ePublishing

ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ
NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Open Schools Journal for Open Science

Vol 2, No 1 (2019)

Special Issue Articles from the 1st Greek Student Conference on Research and Science

Αεροδυναμική και φαινόμενο Επίδρασης του Εδάφους (Ground Effect) κατά τον σχεδιασμό ενός γρήγορου οχήματος

Αρσένιος-Κλέων Χρίσκος, Μάριος Σπορίδης, Θανάσης Χατζηδημητρίου, Αχιλλέας Πιτσιάβας, Ισίδωρος-Αλέξανδρος Φελεσάκης, Κωνσταντινος Τζώτζης, Κλαίρη Αχιλλέως, Σταύρος Παπαδόπουλος

doi: 10.12681/osj.19364

To cite this article:

Χρίσκος Α.-Κ., Σπορίδης Μ., Χατζηδημητρίου Θ., Πιτσιάβας Α., Φελεσάκης Ι.-Α., Τζώτζης Κ., Αχιλλέως Κ., & Παπαδόπουλος Σ. (2019). Αεροδυναμική και φαινόμενο Επίδρασης του Εδάφους (Ground Effect) κατά τον σχεδιασμό ενός γρήγορου οχήματος. *Open Schools Journal for Open Science*, *2*(1), 144–157. https://doi.org/10.12681/osj.19364

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 24/01/2026 05:01:47

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 24/01/2026 05:01:47

Open Schools Journal
for Open Science

Volume 1

Αεροδυναμική και φαινόμενο Επίδρασης του Εδάφους (Ground Effect) κατά τον σχεδιασμό ενός γρήγορου οχήματος

Αρσένιος-Κλέων Χρίσκος[1], Μάριος Σπορίδης[1], Θανάσης Χατζηδημητρίου[1], Αχιλλέας Πιτσιάβας[1], Ισίδωρος-Αλέξανδρος Φελεσάκης[1], Κων/νος Τζώτζης[1], Κλαίρη Αχιλλέως[1] , Σταύρος Παπαδόπουλο[1]

[1]1ο Πειραματικό Λύκειο Θεσσαλονίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»"

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι η συνεισφορά της Αεροδυναμικής και του φαινομένου Επίδρασης του Εδάφους στον σχεδιασμό γρήγορων οχημάτων. Η αεροδυναμική έχει ως αντικείμενο έρευνας και μελέτης τους νόμους που διέπουν τη ροή του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από σώματα διαφορετικής μορφής. Η ιδέα μίας έρευνας σε αυτόν τον τομέα, προέκυψε όταν αναρωτηθήκαμε, ποιες θα ήταν οι διαφορές στις επιδόσεις οχημάτων με ίδια χαρακτηριστικά (π.χ. ίδια ιπποδύναμη) αλλά με διαφορετικό αεροδυναμικό προφίλ. Αφού μελετήσαμε τις κατάλληλες φυσικές αρχές και κάποια μοντέλα εφαρμογής, καταλήξαμε σε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση που έχει η μορφή των οχημάτων στον τρόπο με τον οποίο «συμπεριφέρονται». Όπως αναμέναμε, υπήρξε διαφορά στην ταχύτητα των σωμάτων, στην επιτάχυνσή τους αλλά και στην κατανάλωση των καυσίμων. Εργαστήκαμε σε περιβάλλον εικονικού εργαστήριου, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης των συνθηκών που επικρατούν κατά την διάρκεια της κίνησης ενός οχήματος και εξετάσαμε την επίδραση του αέρα.

