



ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΟΝ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΟ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟ : FORMULA 1

ΤΑΤΙΑΝΑ ΤΖΟΒΑΡΑ – ΚΟΡΙΝΑ ΤΑΪΓΑΝΙΔΟΥ
ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ Ι

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ | ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αφορά τις εφαρμογές της φυσικής στα μονοθέσια της Formula 1. Θα εξετάσουμε δηλαδή, ποιες δυνάμεις επιδρούν σε αυτά και πώς τα επηρεάζουν. Το μονοθέσιο της Formula 1 αναπτύσσει πολύ μεγάλες ταχύτητες γεγονός που οφείλεται στην αεροδυναμική καθώς και στην κάθετη δύναμη που ασκείται στο αυτοκίνητο. Πιο συγκεκριμένα, θα μιλήσουμε για την πρόσφυση , την οπισθέλκουσα , την κάθετη δύναμη και την άνωση ή αλλιώς άντωση. Επιπλέον, θα επεκταθούμε και σε άλλες έννοιες της ρευστομηχανικής ,όπως την εξίσωση Bernoulli, το ροόμετρο του Venturi, λόγω των ρευματικών γραμμών που σχηματίζονται κάτω από το αμάξι, στα πλάγια και στις αεροτομές. Στόχος της εργασίας είναι να αναλύσουμε με ποιο τρόπο όλα αυτά επιδρούν στην κίνηση του μονοθέσιου σε σχέση με την τριβή , τις απότομες στροφές και τις αντιστάσεις του αέρα. Τέλος, οι υψηλές ταχύτητες στους αγώνες αναπόφευκτα έχουν προκαλέσει ατυχήματα τα οποία όμως έχουν συντελέσει στην αύξηση των μέτρων ασφαλείας σήμερα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</i>	4
1. ΚΑΘΕΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ.....	4
2. ΠΡΟΣΦΥΣΗ ΚΑΙ ΜΠΛΟΚΑΡΙΣΜΑ ΤΡΟΧΩΝ.....	8
3. ΔΥΝΑΜΗ G.....	11
4. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	17
5. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ-ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	17
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	20
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	21
ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ	21

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Φόρμουλα 1 (FIA Formula One World Championship ή Formula 1 και F1) είναι πρωτάθλημα αγώνων αυτοκινήτου. Το Formula αναφέρεται σε ένα σύνολο κανονισμών που πρέπει απαρεγκλίτως να τηρούνται από τις ομάδες και τα αυτοκίνητα που λαμβάνουν μέρος σε κάθε αγώνα. Υπάρχουν 20 οδηγοί οι οποίοι προσπαθούν να διεκδικήσουν μια θέση στο παγκόσμιο πρωτάθλημα της Φόρμουλα 1. Τα μοντέρνα αυτοκίνητα της Formula 1 είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου σχεδιασμένα γύρω από την αεροδυναμική. Το αυτοκίνητο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν γρηγορότερο και ασφαλέστερο, δημιουργώντας ταυτόχρονα επαρκή δύναμη και ελάχιστη αντίσταση(οπισθέλκουσα).

Η βασικότερη εφαρμογή της φυσικής είναι οι νόμοι του Newton, οι οποίοι ισχύουν για τα αυτοκίνητα της Formula 1, όπως συμβαίνει σε όλα τα μεγάλα αντικείμενα του σύμπαντος. Οι τρεις νόμοι που ισχύουν για τους αγώνες αυτοκινήτων συνοψίζονται από τον Brian Beckman (*Η φυσική των αγώνων*):

Ο πρώτος νόμος: Ένα αυτοκίνητο σε ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή ταχύτητα θα διατηρήσει αυτήν την κίνηση έως ότου ασκηθεί σε αυτό μια εξωτερική δύναμη. Ο μόνος λόγος για το οποίο ένα αυτοκίνητο δεν θα κινείται για πάντα είναι ότι η τριβή, μια εξωτερική δύναμη, επιβραδύνει σταδιακά το αυτοκίνητο κάτω. Η τριβή προέρχεται από τα ελαστικά στο έδαφος και τον αέρα που ρέει πάνω από το αυτοκίνητο. Η τάση ενός αυτοκινήτου να συνεχίζει να κινείται με τον τρόπο που κινείται είναι η αδράνεια του αυτοκινήτου και αυτή η τάση συγκεντρώνεται στο κέντρο βάρους.

Ο δεύτερος νόμος: Όταν εφαρμόζεται μια δύναμη σε ένα αυτοκίνητο, η αλλαγή κίνησης είναι ανάλογη με τη δύναμη που διαιρείται με τη μάζα του αυτοκινήτου. Αυτός ο νόμος εκφράζεται από τη διάσημη εξίσωση $F = ma$, όπου το F είναι μια δύναμη, m είναι η μάζα του αυτοκινήτου, και a είναι η επιτάχυνση του αυτοκινήτου. Μια μεγαλύτερη δύναμη προκαλεί γρηγορότερες αλλαγές στην κίνηση και ένα βαρύτερο αυτοκίνητο αντιδρά πιο αργά στις δυνάμεις. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα εξηγεί γιατί τα γρήγορα αυτοκίνητα είναι ισχυρά και ελαφριά. Όσο περισσότερο F και όσο λιγότερο m έχουμε, τόσο περισσότερο a μπορούμε να πάρουμε.

Ο τρίτος νόμος: Κάθε δύναμη σε ένα αυτοκίνητο από ένα άλλο αντικείμενο, όπως το έδαφος, συνδυάζεται με μια ίση και αντίθετη δύναμη στο αντικείμενο από το αυτοκίνητο. Όταν πατάτε τα φρένα, αναγκάζετε τα ελαστικά να σπρώξουν προς τα εμπρός ενάντια στο έδαφος και το έδαφος να σπρώξει προς τα πίσω. Όσο τα ελαστικά παραμένουν στο αυτοκίνητο, το έδαφος τα πιέζει επιβραδύνει το αυτοκίνητο.

Στην συνέχεια, θα ξεκινήσουμε την ανάλυση βασικών εννοιών τις οποίες θα αξιοποιήσουμε για να κατανοήσουμε την κίνηση των μονοθεσίων στην πίστα.

1. ΚΑΘΕΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑ

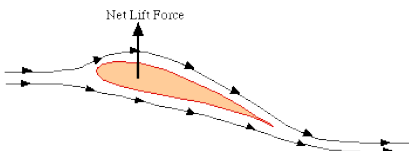
Κάθετη δύναμη (downforce) ονομάζεται η δυναμική άνωση που έχει φορά προς τα κάτω, δηλαδή η προς τα κάτω δύναμη ανύψωσης, η οποία δημιουργείται από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Παράγεται δηλαδή από τον αέρα όταν αυτός συναντά τα φτερά των αεροτομών. Η κάθετη δύναμη συγκρατεί το όχημα από το να απογειωθεί και το πιέζει προς το έδαφος και συνεπώς επιτρέπει στο όχημα να κινείται ταχύτερα πάνω σε μια στροφή αυξάνοντας την δύναμη που ασκείται κάθετα στα ελαστικά δημιουργώντας έτσι περισσότερη πρόσφυση. Μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση :

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

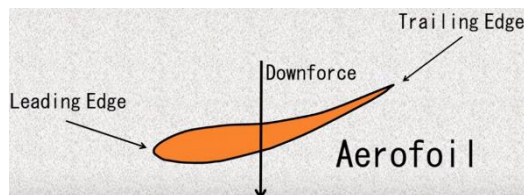
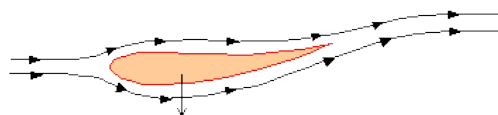
Όπου L η άντωση, C_L ο συντελεστής της άντωσης, ρ η πυκνότητα του ρευστού, S η επιφάνεια σώματος κάθετη στη ροή, v η ταχύτητα σώματος ως προς το ρευστό.

Οι ίδιες αρχές που χρησιμοποιούνται για τα φτερά των αεροσκαφών μπορούν να εφαρμοστούν στα φτερά που βρίσκονται στα μονοθέσια της Formula 1, αλλά αντί να παράγεται ανύψωση, παράγεται δύναμη προς τα κάτω. Η Αρχή του Bernoulli είναι ο φυσικός νόμος που καθορίζει τη λειτουργία ενός φτερού. Καθώς ο αέρας ρέει με διαφορετικές ταχύτητες στις δύο πλευρές της πτέρυγας και σε διαφορετικές αποστάσεις λόγω του σχήματος της πτέρυγας, δημιουργείται διαφορά πίεσης. Η πίεση προσπαθεί να ισορροπήσει προκαλώντας το φτερό να προσπαθήσει και να κινηθεί προς την κατεύθυνση της χαμηλότερης πίεσης.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει ανύψωση σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli:



Κάθετη δύναμη σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli:



Τα δύο πτερύγια που βρίσκονται σε ένα αυτοκίνητο της Formula 1 (εμπρός και πίσω) μπορούν να παράγουν μαζί έως και το 70% της συνολικής κάθετης δύναμης στο αυτοκίνητο. Λόγω αυτού του υψηλού ποσοστού, τα φτερά είναι πολύ σημαντικά συστατικά του αυτοκινήτου. Τα μοντέρνα φτερά είναι περίπλοκα σχεδιασμένα ώστε να μεγιστοποιούν την αποτελεσματικότητά τους. Το



παραπάνω είναι ένα παράδειγμα μιας σύγχρονης μπροστινής πτέρυγας που βρίσκεται σε ένα αυτοκίνητο της Formula 1.

Drag Force ή Οπισθέλκουσα ή αεροδυναμική αντίσταση είναι η δύναμη που τείνει να τραβήξει πίσω το αυτοκίνητο όσο αυτό επιταχύνει και προσπαθεί να αποκτήσει τη μέγιστη ταχύτητα. Στη φυσική, η αεροδυναμική αντίσταση αναφέρεται σε δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση ενός αντικειμένου που κινείται σε σχέση με ένα περιβάλλον υγρό.

