορά του αυτοκινήτου.

Παραθέτω σε ένα διάγραμμα την γωνία που ήταν απαραίτητο να θέσει ο οδηγός στο τιμόνι για να διατηρήσει την καθορισμένη τροχιά σταθερής ακτίνας 30 μέτρων για κάθε τιμή πλευρικής επιτάχυνσης,για κάθε ένα από τα τρία set-up.



Παρατηρούμε ακριβώς αυτό που περιμέναμε.Το αρχικό set-up είναι το πιο υπερστροφικό από όλα αφού όπως βλέπουμε απαιτεί την μικρότερη γωνία στο τιμόνι,για κάθε τιμή πλευρικής επιτάχυνσης.Η πρώτη μετατροπή στην ανάρτηση δημιούργησε την πιο υποστροφική συμπεριφορά,αφού απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη γωνία στο τιμόνι για κάθε τιμή πλευρικής επιτάχυνσης.Η δεύτερη μετατροπή είναι ανάμεσα στις άλλες 2 περιπτώσεις,αφού είναι λιγότερο υπερστροφική από την αρχική,αλλά περισσότερο από την πρώτη μετατροπή.

Κεφάλαιο 11:Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας,είδαμε πόσο σημαντικές αλλαγές επιφέρουν οι αλλαγές των σχεδιαστικών παραμέτρων στην οδική συμπεριφορά του αυτοκινήτου.Μελετήσαμε ένα μεγάλο εύρος τιμών και περιπτώσεων.Η τελική επιλογή κατά την κατασκευή ενός αυτοκινήτου εξαρτάται από τον προσανατολισμό του.Επιλέγονται ασφαλείς τιμές,περίπου στο μέσο των ακραίων τιμών που δοκιμάστηκαν,για αυτοκίνητα προσανατολισμένα στην ασφαλή μετακίνηση του μέσου οδηγού,ενώ σε αγωνιστικές εφαρμογές,όπου οι επιδόσεις είναι το ζητούμενο,υπάρχει περιθώριο για περισσότερο επιθετικές ρυθμίσεις.Είναι φανερό πως δεν υπάρχει μία βέλτιστη λύση,και αυτή κάθε φορά επιλέγεται,ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών του εκάστοτε αυτοκινήτου.

Εικόνες

Εικόνα 26 : Racecar Vehicle Dynamics-William F. Milliken and Douglas L. Milliken

Εικόνα 27 : Racecar Vehicle Dynamics-William F. Milliken and Douglas L. Milliken

Εικόνα 28 : www.smithees-racetech.com.au

Εικόνα 29 : Chassis Design-William F. Milliken and Douglas L. Milliken

Εικόνα 30 : Chassis Design-William F. Milliken and Douglas L. Milliken

Εικόνα 31 : Chassis Design-William F. Milliken and Douglas L. Milliken

Εικόνα 32 : How To Make Your Car Handle-Fred Puhn

Βιβλιογραφία

Κατασκεύη Οχημάτων : Κωνσταντίνος Ν.Σπέντζας,Ε.Μ.Π.,Αθήνα 2000

Δυναμική Οχημάτων : Κωνσταντίνος Ν.Σπέντζας,Ε.Μ.Π.,Αθήνα 1999

Racecar Vehicle Dynamics : William F. Milliken and Douglas L. Milliken,SAE International,USA 1995

Chassis Design : William F. Milliken and Douglas L. Milliken, Professional Engineering Publishing Limited,USA 1998

Motor Vehicle Dynamics : Modelling And Simulation : Giancalro Genta,World Scientific,Italy 2003

The Automotive Chassis Volume 1 : Components Design : Giancarlo Genta,Lorenzo Morello,Springer,Italy,2009

The Automotive Chassis Volume 2 : System Desing : Giancarlo Genta,Lorenzo Morello,Springer,Italy,2009

The Automotive Chassis : Engineering Principles : J.Reimpell & H.Stoll,Professional Engineering Publishing,Great Britain,1998