Λέξεις κλειδιά

Θεώρημα Bernoulli; Αεροδυναμική; βελτίωση επιδόσεων; εξοικονόμηση ενέργειας; Ground effect

Αεροδυναμική και κοινούμενα οχήματα

Η Αεροδυναμική είναι ιδιαίτερος κλάδος της Μηχανικής των ρευστών, και ειδικότερα της Δυναμικής. Ο επιστημονικός αυτός κλάδος έχει ως αντικείμενο έρευνας και μελέτης τους νόμους που διέπουν τη ροή του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από διάφορα σώματα που έχουν ειδική μορφή με περιορισμένη τη μία από τις τρεις διαστάσεις τους κατά κατεύθυνση κίνησης, καθώς και τη κίνηση αυτών μέσα στον αέρα. Η Αεροδυναμική αρχικά ήταν πειραματική επιστήμη και βασιζόταν ιδιαίτερα στις αεροδυναμικές σήραγγες. Μετά όμως την αλματώδη ανάπτυξη των επιδόσεων των ηλεκτρονικών υπολογιστών αναπτύχθηκε έντονα και η λεγόμενη υπολογιστική αεροδυναμική. Πείραμα και θεωρία συμβάλουν από κοινού πλέον στη πλήρη μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, έτσι ώστε η "υπολογιστική" να συμπληρώνει με αποτελεσματικότητα την "πειραματική αεροδυναμική".

Οι επιμέρους ροές, που εν γένει συναντάμε, σε ένα κινούμενο όχημα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Πεδίο ροής του αέρα γύρω από το όχημα.

2. Πεδίο ροής του αέρα μέσω του οχήματος.

3. Πεδίο ροής στα επιμέρους μηχανικά μέρη του οχήματος.

Τα πρώτα δύο πεδία συσχετίζονται στενά. Η ροή του αέρα μέσω του τμήματος που περιέχει τον κινητήρα εξαρτάται από το πεδίο ροής γύρω από το όχημα. Και τα δύο αυτά πεδία ροής πρέπει να εξεταστούν από κοινού. Όμως το πεδίο ροής στα επιμέρους μηχανικά μέρη του οχήματος και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης δεν συνδέεται άμεσα με τα δύο πρώτα πεδία ροής. Επομένως δεν συγκαταλέγεται στην αεροδυναμική και δεν εξετάζεται εδώ. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι ή έρευνα των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα κινούμενο όχημα, έτσι ώστε, ο σχεδιασμός του οχήματος να γίνεται με τον βέλτιστο τρόπο και αυτό να συμπεριφέρεται ανάλογα με τις επιδιώξεις του κατασκευαστή [Δεληπορανίδης Γ., 2010, Joseph Katz, 1995].

Formula 1

Στην εργασία μας θα ασχοληθούμε ειδικότερα με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των μονοθέσιων της formula 1, καθώς στην κατηγορία αυτή, αναπτύσσονται τεχνολογίες οι οποίες στο μέλλον θα εφαρμοστούν και στα οχήματα παραγωγής. Ακόμη είναι πιο εύκολο να αναλύσουμε, από αεροδυναμική άποψη, ένα μονοθέσιο της formula 1 παρά ένα καθημερινό Ι.Χ., διότι τα χαρακτηριστικά του αμαξώματος της formula 1 είναι πολύ πιο έντονα.

Η αντίσταση του αέρα

Σε ένα όχημα που κινείται με χαμηλή ταχύτητα, ο αέρας που το περιβάλλει έχει επίσης μικρή σχετική ταχύτητα ως προς αυτό. Έτσι στο όχημα δεν ασκείται καμία σημαντική δύναμη. Όταν όμως το όχημα επιταχύνεται, η σχετική ταχύτητα του αέρα αυξάνεται οπότε κατά τη «σύγκρουση» των μορίων του αέρα με το όχημα, η ορμή που έχουν τα μόρια μειώνεται δραστικά. Λόγω λοιπόν αυτής της μεταβολής της ορμής, και σύμφωνα με τον γενικευμένο νόμο του Νεύτωνα (ΣF= dp/dt), ασκείται στο κινούμενο σώμα μια σημαντική δύναμη αντίστασης. Η δύναμη αυτή διαιρούμενη με τη μετωπική επιφάνεια του οχήματος, ισοδυναμεί με μια πίεση στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Εκεί λοιπόν έχουμε μεγαλύτερη πίεση σε σχέση με την οπίσθια πλευρά του στην οποία επικρατεί πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (ίσως και χαμηλότερη). Η διαφορά αυτή των πιέσεων είναι η λεγόμενη «αντίσταση του αέρα» [Wikipedia, Formula 1 Dictionary, Joseph Katz 1995].