Η οπισθέλκουσα μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$$

Όπου

F_D η οπισθέλκουσα

ρ η πυκνότητα του υγρού

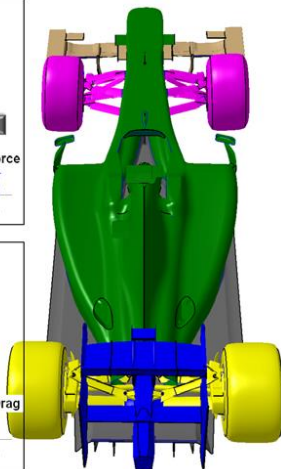
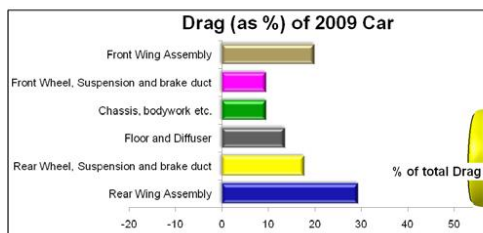
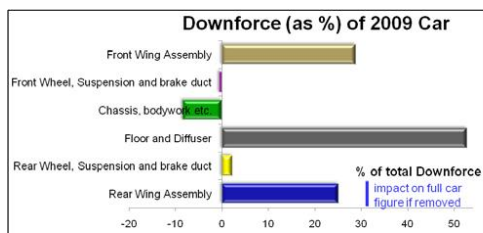
v η ταχύτητα του αντικειμένου σχετικά με το υγρό

A η μετωπική επιφάνεια σώματος(φτερό αεροτομής)

C_D ο συντελεστής της οπισθέλκουσας

Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Long Cylinder		0.82
Short Cylinder		1.15
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

Measured Drag Coefficients



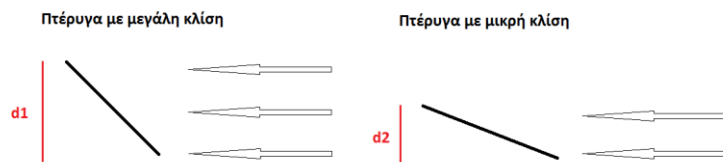
"Aeronautical Journal Jan 2013", courtesy of Willem Toet,

Head of Aerodynamics,

Sauber F1 Team, Sauber Motorsport AG

Έστω ότι ένα μονοθέσιο έχει μια δεδομένη κλίση στις πτέρυγές του. Τότε ο παράγοντας A στην παραπάνω εξίσωση που εκφράζει τη μετωπική επιφάνεια του σώματος (της πτέρυγας δηλαδή) έχει μια συγκεκριμένη τιμή. Όταν η κλίση των αεροτομών αυξηθεί, θα αυξηθεί η επιφάνεια με την οποία συγκρούεται ο αέρας, πράγμα που σημαίνει ότι το αποτέλεσμα της εξίσωσης θα είναι μεγαλύτερο.

Στο διπλανό σχήμα, έχουμε τοποθετήσει δίπλα-δίπλα δύο περιπτώσεις, όπου μια υποτιθέμενη αεροτομή παίρνει δύο διαφορετικές κλίσεις. Τα βέλη αντιπροσωπεύουν τον αέρα. Έχουμε μαρκάρει με κόκκινο το ύψος της επιφάνειας που συγκρούεται με τον αέρα κάθε φορά. Βλέπουμε πως όταν η κλίση της πτέρυγας αυξάνεται, αυξάνεται και η απόσταση “d”, πράγμα που αυξάνει το εμβαδό της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με τον αέρα (το A στην εξίσωση), μεγαλώνοντας έτσι και τις αντιστάσεις. Η αντίσταση αυξάνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από αυτούς της ταχύτητας. Πιο απλά, η φύση προσπαθεί πολύ πιο σκληρά για να κρατήσει πίσω ένα σώμα, από ότι το ίδιο το σώμα προσπαθεί να κινηθεί γρήγορα.



Αν για παράδειγμα στην εξίσωση της αντίστασης βάλουμε τις τιμές 5 και 10 στη θέση της ταχύτητας, θα συμπεράνουμε πως στη δεύτερη περίπτωση η αντίσταση τετραπλασιάστηκε σε σχέση με την πρώτη, από τη στιγμή που η ταχύτητα μονάχα διπλασιάστηκε.

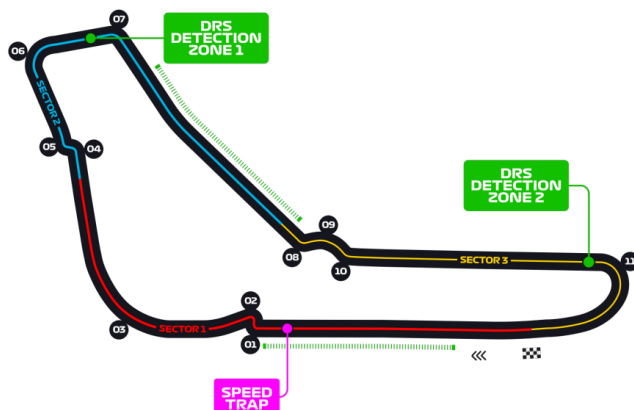
Επιπλέον, αν θελήσουμε να υπολογίσουμε τη σχέση που έχει η ισχύς ενός αυτοκινήτου με την ταχύτητα, θα δούμε πως αυτή είναι ανάλογη με την ταχύτητα στην τρίτη:

$$P_d = F_d V = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_d$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα όχημα, όταν διπλασιάζει την ταχύτητα με την οποία κινείται, τετραπλασιάζει τις αεροδυναμικές του αντιστάσεις ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί την οχταπλάσια ισχύ.

Πέρα από την απώλεια χρόνου στους αγώνες, η αεροδυναμική αντίσταση παίζει σημαντικό ρόλο και στα οχήματα δρόμου. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, ένα όχημα που κινείται μέσα στον αέρα καταβάλλοντας μικρότερη προσπάθεια, καταναλώνει και λιγότερο καύσιμο.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη σημασία της κάθετης δύναμης στα μονοθέσια της F1 θα αναφερθούμε στην πίστα της Monza στην Ιταλία. Πρόκειται για μία από τις γρηγορότερες πίστες



καθώς μπορούν να αναπτυχθούν ταχύτητες της τάξης των 300 km/h στο μεγαλύτερο κομμάτι της πίστας. Στο διπλανό σχέδιο διακρίνονται τέσσερις μεγάλες ευθείες όπου οι οδηγοί μπορούν να τρέξουν με τη μέγιστη ταχύτητα. Παρατηρούμε επίσης ότι στο τέλος των ευθειών, στα σημεία 2,4,7,8, ακολουθούν κλειστές στροφές στις οποίες οι οδηγοί από τα 300 km/h

πρέπει να μειώσουν την ταχύτητά τους στα 100 km/h. Έτσι ,λοιπόν, αυτή η πίστα παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες που επηρεάζουν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του μονοθεσίου. Συγκεκριμένα, για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ταχύτητα στο τέλος των ευθειών απαιτείται μικρή κάθετη δύναμη ενώ η ανάγκη για μεγάλη πρόσφυση ικανοποιείται με μεγάλη κάθετη δύναμη.¹ Ας δούμε σε μια στροφή τι συμβαίνει με την τριβή και την ταχύτητα και πως σχετίζεται η downforce . Για να κινηθεί ένα αυτοκίνητο σε μια στροφή ακτίνας με ορισμένη ταχύτητα, πρέπει να ασκείται σ' αυτό μία κεντρομόλος δύναμη με μέτρο $F_k=m \cdot v^2/R$. Αυτή η δύναμη για να μπορέσει να κρατηθεί το όχημα πρέπει να είναι μικρότερη της τριβής T_{max} που ισούται με $N \cdot \mu$. Όμως όσο μεγαλύτερη είναι η downforce τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίδραση της λόγω του 3ου νόμου του Newton. Συνεπώς μεγάλη downforce έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη αντίδραση N και αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι εφόσον η T_{max} μεγάλωσε , τότε υπάρχει περιθώριο , το όχημα να εισέλθει στην στροφή με ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα αφού από τη σχέση $F_k=m \cdot v^2/R < T_{max}=N \cdot \mu$ φαίνεται ότι η N είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικός ο ρόλος της downforce και γι' αυτό στη σχεδίαση του οχήματος δίνεται πολύ μεγάλη σημασία και στα αεροδυναμικά βοηθήματα που συμβάλλουν στην αύξηση της downforce και μείωση της οπισθέλκουσας. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη πίστα η κάθετη δύναμη (άρα και η πρόσφυση που προσφέρει) είναι μειωμένη στο ελάχιστο. Αυτό αυξάνει το ρόλο της πρόσφυσης που προέρχεται από τα ελαστικά και τις αναρτήσεις. Επιπλέον, η καλή μηχανική πρόσφυση βοηθάει πάρα πολύ στην επιτάχυνση από τις εξόδους των αργών στροφών και αυτά τα σημεία είναι αρκετά καίριας σημασίας. Έπειτα, οι απότομες εναλλαγές από υψηλή σε χαμηλή ταχύτητα καταπονούν τα φρένα τόσο από μηχανολογικής όσο και από ενεργειακής άποψης. Αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι πιλότοι στις ελεύθερες δοκιμές πριν τον αγώνα ζητούν από τους μηχανικούς να εξετάσουν την κατάσταση των φρένων των μονοθεσίων τους καθώς δεν αισθάνονται το μονοθέσιο να σταματά. Παρά την εμπειρία των πιλότων αυτή η αίσθηση της αναποτελεσματικότητας των φρένων πάντα αναφέρεται και υπάρχουν δύο λόγοι γι' αυτό. Πρώτον, η μικρή κάθετη δύναμη σημαίνει ότι το μονοθέσιο έχει μικρότερη οπισθέλκουσα οπότε όταν αφήνεται το γκάζι δεν υπάρχει η αναμενόμενη επιβράδυνση. Δεύτερον, μικρή κάθετη δύναμη σημαίνει επίσης λιγότερη πρόσφυση στα ελαστικά. Το μειωμένο αεροδυναμικό φορτίο επηρεάζει και αυτόν τον τομέα, με τον εξής τρόπο: Όσο περισσότερη κάθετη δύναμη παράγει ένα μονοθέσιο, τόσο μεγαλύτερο “βάρος” πατάει στα ελαστικά όταν αυτό βρίσκεται σε κίνηση. Με το αεροδυναμικό φορτίο μειωμένο στο ελάχιστο λοιπόν, οι πιθανότητες μπλοκαρίσματος κατά το φρενάρισμα αυξάνονται αφού η επαφή με το έδαφος είναι μικρότερη. Η λειτουργικότητα των φρένων απασχολεί σε μεγάλο βαθμό τους μηχανικούς των ομάδων σε αυτή τη πίστα καθώς σκοπός είναι η απόκτηση της μέγιστης δυνατής ταχύτητας στις ευθείες και η ελαχιστοποίηση του χρόνου στο φρενάρισμα. Συμπεραίνουμε ,λοιπόν, ότι στη Monza μπορεί να μη χρειάζεται παραγωγή υψηλού επιπέδου κάθετης δύναμης, χρειάζεται όμως όσο το δυνατόν μικρότερες αεροδυναμικές αντιστάσεις. Η αύξηση της κάθετης δύναμης θα σήμαινε ταυτόχρονα αύξηση της οπισθέλκουσας η οποία θα επηρέαζε αρνητικά την ταχύτητα στις ευθείες.