Βασικές έννοιες

Αντίσταση ή οπισθέλκουσα (Drag), ονομάζεται η δύναμη η οποία έχει τον ίδιο φορέα με αυτόν της ταχύτητας, αλλά αντίθετη φορά και εμφανίζεται κατά την κίνηση αντικειμένων μέσα στον αέρα. Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, η εμφάνιση αυτής της δύναμης οφείλεται στη διαφορετική πίεση η οποία επικρατεί στις δύο πλευρές ενός κινούμενου σώματος.

Η αεροδυναμική αντίσταση D, αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας u του οχήματος. Σε ένα μέσου μεγέθους αυτοκίνητο, η αεροδυναμική του αντίσταση αποτελεί το περίπου 75-80% της συνολικής αντίστασης της κίνησης στα 100 km/h. Η μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης συμβάλλει σημαντικά στην οικονομία καυσίμων ενός αυτοκινήτου. Γι’ αυτόν τον λόγο η αεροδυναμική αντίσταση παραμένει το σημείο εστίασης της αεροδυναμικής οχημάτων. Για πολύ καιρό, η μέγιστη ταχύτητα ήταν το κίνητρο για τη μείωση της αντίστασης, ενώ σήμερα είναι η οικονομία καυσίμων και οι εκπομπές ρύπων.

Η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης του αέρα είναι η ακόλουθη:

$D=1/2 *Cd*\rho*A*u2$

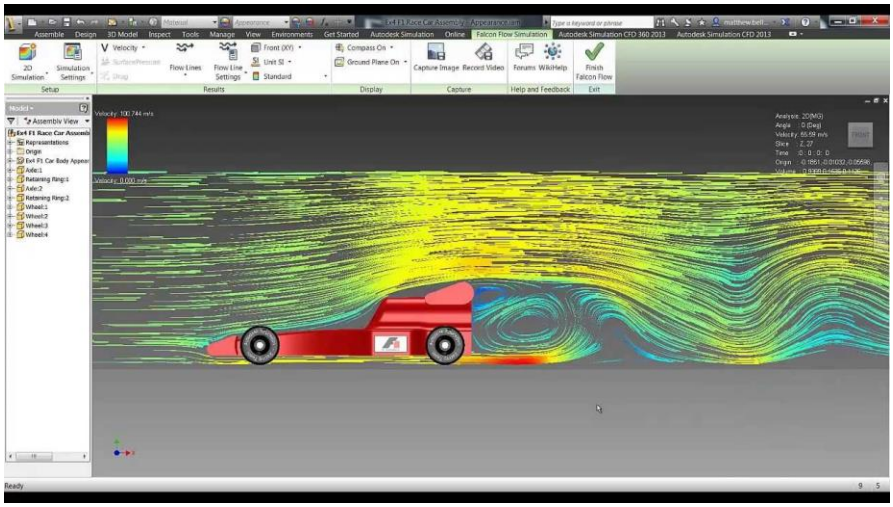
όπου :

- Cd: ο συντελεστής αντίστασης σώματος (εξαρτάται κατά βάση από τη γεωμετρία)
- ρ: η πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα
- A: η μέγιστη μετωπική επιφάνεια του κινούμενου σώματος
- u: η σχετική ταχύτητα σώματος-ρευστού

Επομένως η αντίσταση που δέχεται ένα κινούμενο όχημα καθορίζεται από το μέγεθός του, το οποίο προσδιορίζει και τη μετωπική επιφάνεια A (Εικόνα 1) και από τη μορφή του, η αεροδυναμική ποιότητα της οποίας, χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή Cd (πολλοί τον αναφέρουν σαν συντελεστή οπισθέλκουσας).

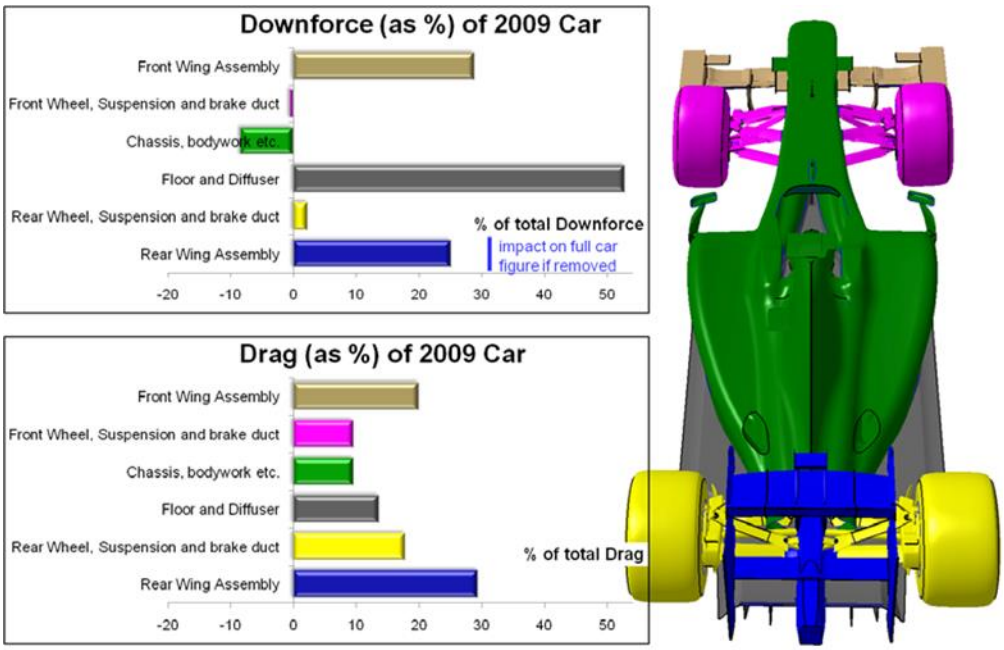
Γενικά το μέγεθος ενός οχήματος, και ως εκ τούτου η μετωπική επιφάνειά του, καθορίζονται από τις σχεδιαστικές απαιτήσεις, συνεπώς οι προσπάθειες για την μείωση της αντίστασης επικεντρώνονται στη μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας με την κατάλληλη διαμόρφωση του σχήματός του.

Η ανάπτυξη του διαστήματος μεταξύ των αεροδυναμικών γραμμών στην Εικόνα 2 παρέχει μια ένδειξη της καθαρής δύναμης που ενεργεί στην κάθετη στην μετωπική επιφάνεια κατεύθυνση. Κλειστά διαστήματα μεταξύ των αεροδυναμικών γραμμών σημαίνει υψηλή ταχύτητα και συνεπώς χαμηλή στατική πίεση. Η διαφορά πίεσης μεταξύ των ανώτερων και χαμηλότερων επιφανειών ενός οχήματος παράγει μια δύναμη στη σωστή γωνία της κατεύθυνσης της κίνησης, η οποία καλείται άντωση. Κατ' αρχάς, αυτή η άντωση είναι στην ανοδική κατεύθυνση, δηλαδή, τείνει να ανυψώσει το όχημα και επομένως μειώνει τα δραστικά φορτία επί των τροχών.



Σχήμα 2: Στιγμιότυπο από τις πειραματικές διαδικασίες που εκτελέσαμε στο πρόγραμμα Flow Design της Autodesk

Η αντίστροφη άντωση κάνει ακριβώς το αντίθετο , δηλαδή σπρώχνει το αυτοκίνητο προς τα κάτω. Αυτό συμβαίνει διότι ο αέρας στο κάτω μέρος το αυτοκινήτου κινείται ταχύτερα (χαμηλή πίεση) από αυτόν στο πάνω μέρος (υψηλή πίεση) [Δεληπορανίδης Γ., 2010, F1dictionary, f1technical].



Σχήμα 3: Αντίστροφη άντωση και αντίσταση του αέρα σε μονοθέσια του 2009. Στον πάνω αριστερά πίνακα βλέπουμε το ποσοστό της κάθετης δύναμης που ασκείται προς το αυτοκίνητο ενώ στον κάτω το ποσοστό της αντίστασης του αέρα σε διάφορα τμήματα του μονοθέσιου της Formula 1 του 2009.