¹ Εφαρμογές της Φυσικής στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, Δημήτρης Μάνος Ακαδημαϊκό Έτος: 2019-2020, σελ. 9



Ας παρατηρήσουμε την στροφή 3. Είναι ένα επίπεδο τμήμα. Αυτό σημαίνει ότι μετά την κοπή στροφή 2, αρχίζει η επιτάχυνση και παρά τη στροφή το μονοθέσιο αγγίζει τα 295 kph (183mph) και μόλις 139 μέτρα πριν συγκρουστεί με τις μπαριέρες στη στροφή 4, ο πιλότος φρενάρει μέχρι να μειώσει στα 120 kph (74 mph).

2. ΠΡΟΣΦΥΣΗ ΚΑΙ ΜΠΛΟΚΑΡΙΣΜΑ ΤΡΟΧΩΝ

Πρόσφυση λέγεται η φυσική δύναμη που συμβάλλει στο να κρατά ενωμένα δύο σώματα (στερεά ή υγρά), δρώντας στην επιφάνειά τους και κατ' επέκταση είναι η σχετική δύναμη που συγκρατεί ένα όχημα στο έδαφος.

Μηχανική πρόσφυση είναι η πρόσφυση μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος που παρέχεται εξ ολοκλήρου από ανάρτηση και ελαστικά. Η μηχανική πρόσφυση είναι πολύ σημαντική σε πίστες αργής ταχύτητας, σε αργές στροφές όπου η ταχύτητα είναι αρκετά χαμηλή, πχ. 130-150 Km / h και κατά την έναρξη του αγώνα. Επίσης, κατά το πέρασμα πάνω από kerbs, εάν το μονοθέσιο δεν έχει αρκετή μηχανική πρόσφυση, μπορεί να χαθεί πολύτιμος χρόνος με την καταπολέμηση της υπερστροφής ή της υποστροφής. Εάν δεν υπάρχει μηχανική πρόσφυση, το μονοθέσιο είναι αργό και πολύ δύσκολο στην οδήγηση σε αργές στροφές. Η αεροδυναμική πρόσφυση προέρχεται από τα αεροδυναμικά εξαρτήματα και πρόκειται ουσιαστικά για την κάθετη δύναμη. Γι' αυτό εάν δεν υπάρχει αεροδυναμική πρόσφυση, το μονοθέσιο θα είναι ασταθές και δύσκολο στην οδήγηση σε γρήγορα μέρη της πίστας.

Για να ολισθήσει ένα ελαστικό απαιτείται δύναμη ονομάζεται όριο έλξης του ελαστικού (adhesive limit) ή πιο συχνά η στατική τριβή. Αυτός ο νόμος, σε μαθηματική μορφή είναι:

$$F \leq \mu W$$

όπου το F είναι η δύναμη με την οποία το ελαστικό αντιστέκεται στην ολίσθηση, μ είναι ο συντελεστής στατικής τριβής ή ο συντελεστής έλξης/πρόσφυσης (coefficient of adhesion) και W είναι το βάρος ή το κάθετο φορτίο που δέχεται το ελαστικό.

Αυτή η σχέση δηλώνει ότι η πλάγια δύναμη που μπορεί να αντέξει ένα ελαστικό πριν ολισθήσει είναι μικρότερο ή ίσο με το γινόμενο μW . Έτσι, μW είναι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αντέξει το ελαστικό ώστε να παραμείνει ακίνητο και είναι ίση με την στατική τριβή.

Ο λόγος ολίσθησης (slip ratio) είναι ένας τρόπος υπολογισμού και έκφρασης της συμπεριφοράς ολίσθησης του τροχού ενός αυτοκινήτου. Είναι θεμελιώδους σημασίας στον τομέα της δυναμικής του οχήματος, καθώς επιτρέπει την κατανόηση της σχέσης μεταξύ της παραμόρφωσης του ελαστικού και των διαμήκων δυνάμεων (δηλ. των δυνάμεων που είναι υπεύθυνες για την επιτάχυνση και το φρενάρισμα). Επιπλέον, είναι απαραίτητο για την αποτελεσματικότητα οποιουδήποτε συστήματος αντιμπλοκαρίσματος των τροχών (ABS).

$$\text{Slip Ratio \%} = \left(\frac{\Omega R_C}{V} - 1 \right) \times 100\%$$

Όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του τροχού, το R_C είναι ακτίνα τροχού στο σημείο επαφής και το V είναι η ταχύτητα του οχήματος.

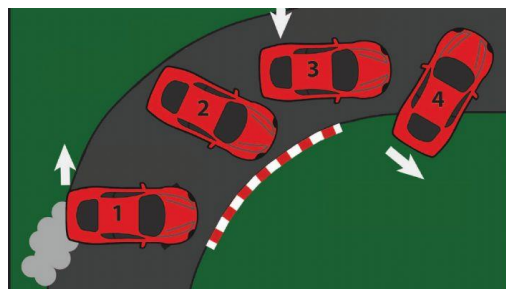
²Με βάση τον λόγο ολίσθησης μπορούμε να εξηγήσουμε τα παρακάτω φαινόμενα.

Εάν το $\Omega \cdot R_C \approx V$, τότε αυτή είναι φυσιολογική κατάσταση κίνησης του αυτοκινήτου. Στην πραγματικότητα σχεδόν ποτέ δεν είναι ίσα και υπάρχει ένα μικρό slip (πχ. 1%) .

Εάν $\Omega \cdot R_C = 0$ και V δεν είναι ίσο με 0, οι τροχοί είναι κλειδωμένοι, αυτή η κατάσταση εμφανίζεται κατά το φρενάρισμα σε πανικό όταν το όχημα χάνει την επιθυμητή πρόσφυση και δεν ανταποκρίνεται στους χειρισμούς του οδηγού.

Εάν το $\Omega \cdot R_C > V$ δείχνει ότι οι τροχοί είναι σε spin, αυτή η κατάσταση εμφανίζεται λόγω του χαμηλού συντελεστή τριβής «μ» μεταξύ ελαστικών και δρόμων, όπως για παράδειγμα σε παγωμένους και λασπωμένους δρόμους. Αυτό σημαίνει ότι η ροπή από τον άξονα είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο συντελεστή τριβής.

Η δεύτερη περίπτωση που αναφέραμε παραπάνω μπορεί να έχει ως συνέπειες τα φαινόμενα της υποστροφής και της υπερστροφής. Το φαινόμενο της υπερστροφής είναι η τάση του οχήματος να διώχνει το πίσω μέρος του στο εξωτερικό της στροφής. Στα αυτοκίνητα με κίνηση στους πίσω τροχούς (που είναι και πιο έντονη) προκαλείται από το απότομο βύθισμα του γκαζιού, όταν οι



τροχοί είναι στριμμένοι. Στα προσθιοκίνητα εμφανίζεται όταν ο οδηγός επιβραδύνει απότομα, καθώς και αν κόψει έντονα το τιμόνι στο εσωτερικό της στροφής. Η υπερστροφή αντιμετωπίζεται με την τεχνική του ανάποδου τιμονιού. Αν το αυτοκίνητο γυρίσει πολύ, χρειάζεται προσοχή ώστε να μην υπάρξει υπερδιόρθωση

(να γυρίσει απότομα προς την αντίθετη φορά). Υποστροφή είναι η απώλεια πρόσφυσης των μπροστινών τροχών σε μια στροφή λόγω της μεγάλης ταχύτητας ή το λανθασμένο βύθισμα του δεξιού πεντάλ, που «αναγκάζει» το όχημα να βγει από την πορεία του (και από το δρόμο) με το μπροστινό μέρος. Εμφανίζεται κυρίως στα προσθιοκίνητα οχήματα (ορισμένες φορές και στα πισωκίνητα, καθώς υποστρέφουν λόγω της περιορισμένης ισχύος του κινητήρα ή της γεωμετρίας της



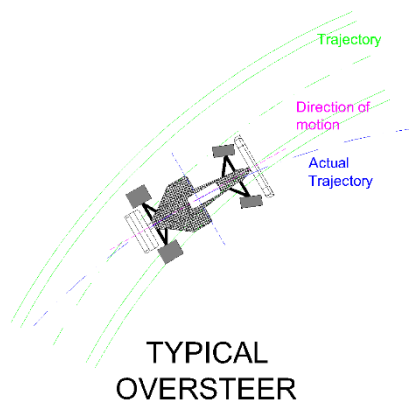
ανάρτησης) και αντιμετωπίζεται με ψυχραιμία από τον οδηγό και προοδευτικό σήκωμα του ποδιού από το πεντάλ του γκαζιού. Το απότομο σήκωμα του δεξιού πεντάλ μπορεί να δυσκολέψει την κατάσταση, κάνοντας το αυτοκίνητο να εμφανίσει απότομη υπερστροφή.