Φαινόμενα εδάφους

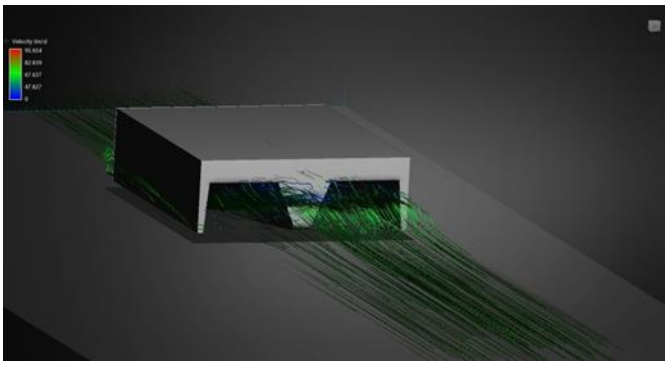
Το φαινόμενο εδάφους (Ground Effect) αναπτύχθηκε από την ομάδα της Lotus κατά την περίοδο του 1978 με την ομώνυμη Lotus 78. Το φαινόμενο βασίζεται στο θεώρημα Bernoulli, σύμφωνα με το οποίο, όσο αυξάνεται η πίεση του αέρα, η ταχύτητα μειώνεται. Βέβαια αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη σταθερής πυκνότητας του αέρα (δηλαδή ταχύτητες κάτω του ενός mach) γι' αυτό και έχει εφαρμογή στην formula 1.

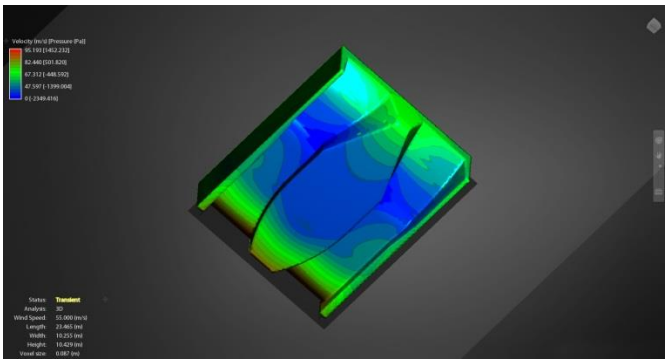
Έτσι λοιπόν μπορούσε να διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο το κάτω μέρος του μονοθέσιου, ώστε να αναγκάσει τον αέρα που περνούσε κάτω από αυτό να κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι στην πάνω πλευρά. Ο ταχύτερος αέρας κάτω από το όχημα είχε μικρότερη πίεση από τον επάνω, με αποτέλεσμα το μονοθέσιο να προσφύεται στον δρόμο. Έτσι η Lotus κέρδισε το πρωτάθλημα με εννέα νίκες σε δεκαπέντε αγώνες, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της νέας τεχνολογίας που εισήγαγε.

Στα μετέπειτα χρόνια η FIA (Federation Internationale de l'Automobile) αναγκάστηκε να δημιουργήσει κανόνες που περιόριζαν την εφαρμογή του φαινομένου εδάφους, για την διασφάλιση της ακεραιότητας των πιλότων, μιας και οι ομάδες είχαν αναπτύξει τόσο πολύ αυτήν την τεχνολογία ώστε οι επιδόσεις των μονοθέσιων θα ανάγκαζαν τους πιλότους να φοράνε στολή ανάλογη με αυτή των πιλότων μαχητικών για να αντέξουν τις υψηλές πιέσεις [F1dictionary, F1technical].

Πειραματική διαδικασία - Αποτελέσματα

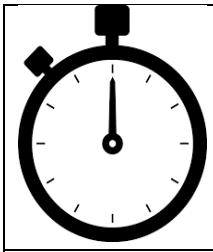
Αξιοποιώντας όλες τις παραπάνω πληροφορίες πειραματιστήκαμε με τους χρόνους που χρειάζεται το ίδιο αυτοκίνητο για να εκτελέσει έναν γύρο σε μία συγκεκριμένη πίστα αγώνων όπου την πρώτη φορά δεν θα έχει αεροτομές για να του προσφέρουν πιο αεροδυναμικό σχήμα και την δεύτερη θα έχει. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Flow Design της Autodesk υπολογίσαμε για το συγκεκριμένο τύπο αυτοκινήτου την κατάλληλη κλίση των φτερών και τα συγκρίναμε με αυτά της εταιρίας παραγωγής του αυτοκινήτου.





Σχήμα 4: Προσομοίωση κάτω μέρους του μοντέλου (Flow Design)

Με το λογισμικό προσομοίωσης Project Cars «οδηγήσαμε» διάφορα μοντέλα αυτοκινήτων σε ψηφιακές πίστες. Χρονομετρήσαμε, υπολογίσαμε τον Μέσο Όρο των χρόνων και βρήκαμε την διαφορά τους. Τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα, καθώς τα αυτοκίνητα με τις αεροτομές διήνυσαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες, την ίδια απόσταση σε λιγότερο χρόνο από αυτά χωρίς τις αεροτομές.

	Lotus type 49C (t σε s)	Lotus type 49 (t σε s)
	10:53	11:27
	10:96	11:20
	10:75	11:25
	10:44	11:30
	10:50	11:17
Μέσος Όρος (σε s)	**10:636**	**11:238**
Διαφορά Χρόνων (σε s)	**0:602**	

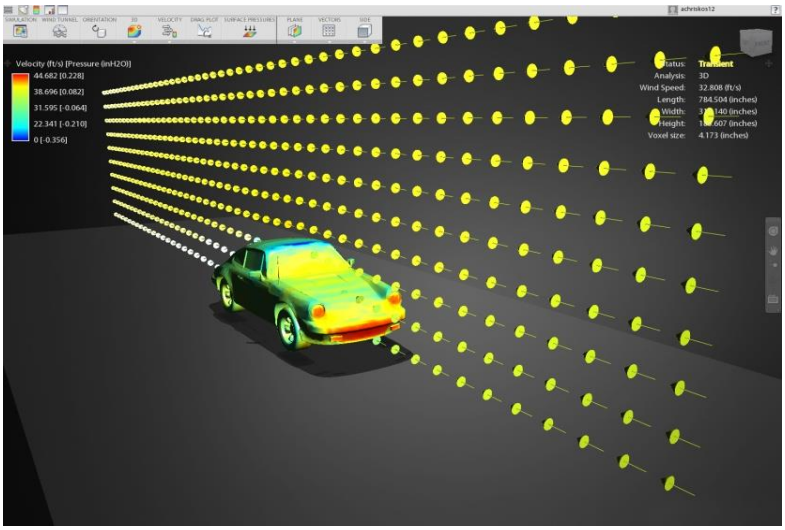
Πίνακας 1: Drag Racing: Μετρήσεις από το Drag Race μεταξύ δύο πανομοιότυπων αυτοκινήτων με μόνη διαφορά την παρουσία αεροτομών

Αυτοκίνητα	Πίστες	Χρόνοι
Lotus Type 49c (με αεροτομές)	Oulton Park	1:43
Lotus Type 49 (χωρίς αεροτομές)	Oulton Park	1:47
McLaren f1-GTR-LT (με αεροτομές)	Dubai Autodrome	1:18
McLaren f1 (χωρίς αεροτομές)	Dubai Autodrome	1:22
Mercedes Amg SLS GT3 (με αεροτομές)	Oulton Park	1:38
Mercedes Amg SLS (χωρίς αεροτομές)	Oulton Park	1:44