Πιο αναλυτικά, η απόσταση (CoG-arm) από το κέντρο βάρους (CoG) καθορίζει και τον μοχλοβραχίονα της μάζας του οχήματος, ο οποίος ορίζει και την ροπή που αναπτύσσεται στο όχημα κατά την κίνηση του σε στροφή. Αν ο μοχλοβραχίονας αυτός είναι μεγάλος, τότε το μονοθέσιο θα έχει μεγαλύτερες κλίσεις, για τον ίδιο βαθμό ενδοτικότητας της ανάρτησης. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη μεταφορά φορτίου στους εξωτερικούς τροχούς. Καταλαβαίνουμε γιατί η διεύθυνση του άξονα περιστροφής μας δίνει μία γρήγορη απάντηση στο αν η συμπεριφορά του οχήματος είναι υπερστροφική ή υποστροφική. Στην περίπτωση του υπερστροφικού οχήματος, η μεγαλύτερη

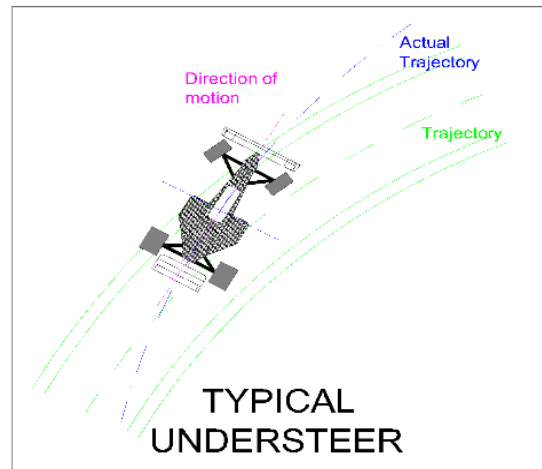
απόσταση από το CoG του κέντρου περιστροφής του εμπρός άξονα, έχει ως αποτέλεσμα αυτός να φορτίζεται περισσότερο κατά την στροφή. Οπότε και αναπτύσσει μεγαλύτερες δυνάμεις. Άρα στο όριο θα είναι αυτός που θα ενδώσει τελευταίος. Οπότε θα είναι το πίσω μέρος αυτό που θα «γλιστρήσει» πρώτα. Κάτι που το αντιλαμβανόμαστε ως υπερστροφή καθώς το όχημα θα κινηθεί προς την φορά της δύναμης αδράνειας. Δηλαδή για το πίσω μέρος προς το εξωτερικό της στροφής. Τα παραπάνω ισχύουν μόνον όταν η κατανομή βάρους είναι ακριβώς 50%-50% μεταξύ του εμπρός και πίσω άξονα, το κέντρο βάρους του οχήματος βρίσκεται στον διαμήκη άξονα συμμετρίας του οχήματος,

έχουμε ακριβώς το ίδιο ελαστικό, δεν απαιτούμε από τους κινητήριους τροχούς να επιταχύνουν το όχημα, ή δεν είμαστε σε φάση φρεναρίσματος, το όχημα κινείται σε επίπεδο δρόμο κλπ. Άλλοι παράγοντες, όπως η πίεση των ελαστικών, η γωνία κάμπερ, τα χαρακτηριστικά της ανάρτησης κλπ. μπορούν να μετριάσουν ή και να αλλάξουν τη συμπεριφορά στο όριο του οχήματος από υποστροφική σε υπερστροφική και το αντίστροφο. Αλλά είναι η διεύθυνση του άξονα περιστροφής αυτή που θα καθορίσει την βασική συμπεριφορά του οχήματος. Υπάρχουν και διατάξεις ανάρτησης όπου το κέντρο βάρους (CoG) βρίσκεται κάτω από τον άξονα περιστροφής του μονοθέσιου. Σε αυτή την περίπτωση η δύναμη αδράνειας, η οποία πάντα έχει φορά προς το εξωτερικό της στροφής, τείνει να στρέψει το μονοθέσιο κατά τέτοιο τρόπο που να φορτίζονται περισσότερο οι εσωτερικοί τροχοί.



² Εφαρμογές της Φυσικής στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, Δημήτρης Μάνος Ακαδημαϊκό Έτος: 2019-2020, σελ. 11

Για την υποστροφή ισχύουν τα αντίθετα. Αν η γωνία ολίσθησης των πρόσθιων τροχών είναι μεγαλύτερη από τη γωνία ολίσθησης των οπίσθιων, αν δηλαδή $\alpha_0 > \alpha_\pi$, τότε, με την επίδραση πλευρικής (φυγόκεντρης) δύναμης, η ολίσθηση των πρόσθιων τροχών θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των οπίσθιων και το εμπρόσθιο μέρος του αυτοκινήτου θα έχει την τάση να απομακρυνθεί από την αρχική τροχιά του και να κινηθεί προς την πλευρά, κατά την οποία το ωθεί η πλευρική δύναμη T_π . Στην έσχατη εκδήλωση της υποστροφής, το αυτοκίνητο αγνοεί τελείως το στρίψιμο του τιμονιού και πορεύεται σχεδόν ευθεία.



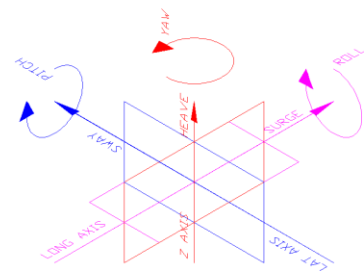
3. ΔΥΝΑΜΗ G

Στη Φυσική, το g εκφράζει την επιτάχυνση που δέχεται ένα σώμα λόγω του βαρυτικού πεδίου της Γης. 1 g ισούται με τη δύναμη της βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης. Για παράδειγμα, αν αφήσουμε ένα αντικείμενο να πέσει στο πάτωμα, η επιτάχυνσή του προς τα κάτω θα ισούται με 1 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από το πόσο κοντά βρίσκεται το αντικείμενο στον πυρήνα της Γης, κάτι που σημαίνει ότι η τιμή του διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.

Επιτάχυνση καλούμε το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας ως προς το χρόνο. Οποιασδήποτε μεταβολής, είτε αυτή είναι θετική είτε αρνητική.

Η μάζα και το βάρος είναι δύο διαφορετικές έννοιες. Το βάρος είναι δύναμη, που η τιμή της ισούται με τον πολλαπλασιασμό της μάζας επί την επιτάχυνση της βαρύτητας. Για αυτό το λόγο, αν κάποιος ζυγιστεί στο φεγγάρι, όπου το g είναι πολύ μικρότερο, θα είναι και ελαφρύτερος. Η μάζα από την άλλη πλευρά, είναι σταθερό μέγεθος. Η τιμή της μάζας εκφράζει την ποσότητα της ύλης που περιέχεται σε ένα σώμα, και δεν αλλάζει.

Πολλές φορές ακούμε για την δύναμη G-Force, σε αγώνες αυτοκινήτων, στην Formula 1 σε αεροσκάφη μαχητικά κλπ. Η τιμή της επιτάχυνσης στο φαινόμενο που εξετάζουμε εκφράζεται ως πολλαπλάσιο της επιτάχυνσης της βαρύτητας, πχ 2G, 3G. Η επιτάχυνση G είναι διανυσματική, έχει δηλαδή διεύθυνση και φορά. Παράγεται από την άσκηση κάποιας δύναμης στο αντικείμενο που επιταχύνεται, και η τιμή της εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Η δύναμη G είναι μία φυσική δύναμη που ισοδυναμεί με μία μονάδα βαρύτητας που πολλαπλασιάζεται κατά τη διάρκεια ταχείας αλλαγής κατεύθυνσης ή ταχύτητας, όπως κατά την επιτάχυνση και την πέδηση. Ζούμε σε έναν τρισδιάστατο κόσμο, χρησιμοποιώντας τρεις άξονες για να περιγράψουμε το χώρο γύρω μας. Σε όρους F1, ο διαμήκης άξονας X βρίσκεται κατά μήκος του μονοθεσίου, ο πλευρικός άξονας Y βρίσκεται εγκάρσια του μονοθεσίου και ο κάθετος άξονας Z κάθετα σε αυτό, από πάνω προς τα κάτω δηλαδή. Κοιτώντας τις τάσεις που εφαρμόζονται σε ένα μονοθέσιο και τον οδηγό του, η δύναμη G μπορεί να αναλυθεί σε διαμήκη επιτάχυνση, κατά την

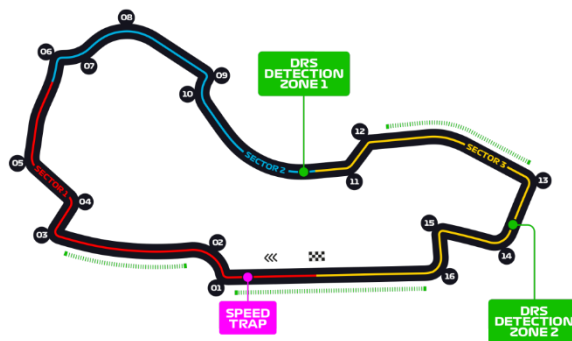


επιβράδυνση ή την επιτάχυνση, σε πλευρική επιτάχυνση, στις στροφές, και σε κατακόρυφη επιτάχυνση, που προκαλείται από εξογκώματα, kerbs ή αλλαγή της κλίσης της πίστας. Τα αποτελέσματα των επιταχύνσεων g εκφράζονται μέσω της μεταβολής του βάρους του εμπλεκόμενου αντικειμένου. Το βάρος ενός σώματος ισούται με το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της μάζας του με το g . Όσο περισσότερο αυξάνεται η τιμή του g (ουσιαστικά της επιτάχυνσης), τόσο μεγαλώνει και το βάρος του σώματος στο οποίο ασκείται.

Το βάρος θεωρείται και αυτό δύναμη. Αυτή η δύναμη, που παράγεται από τα πολλαπλάσια τις επιτάχυνσης g , είναι που επιφέρει κατά κύριο λόγο τα αποτελέσματα. Η κατεύθυνση της δύναμης που προκύπτει από το βάρος είναι πάντα αντίθετη σε αυτήν της επιτάχυνσης. Για παράδειγμα όταν ο οδηγός ενός μονοθεσίου φρενάρει απότομα, η επιβράδυνσή του μπορεί να ισούται με έναν συγκεκριμένο αριθμό g , ας πούμε 3. Αν η μάζα του κράνους του ισούται με 3 κιλά, τότε σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω, αυτό θα ασκήσει δύναμη προς τα εμπρός ίση με $W=3*3G$, δηλαδή περίπου 90N, αν θεωρήσουμε χάρη παραδείγματος πως $g=10 \text{ m/s}^2$.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί το εξής. Η σχέση μεταξύ δύναμης και επιτάχυνσης πηγάζει από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, $F = ma$ όπου: F είναι δύναμη, m είναι μάζα και a είναι επιτάχυνση. Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός αντικειμένου, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που βιώνει με την ίδια επιτάχυνση. Αυτό σημαίνει ότι αντικείμενα με διαφορετικές μάζες που έχουν αριθμητικά πανομοιότυπες «δυνάμεις g » στην πραγματικότητα θα υπόκεινται σε δυνάμεις πολύ διαφορετικού μεγέθους. Για το λόγο αυτό, η g -force δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι μετρά τη δύναμη σε απόλυτους όρους.