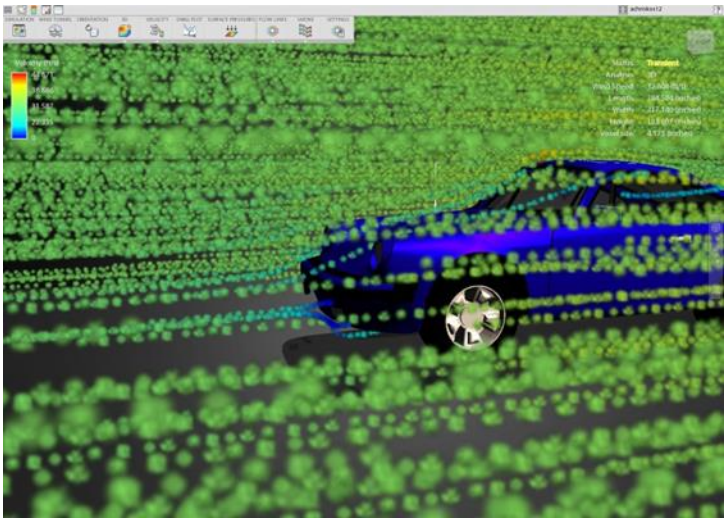
Πίνακας 2: Αποδόσεις σε πίστες: Χρόνοι που χρειάζονται τα αυτοκίνητα με αεροτομές ή χωρίς, ώστε να πραγματοποιήσουν έναν γύρο στην πίστα που αναφέρεται στη μέση του πίνακα

Σχήμα 5: Η Lotus type 49C στο πρόγραμμα «Project Cars»

Σχήμα 6: Η Lotus type 49 στο πρόγραμμα «Project Cars

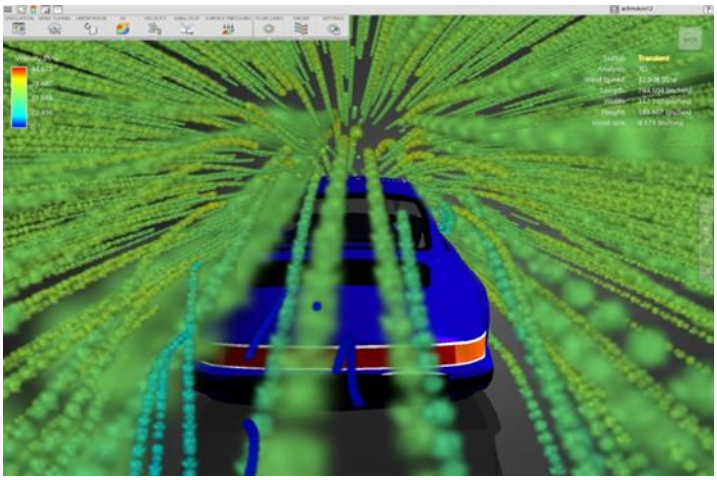


Σχήμα 7: Στιγμιότυπο από τις μετρήσεις για την πίεση του αέρα στο πρόγραμμα Flow Design. Τα βελάκια αναπαριστούν τον αέρα. Τα χρώματα πάνω στο αυτοκίνητο μας δείχνουν την πίεση που ασκεί ο αέρας στο όχημα. Όσο περισσότερο πλησιάζει το χρώμα στο κόκκινο τόσο μεγαλύτερη η πίεση.

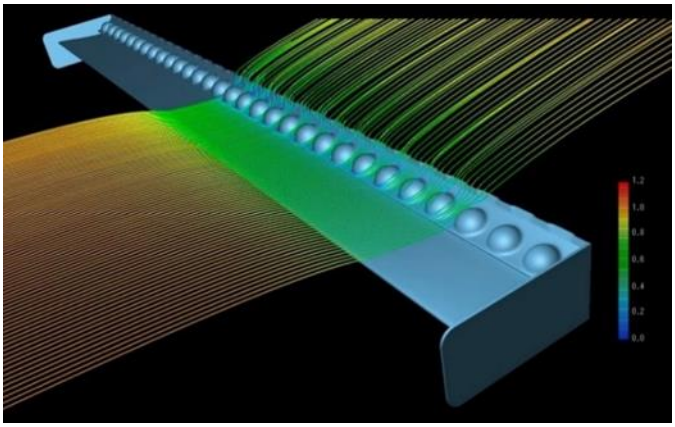


Σχήμα 8: Στιγμιότυπο από τις μετρήσεις για την αντίσταση του αέρα στο πρόγραμμα Flow Design. Οι πράσινες γραμμές αναπαριστούν τα μόρια του αέρα