Ας δούμε τώρα τον εναρκτήριο αγώνα της σεζόν 2019 στην Αυστραλία. Η Μελβούρνη δεν είναι τυπικά μία από τις πιο απαιτητικές πίστες σωματικά για τους οδηγούς. Ωστόσο, στην αριστερή Στροφή 11, οι δυνάμεις αγγίζουν τα 5G. Το Αυστραλιανό Γκραν Πρι έχει τα δύο υψηλότερα σε g -force σημεία πέδησης. Πράγματι, οι οδηγοί πρέπει να αντεπεξέλθουν σε πίεση -5,8g ενώ επιβραδύνουν για το άνοιγμα της στροφής 2, πριν βιώσουν άλλα -5,6g μόνο λίγα δευτερόλεπτα αργότερα στη στροφή 3.



Οι μεγαλύτερες διαμήκεις επιτάχυνσεις που σημειώνονται στην F1 είναι στην πραγματικότητα επιβράδυνσεις, που επιτυγχάνονται κάτω από έντονα φρεναρίσματα στο τέλος μιας μεγάλης



ευθείας. Δεδομένου ότι η διαμήκης επιτάχυνση G συνδέεται επίσης με την κάθετη δύναμη, η μέγιστη επιβράδυνση επιτυγχάνεται μόνο τη σύντομη στιγμή όταν οι οδηγοί πατάνε τα φρένα. Ενώ οι ζώνες ασφαλείας τους κρατούν στη θέση τους στο μονοθέσιο, το κεφάλι τους ωθείται προς τα εμπρός. Το ίδιο το μονοθέσιο θα “ριχτεί” προς τα εμπρός, καθώς το κάθετο φορτίο στις τέσσερις γωνίες μεταφέρεται από τα πίσω ελαστικά στα μπροστινά. Η μπροστινή ανάρτηση και τα ελαστικά

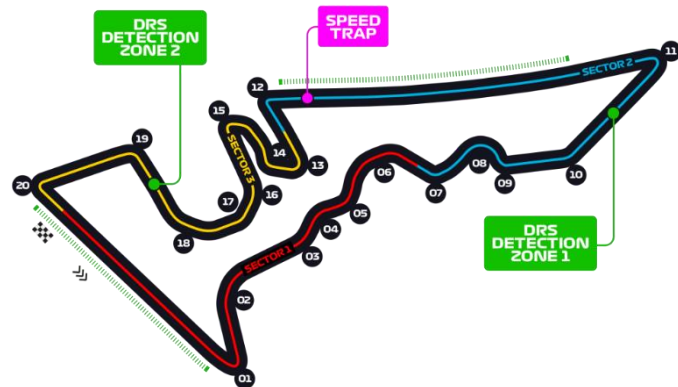
συμπιέζονται από τις δυνάμεις G , καθώς τα πίσω αποφορτώνονται.

Η πλευρική επιτάχυνση επιτυγχάνεται μέσα από ευρείες, γρήγορες στροφές. Η πλευρική επιτάχυνση, όπως αυτή που ασκείται στον οδηγό μέσα στο cockpit, συμπιέζει τα πλευρά και τους μηρούς του που συναντούν την άκρη του καθίσματος. Χρειάζονται, δηλαδή, πολύ γυμνασμένους μύες του αυχένα για να υποφέρουν τις επαναλαμβανόμενες δυνάμεις που σπρώχνουν το κεφάλι τους προς το εξωτερικό της στροφής, λόγω της φυγόκεντρου, όπως θα αναλύσουμε αργότερα. Κάτω από πλευρική επιτάχυνση, τα μονοθέσια θα τείνουν να κυλήσουν προς το εξωτερικό της στροφής. Το κάθετο φορτίο στις τέσσερις γωνίες του μονοθέσιου θα μεταφερθεί από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά ελαστικά. Όταν πρόκειται για την F1, καταγράφονται κατακόρυφες επιταχύνσεις κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής όταν ένα μονοθέσιο χτυπά ένα κράσπεδο ή ακολουθεί έναν κυματισμό στην πίστα. Αλλά αυτά τα συμβάντα είναι συνήθως υπερβολικά σύντομα, με διάρκεια μόλις λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για οποιουδήποτε είδους συνεχούς κάθετου υψώματος απαιτείται μία μεγάλη αλλαγή κλίσης. Η Στροφή 1 σε Spielberg και Austin είναι εύστοχα παραδείγματα.

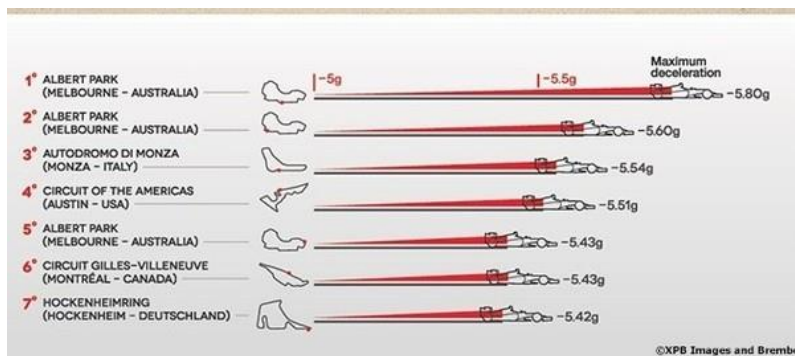
Στη διπλανή φωτογραφία απεικονίζεται το σχέδιο της πίστας στο Austin.



Πουθενά, όμως, δεν είναι τόσο έντονη η αλλαγή κλίσης στην F1 όσο στην στροφή Eau Rouge. Καθώς οι οδηγοί χτυπούν πολύ στο κάτω μέρος, το μονοθέσιο θλίβεται στο έδαφος, με τα ελαστικά και την ανάρτηση να συμπιέζονται καθώς η κάθετη επιτάχυνση στο αυτοκίνητο αγγίζει τα 2,5G, ακριβώς στο πίσω μέρος του οδηγού. Το μονοθέσιο ανεβαίνει το λόφο και πριν φτάσει στην κορυφή, οι κατακόρυφες επιταχύνσεις φτάνουν το 0.5G, με τον οδηγό να βιώνει την έλλειψη βαρύτητας και πραγματικά να νιώθει τις ζώνες να τον συγκρατούν στο cockpit για πάνω από μισό δευτερόλεπτο. Οι οδηγοί πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικοί στην έξοδο της στροφής, καθώς το μονοθέσιο μπορεί να ελαφρύνει και να χάσει γρήγορα την πρόσφυση.



Επομένως, η δύναμη g που βιώνει ο οδηγός στο φρενάρισμα εξαρτάται από τις συνθήκες πρόσφυσης και την αεροδυναμική αντίσταση. Εάν όλες οι άλλες συνθήκες πέδησης είναι

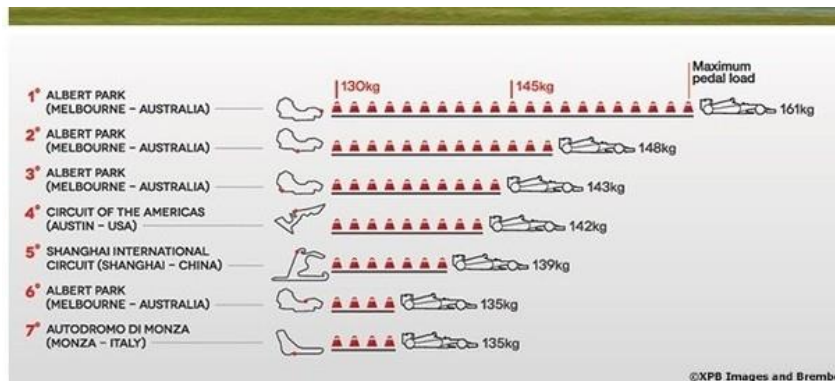


Διάγραμμα που απεικονίζει τις 7 στροφές με τις μεγαλύτερες δυνάμεις G.

Είναι γεγονός ότι τα αυτοκίνητα της F1 έχουν απίστευτη ικανότητα επιβράδυνσης αφού μπορούν να σταματήσουν από τα 200 km / h σε 65 μέτρα σε μόλις 2,9 δευτερόλεπτα. Είναι σχεδόν σαν να χτυπά κανείς έναν τοίχο από τούβλα. Ταυτόχρονα, τα φρένα δεν είναι όπως στο μέσο σύστημα ABS που έχουν τα οδικά αυτοκίνητα. Τα φρένα τους δεν έχουν ABS. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να πατήσουν το πεντάλ του φρένου με δύναμη 100 κιλών για να σταματήσει το αυτοκίνητο. Οι πιλότοι της F1 χρησιμοποιούν το σωματικό τους βάρος και τις δυνάμεις G για να επιβραδύνουν το αυτοκίνητο. Στα 4G επιβράδυνση, ένας οδηγός F1 ζυγίζει πραγματικά 320 κιλά



αν έχει μάζα 80 κιλά, κάτι που είναι περισσότερο από αρκετό. Αρχικά, πιέζει το πεντάλ του φρένου, το αυτοκίνητο αρχίζει να επιβραδύνεται, η δύναμη G αυξάνεται όπως και το βάρος του, εφαρμόζει περισσότερη πίεση στο πεντάλ (καθώς στην πραγματικότητα οδηγούν το πεντάλ φρένου). Όμως, πρέπει να γνωρίζει πότε πρέπει να πατήσει το φρένο.



4. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Η Αεροδυναμική είναι ιδιαίτερος κλάδος της Μηχανικής των ρευστών, και ειδικότερα της Δυναμικής. Ο κλάδος βασίζεται στην έρευνα και μελέτη των νόμων που διέπουν τη ροή του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από διάφορα σώματα και συνδέεται στενά με τη δυναμική του ρευστού καθώς ο αέρας θεωρείται συμπίεσιμο ρευστό. Σήμερα, η αεροδυναμική έχει καταλυτικό ρόλο στην απόδοση του αυτοκινήτου της F1 και μάλιστα οι ομάδες επενδύουν περίπου το 20% του συνολικού προϋπολογισμού τους στην κατασκευή των αεροδυναμικών στοιχείων του μονοθέσιου. Αυτά κάνουν το μονοθέσιο ταχύτερο, αλλά και ξεχωριστό από πλευράς αεροδυναμικής σχεδίασης και συνολικής εμφάνισης. Η αεροδυναμική είναι ένα από τα

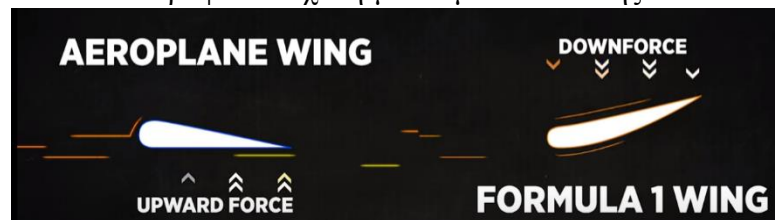


σημαντικότερα κομμάτια στο μονοθέσιο διότι συμβάλλει στην ανάπτυξη της τελικής ταχύτητας. Ακόμη, βοηθάει στο να υπάρχει μεγαλύτερη πρόσφυση, δηλαδή λόγω της αύξησης της κάθετης δύναμης, πιέζει το αυτοκίνητο κάτω προς το έδαφος και αυξάνεται η διαθέσιμη τριβή μεταξύ του αυτοκινήτου και του δρόμου, επιτρέποντας έτσι υψηλότερες ταχύτητες στις στροφές. Τα μονοθέσια της F1 μπορούν να θεωρηθούν ως διαμορφώσεις καμβά με την έννοια ότι η εμπρός και η πίσω πτέρυγα βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές του κέντρου βάρους και τα δύο «ανυψώνονται» προς την ίδια κατεύθυνση δημιουργώντας πρόσφυση.

Στη Ρευστομηχανική, η αρχή του Bernoulli αποδεικνύει πως όταν αυξάνεται η ταχύτητα μιας ροής (υγρού ή αερίου), η πίεσή της μειώνεται και αποδεικνύεται από την εξίσωση :

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = \text{σταθερό}$$

Ας πάρουμε για παράδειγμα το φτερό του αεροπλάνου. Η αρχή του Bernoulli χρησιμοποιείται εκεί αλλά αντίστροφα σε σχέση με τα μονοθέσια της F1. Εκεί ο αέρας επάνω από τα φτερά κινείται



ταχύτερα σε σχέση με αυτόν κάτω από αυτά. Έτσι η υποπίεση βρίσκεται επάνω από το αεροσκάφος, δημιουργώντας άνοση. Όπου έχουμε δηλαδή μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα από την

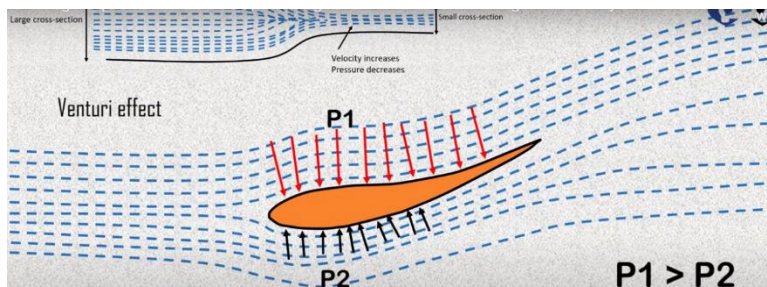
εξίσωση Bernoulli έχουμε μικρότερη πίεση και όπου έχουμε μικρότερη ταχύτητα αέρα έχουμε μεγαλύτερη πίεση και γι' αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη μιας ανοδικής δύναμης, η οποία επιδρά στο φτερό. Τα φτερά αεροτομών της F1 τοποθετούνται με ανάποδη φορά ώστε να παραχθεί η κάθετη δύναμη που σπρώχνει το μονοθέσιο προς τα κάτω. Η παραγωγή κάθετης δύναμης



εξαρτάται από την ταχύτητα του μονοθεσίου και προέρχεται, όπως φαίνεται και στην διπλανή εικόνα, από την μπροστινή αεροτομή, το πίσω φτερό και ένα μέρος του

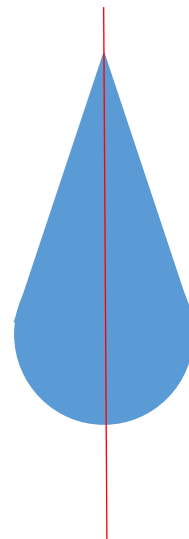
πατώματος του μονοθεσίου που ονομάζεται διαχυτής (diffuser). Στη μέγιστη ταχύτητα, λίγο πιο πάνω από τα 300 km/h, το μονοθέσιο της F1 μπορεί να παράγει παραπάνω από 30.000 N κάθετης δύναμης που ισοδυναμεί περίπου με το βάρος ενός αντικειμένου μάζας 3 τόνων.

Για να εμβαθύνουμε στους νόμους της φυσικής που διέπουν την λειτουργία των αεροτομών θα αναφερθούμε συγκεκριμένα στο ροόμετρο του Venturi. Όταν ένα ρευστό ρέει από μία διατομή A_1 σε μία διατομή A_2 (όπου $A_2 < A_1$) υπάρχει πτώση της πίεσης. Για να

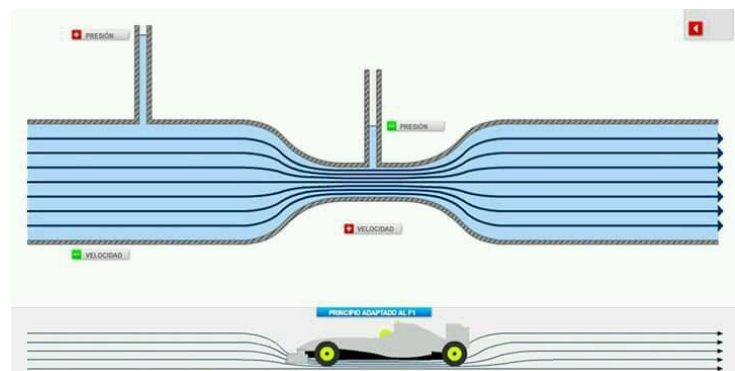


παραμένει λοιπόν ίδια η ποσότητα ρευστού στις δύο διατομές, η ταχύτητα U_2 πρέπει να είναι μεγαλύτερη της U_1 . Όπως φαίνεται στην εικόνα, όταν ο αέρας ρέει από μια μεγάλη επιφάνεια επαφής σε μια μικρότερη η ταχύτητά του αυξάνεται ενώ η πίεση μειώνεται. Παρατηρούμε ότι η πίεση στο πάνω μέρος του φτερού είναι μεγαλύτερη από το κάτω μέρος του οπότε παράγεται η κάθετη δύναμη.

Γενικά το σχήμα της σταγόνας είναι το πιο «βολικό» στη φύση διότι είναι η αντίδραση που έχει ο αέρας στο υγρό. Αν παρατηρήσουμε την πτέρυγα στα αμάξια της F1 έχουν το σχήμα της μισής σταγόνας. Έτσι εξασφαλίζουμε τη μέγιστη δυνατή κάθετη δύναμη (downforce) χωρίς να παράγεται μεγάλη drag force (οπισθέλκουσα) και να σπαταλάει περισσότερη ενέργεια. Η μείωση του drag force είναι επίσης πολύ σημαντική στη Formula 1. Κάθε χαρακτηριστικό του αυτοκινήτου, συμπεριλαμβανομένου του οδηγού, λαμβάνεται υπόψη κατά την προσπάθεια μείωσης της οπισθέλκουσας. Το κράνος των οδηγών, οι σύνδεσμοι για εξαρτήματα ανάρτησης, τα αεροδυναμικά βοηθήματα έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν την οπισθέλκουσα του αυτοκινήτου.



Ο αέρας περνάει πάνω και κάτω από το αυτοκίνητο και οι ρευματικές του γραμμές ακολουθούν το σχεδιασμό του αυτοκινήτου. Η πίεση στο άνω μέρος των πτερύγων είναι μικρότερη από αυτήν στο κάτω μέρος. Η δύναμη που δέχονται οι πτέρυγες λόγω αυτής της διαφοράς πίεσης λέγεται αεροδυναμική

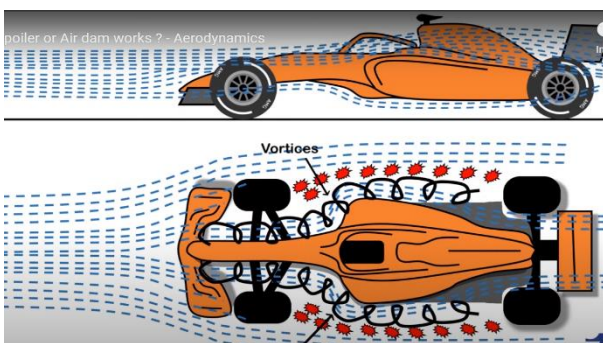


ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα της λέγεται δυναμική άνωση (ή άντωση).



Οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού, στην περίπτωσή μας του αέρα, ή, αν το δούμε αντίστροφα, της ταχύτητας του αυτοκινήτου ως προς τον αέρα. Ο αέρας στο πίσω κάτω μέρος του αυτοκινήτου μειώνει την ταχύτητα και αυξάνει την πίεση. Το diffuser (διαχυτής) ουσιαστικά απαλείφει την drag force και αυτά τα λεπτά πτερύγια δημιουργούν στενά κανάλια ώστε ο αέρας που

έρχεται από κάτω να κατευθύνει τη ροή του αέρα, να φεύγει πιο στρωτά και όχι με στροβιλισμούς (vortices). Οι μηχανικοί στα τέλη της δεκαετίας του '70, προσπάθησαν με κατάλληλη διαμόρφωση του πατώματος των αυτοκινήτων να επιταχύνουν τη ροή του αέρα ανάμεσα στο πάτωμα του μονοθεσίου και στο δρόμο. Ο λόγος είναι ότι όσο περισσότερο μειώνεται το πάχος της ροής ανάμεσα στο



πάτωμα και το δρόμο, τόσο περισσότερο αυξάνεται η ταχύτητά της. Έτσι, με τον αέρα κάτω από το πάτωμα να κινείται ταχύτερα σε σχέση με αυτόν επάνω από το μονοθέσιο, η πίεσή του έπεφτε χάρη στην αρχή του Bernoulli. Και εφόσον δημιουργούταν διαφορά πίεσης ανάμεσα στο κάτω μέρος του μονοθεσίου και στο πάνω, το αυτοκίνητο πιεζόταν προς το δρόμο. Αποτέλεσμα είναι η εξαγωγή κάθετης δύναμης χωρίς το κόστος των αεροδυναμικών αντιστάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

5. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ-ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Η Φόρμουλα 1 αποτελεί ένα από τα πιο εντυπωσιακά αλλά και συγχρόνως επικίνδυνα σπορ. Από την έναρξη των πρώτων αγώνων το 1950 μέχρι και σήμερα, 70 χρόνια μετά, έχουν καταγραφεί πληθώρα ατυχημάτων στις πίστες ενώ κάποια εξ αυτών ήταν θανάσιμα. Τα περισσότερα θανατηφόρα ατυχήματα συνέβησαν στην αρχή της ιστορίας του αθλήματος, όταν η ασφάλεια περνούσε σε δεύτερη μοίρα. Από την δεκαετία του '90 και μετά τον θάνατο του Ayrton Senna, παράλληλα με την εξέλιξη των μονοθεσίων δόθηκε έμφαση και στην αύξηση των μέτρων ασφαλείας των πιλότων ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν και φυσικά να επιβιώσουν σε οποιαδήποτε έκτακτη κατάσταση βρεθούν.

Θα αναφέρουμε ενδεικτικά κάποια ατυχήματα των τελευταίων δεκαετιών καθώς και τα υψηλά μέτρα ασφαλείας που έχουν παρθεί προς αποφυγήν και άλλων θυμάτων.

Ο Robert Kubica έχασε τον έλεγχο του μονοθεσίου, χτύπησε στον τσιμεντένιο τοίχο συγκράτησης, διέσχισε την πίστα και προσέκρουσε στις μπαριέρες. Ήταν ο 27ος γύρος όταν ο Kubica έχασε την εμπρός αεροτομή και άφησε τον δρόμο με 320km/h. Το ανεξέλεγκτο μονοθέσιο έσκασε μετωπικά σε τσιμεντένιο τοίχο με 230km/h, ενώ ο ίδιος ένοιωσε στιγμιαία 75 G. Δηλαδή, επιβράδυνε με δύναμη όσο 75 φορές το βάρος του. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να πάθει μία ήπια διάσειση και ένα διάστρεμμα στον αστράγαλο, αλλά οι τραυματισμοί αυτοί είναι ελάχιστοι σε σχέση με την συγκλονιστική φύση της πρόσκρουσης.



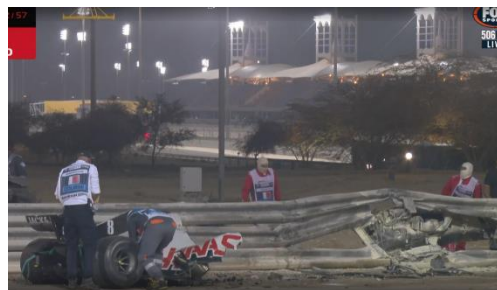
Το 2009 ο Φελίπε Μάσα είχε αναπτύξει ταχύτητα 200 χιλιομέτρων την ώρα όταν ένα ελατήριο του μπροστινού οχήματος ξεκόλλησε και έπεσε με ορμή πάνω στο κεφάλι του. Ο βραζιλιάνος άσος της Φόρμουλα 1 έχασε τον έλεγχο και προσέκρουσε με δύναμη πάνω στις προστατευτικές μπαριέρες. Υποταγμένο στους νόμους της φυσικής, το κράνος δεν κατάφερε

να προστατεύσει το κεφάλι του βραζιλιάνου οδηγού. Το ελατήριο διαπέρασε το προστατευτικό των ματιών του και τον χτύπησε με δύναμη στο μέτωπο. Ο Φελίπε Μάσα έχασε τις αισθήσεις του και η Φερράρι του καρφώθηκε πάνω στο διάζωμα. Διαπιστώθηκε από την ιατρική ομάδα ότι είχε υποστεί κάταγμα στο κρανίο, εγκεφαλική βλάβη και βαριά διάσειση. Ωστόσο, η κατάστασή του ήταν σταθερή και η ζωή του δεν διέτρεχε κίνδυνο. Υποβλήθηκε σε επέμβαση πάνω από το αριστερό του μάτι και κατά την διάρκεια της επόμενης εβδομάδας η υγεία του βελτιωνόταν με γρήγορους ρυθμούς.

Ο Ρομέν Γκροζάν σώθηκε χάρη στην τεχνολογία στο επεισοδιακό γκραν πρι του Μπαχρέιν. Μόλις στον πρώτο γύρο ο Γάλλος πιλότος προσπάθησε με τη Haas του -και ενώ έτρεχε με ταχύτητα 240 χλμ./ώρα- να αποφύγει με ελιγμούς προπορευόμενα οχήματα που έκοβαν ταχύτητα, όταν προσέκρουσε στην Alpha Tauri του Ντανιέλ Κβιάτ και έπεσε πάνω στις μεταλλικές μπάρες. Η Haas του Γκροζάν ακινητοποιήθηκε με την απότομη επιβράδυνση των 53G και αυτή ήταν η στιγμή που η ζωή του σώθηκε, χάρη στον κλωβό ασφαλείας από τιτάνιο, εντός του οποίου κάθονται οι οδηγοί της Formula 1. Τέτοιοι καταστροφικοί τραυματισμοί στους αγώνες της Formula 1 στα μέσα του περασμένου αιώνα είχαν ως αποτέλεσμα πολλούς θανάτους λόγω αιμορραγίας. Αλλά με τον κλωβό ασφαλείας απέφυγε κάθε τραυματισμό στα πόδια του, επιτρέποντάς του να βγει μόνος του από τη Haas. Την ώρα που οι μεταλλικές μπάρες τυλίγονταν γύρω από τον κλωβό ασφαλείας, ο μηχανισμός υποστήριξης κεφαλής και αυχένα (HANS: Head and Neck Support)



χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, η κατασκευή προστασίας της κεφαλής του οδηγού, γνωστή και ως halo λειτουργήσε όπως είχε σχεδιαστεί και εξέτρεψε το κομμάτι αυτό πάνω από το κράνος του Γκροζάν όταν προσέκρουσε στις μεταλλικές μπαριέρες. Καθώς το μπροστινό μισό του αυτοκινήτου του Γκροζάν



χτύπησε στη μεταλλική μπάρα και επιβραδυνόταν, το πίσω τμήμα του οχήματος προσπαθούσε ακόμη να κινηθεί με ταχύτητα άνω των 160 χλμ./ώρα, με αποτέλεσμα να κοπεί στα δύο η Haas στο σημείο όπου βρίσκεται το ρεζερβουάρ και γι' αυτό ξέσπασε φωτιά. Ο Γκροζάν, ως εκ τούτου, πρόλαβε μέσα σε 23 δευτερόλεπτα μετά την πρόσκρουση να λύσει τη ζώνη του και να βγει από την φωτιά χωρίς να έχει σπάσει τα πόδια του, ούτε τον αυχένα του και να διατηρήσει τις αισθήσεις του. Μεταφέρθηκε άμεσα στο νοσοκομείο όπου νοσηλεύτηκε για τα εγκαύματα στα χέρια και στο αριστερό του πόδι.

Τις τελευταίες δεκαετίες βελτιώθηκαν τα cockpit δηλαδή ο θάλαμος του οδηγού. Τα πλαϊνά ψήλωσαν και έγιναν πιο ανθεκτικά, με τη προσθήκη του προσκέφαλου, ενώ έγινε υποχρεωτική η αφαίρεση του τιμονιού ώστε να γίνεται εύκολα η έξοδος του οδηγού σε περίπτωση ανάγκης. Υποχρεωτικός είναι και ο πυροσβεστήρας που ενεργοποιείται με αισθητήρα και το μηχανήμα εγγραφής των πληροφοριών για τα αίτια και τη σοβαρότητα των ατυχημάτων. Επιπλέον, στο cockpit υπάρχουν φώτα που ενημερώνουν τους οδηγούς για το τι σημαία υπάρχει στη πίστα και σε ποια σημεία, ενώ το πλάτος των μονοθεσίων μεγάλωσε και έγινε 2 μέτρα. Κυρίως τραυματισμοί στον αυχένα και το κεφάλι ήταν αυτοί που συνέβαιναν κατά την διάρκεια των αγώνων της F1. Γι' αυτό υποχρεωτικές αλλαγές υπήρξαν και στον εξοπλισμό των οδηγών. Το κράνος, που ζυγίζει περίπου 1,25 κιλά, περνά από έλεγχο της FIA (Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου γαλλικά: *Fédération Internationale de l'Automobile*,). Αρκετά ανθεκτική είναι και η προσωπίδα του κράνους. Στο πίσω του μέρος υπάρχει το σύστημα HANS(Head and Neck Support) που βοηθά στη προστασία του κεφαλιού και του αυχένα. Το σύστημα αυτό, συνδέεται με το κράνος και το μονοθέσιο, ώστε να αποτρέψει τον οδηγό από το να χτυπήσει το κεφάλι του στο τιμόνι. Οι μάντες από κέβλαρ του μηχανισμού αυτού αγκιστρώνουν το κράνος του οδηγού στο προσκέφαλο, αποτρέποντας έναν αυχενικό τραυματισμό, που θα μπορούσε να αποβεί μοιραίος καθώς η υπερέκταση του σβέρκου στις ταχείες επιβραδύνσεις μπορούν να οδηγήσουν σε κάταγμα του κρανίου και του αυχένα. Μετά το ατύχημα του Φελίπε Μάσα τα κράνη των οδηγών αναβαθμίστηκαν. Σήμερα, πέρα από την προστασία της κεφαλής του οδηγού από δυνάμεις έως 275G, το κράνος σχεδιάστηκε για να αντέχει σύγκρουση με μεταλλικό αντικείμενο βάρους 225 gr με ταχύτητα 250 km/h, αλλά και πτώση αντικειμένου βάρους 10 κιλών από ύψος 5,1 μέτρων. Διαθέτει επίσης μηχανισμό οποίος αποτρέπει τη θόλωση του κράνους και ουσιαστικά λειτουργεί όπως στα τζάμια του αυτοκινήτου. Τέλος προσαρμόζεται αυτόματα στις διαφοροποιήσεις της ορατότητας κατά τη διάρκεια των αγώνων.



αυτό υποχρεωτικές αλλαγές υπήρξαν και στον εξοπλισμό των οδηγών. Το κράνος, που ζυγίζει περίπου 1,25 κιλά, περνά από έλεγχο της FIA (Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου γαλλικά: *Fédération Internationale de l'Automobile*,). Αρκετά ανθεκτική είναι και η προσωπίδα του κράνους. Στο πίσω του μέρος υπάρχει το σύστημα HANS(Head and Neck Support) που βοηθά στη προστασία του κεφαλιού και του αυχένα. Το σύστημα αυτό, συνδέεται με το κράνος και το μονοθέσιο, ώστε να αποτρέψει τον οδηγό από το να χτυπήσει το κεφάλι του στο τιμόνι. Οι μάντες από κέβλαρ του μηχανισμού αυτού αγκιστρώνουν το κράνος του οδηγού στο προσκέφαλο, αποτρέποντας έναν αυχενικό τραυματισμό, που θα μπορούσε να αποβεί μοιραίος καθώς η υπερέκταση του σβέρκου στις ταχείες επιβραδύνσεις μπορούν να οδηγήσουν σε κάταγμα του κρανίου και του αυχένα. Μετά το ατύχημα του Φελίπε Μάσα τα κράνη των οδηγών αναβαθμίστηκαν. Σήμερα, πέρα από την προστασία της κεφαλής του οδηγού από δυνάμεις έως 275G, το κράνος σχεδιάστηκε για να αντέχει σύγκρουση με μεταλλικό αντικείμενο βάρους 225 gr με ταχύτητα 250 km/h, αλλά και πτώση αντικειμένου βάρους 10 κιλών από ύψος 5,1 μέτρων. Διαθέτει επίσης μηχανισμό οποίος αποτρέπει τη θόλωση του κράνους και ουσιαστικά λειτουργεί όπως στα τζάμια του αυτοκινήτου. Τέλος προσαρμόζεται αυτόματα στις διαφοροποιήσεις της ορατότητας κατά τη διάρκεια των αγώνων.



Το 2018 εισήχθη για πρώτη φορά από τη FIA και κατέστη υποχρεωτική για όλα τα μονοθέσια η κατασκευή προστασίας της κεφαλής του οδηγού, γνωστή και ως halo, μία κατασκευή με τρεις μπάρες, μία εμπρός και δύο στο πλάι, που περιβάλλουν το cockpit. Στόχος του είναι να προστατεύει τους πιλότους από αντικείμενα που εκτοξεύονται από προπορευόμενα αυτοκίνητα. Φτιαγμένο εξ ολοκλήρου από τιτάνιο, το halo αντέχει φορτίο έως 12000 κιλά. Αρχικά η εφαρμογή του halo είχε αρκετές αντιδράσεις από τους πιλότους και τις ομάδες ωστόσο η αποτελεσματικότητά του αποδείχθηκε ξεκάθαρα στο ατύχημα του Γκροζάν.



με τρεις μπάρες, μία εμπρός και δύο στο πλάι, που περιβάλλουν το cockpit. Στόχος του είναι να προστατεύει τους πιλότους από αντικείμενα που εκτοξεύονται από προπορευόμενα αυτοκίνητα. Φτιαγμένο εξ ολοκλήρου από τιτάνιο, το halo αντέχει φορτίο έως 12000 κιλά. Αρχικά η εφαρμογή του halo είχε αρκετές αντιδράσεις από τους πιλότους και τις ομάδες ωστόσο η αποτελεσματικότητά του αποδείχθηκε ξεκάθαρα στο ατύχημα του Γκροζάν.



είχε αρκετές αντιδράσεις από τους πιλότους και τις ομάδες ωστόσο η αποτελεσματικότητά του αποδείχθηκε ξεκάθαρα στο ατύχημα του Γκροζάν.

Τα ρούχα των οδηγών αντέχουν σε θερμοκρασίες ως 800°C, κυρίως για να προστατεύονται οι οδηγοί σε περίπτωση φωτιάς. Η ειδική αντιπυρική στολή αποτελείται από υλικό Nomex.

Πρόκειται για το ειδικό πυρίμαχο υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι στολές αυτές και μπορούν να αντέξουν σε υψηλές θερμοκρασίες για περίπου 30 δευτερόλεπτα προτού αρχίσουν να καίγονται, ενώ σε αυτό το διάστημα να διατηρεί στην εσωτερική του επένδυση την θερμοκρασία κάτω από τους 41 βαθμούς. Από το ίδιο υλικό είναι φτιαγμένα από τα γάντια έως την εσωτερική κουκούλα (την γνωστή μπαλακλάβα), ενώ λαμβάνεται υπόψη και η σωστή σύνθεση για καλό εξαερισμό και απορροφητικότητα ιδρώτα. Από το Nomex υλικό σε πιο λεπτές στρώσεις και επενδύσεις αποτελούνται ακόμη και τα εσώρουχα τα οποία βάσει προδιαγραφών είναι για 15 χρήσεις. Τα γάντια έχουν συνδυασμό Nomex και δέρματος και είναι τόσο λεπτά όσο χρειάζεται για να έχει την βέλτιστη αίσθηση ο οδηγός. Και τα παπούτσια είναι από δέρμα και έχουν πολύ λεπτήσόλα ώστε ο οδηγός να έχει την βέλτιστη αίσθηση των πεντάλ.



Όσο αναφορά τις πίστες έχουν γίνει πολύ πιο ασφαλείς. Έχουν δημιουργηθεί έξοδοι διαφυγής καθώς βρίσκουμε και αλλαγές στις μπαριέρες όπου έχουν τοποθετηθεί προστατευτικά λάστιχα. Σε κάθε πίστα υπάρχει ιατρικό κέντρο, όπου οι τραυματίες οδηγοί κάνουν ελέγχους και δέχονται τις πρώτες βοήθειες, αφού αποχωρήσουν από την πίστα. Δύο ελικόπτερα, τέσσερα ασθενοφόρα και 5 πυροσβεστικά οχήματα είναι έτοιμα σε περίπτωση που χρειαστούν να επέμβουν. Τέλος, σε κάθε 300 μέτρα υπάρχουν εθελοντές με πυροσβεστήρες που βοηθούν σε περιπτώσεις φωτιάς και μαζεύουν κομμάτια μονοθεσιών μετά από ατυχήματα. Οι μηχανικοί υποχρεούνται να φοράνε αντιπυρικές φόρμες και κράνη ενώ οι θεατές προστατεύονται από πλέγματα, που υπάρχουν γύρω από τη πίστα.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Συμπερασματικά, ο μηχανοκίνητος αθλητισμός αποτελεί ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής των φυσικών νόμων καθώς χωρίς αυτούς δεν θα υπήρχε καμία εξέλιξη στο συγκεκριμένο спор. Είδαμε, επίσης πως οι προσπάθειες για την απόκτηση της μέγιστης ταχύτητας εγκυμονεί κινδύνους για τους πιλότους. Για το λόγο αυτό ο τομέας της ασφάλειας στα μονοθέσια της Φόρμουλα 1 συνεχώς βελτιώνεται. Τέλος, η πρόοδος της τεχνολογίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το μέλλον της F1 και αναμένουμε μεγάλες αλλαγές στα μονοθέσια τα επόμενα χρόνια που αφορούν τόσο το αεροδυναμικό όσο και το μηχανικό μέρος τους. Το ερώτημα είναι αν η προσπάθεια για την ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων στους αγώνες θα παρέχουν την ίδια ασφάλεια ή θα επαναληφθούν τα δυστυχήματα του παρελθόντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Serway, Raymond A.; Jewett, John W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers*
2. Brian Beckman, The Physics of Racing Series ,Stuttgart West, 1998

ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ

http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Brian_Cook/physics.html

<https://autogrip.gr/me-apla-logia-3-aerodinamikes-antistasis/>

[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Lift_\(force\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Lift_(force))

<http://www.formula1-dictionary.net/grip.html>

<https://autogrip.gr/%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CF%81%CF%84%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CF%83%CF%8D%CE%B3%CF%87%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B7%CF%82-f1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-fric-2%CE%BF-%CE%BC%CE%AD%CF%81/>

<https://autogrip.gr/me-apla-logia-2-i-dinami-g/>

<https://f1fan.gr/?p=51347>

http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2728/Fysiki-G-Lykeiou-ThSp_html-apli/index3_5.html

<https://www.f1technical.net/articles/10?sid=057c4f66a9f0522b2dd034472e1ace20>

<https://autogrip.gr/me-apla-logia-1-ground-effect/>

<http://www.mixanitouxronou.gr/to-sygklonistiko-atychima-toy-felipe-masa-paraligo-na-toy-stoichisei-ti-zoi-o-pilotos-tis-formoyla-1-epestrepse-stis-pistes-molis-dyo-mines-meta-vinteo/>

<https://f1racingnews.gr/ta-deka-xeirotera-atyximata-stin-f1/>

<https://www.mixanitouxronou.gr/to-sygklonistiko-atychima-toy-felipe-masa-paraligo-na-toy-stoichisei-ti-zoi-o-pilotos-tis-formoyla-1-epestrepse-stis-pistes-molis-dyo-mines-meta-vinteo/>

<https://www.sport24.gr/motorsports/to-frikiastiko-atychima-toy-kubica-ston-kanada.8409087.html>

<https://www.iefimerida.gr/aytokinito/formula-1-tehnologia-esose-4-fores-zoi-gkrozan-28>

<https://autogrip.gr/%CE%B7-%CE%B1%CF%83%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-f1/>

http://www.formula1-dictionary.net/drs_wing_rear_movable.html

Επεξηγηματικά βίντεο που βοήθησαν στην κατανόηση των εννοιών που αναλύθηκαν :

<https://www.youtube.com/watch?v=oHL5kl3Cw78&feature=youtu.be>

<https://youtu.be/JOWY0ayQoLA>

<https://www.youtube.com/watch?v=qwu5Vz6zjnM&feature=youtu.be>

<https://www.youtube.com/watch?v=c6b4yZ97XY4>

<https://www.youtube.com/watch?v=twAlqtvVMdc&feature=youtu.be>

https://www.youtube.com/watch?v=dYurKzP_KNI&feature=youtu.be

<https://www.youtube.com/watch?v=EwmDdMzzDjY>

Εικόνες αντλήθηκαν επίσης από το επίσημο site της Φόρμουλα 1 <https://www.formula1.com/>
και το Google