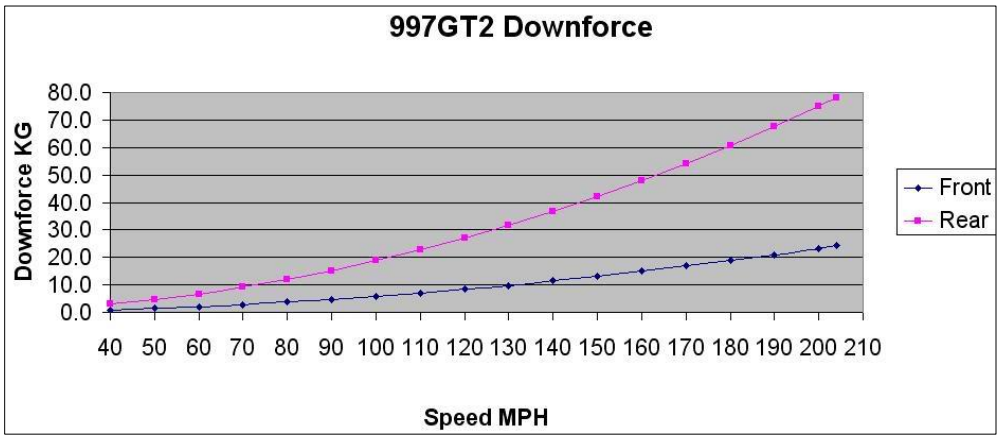
Σχήμα 9: Φωτογραφία κατά την διάρκεια των δοκιμών μας στις πίστες με την Mercedes SLS AMG



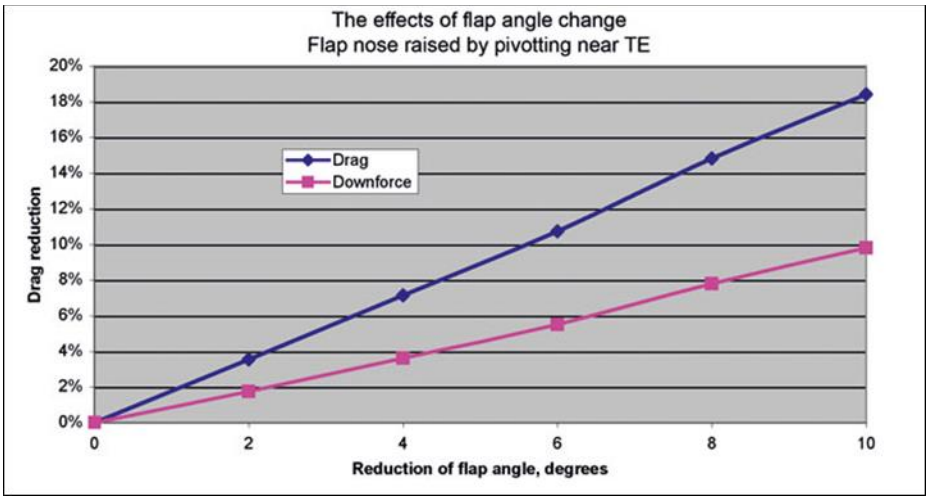
Σχήμα 10: Στιγμιότυπο από τις μετρήσεις για την επίδραση του αέρα στο πρόγραμμα Flow Design. Οι πράσινες γραμμές αναπαριστούν τα μόρια του αέρα.



Σχήμα 11 : Στιγμιότυπο από τις δοκιμές διαφόρων κλίσεων φτερών στο πρόγραμμα Flow Design



Διάγραμμα 1: Μετρήσεις που πήραμε από το πρόγραμμα Flow Design σχετικά με την πίεση που ασκείται στο όχημα από τον αέρα κάθετα σε αυτό επιβραδύνοντας την κίνησή του σε συνάρτηση με την ταχύτητα του σώματος σε μίλια ανά ώρα (1m/h=1.61 km/h



Διάγραμμα 2: Μετρήσεις που κάναμε στο λογισμικό Flow Design σχετικά με την αντίσταση του αέρα όταν κατά την διάρκεια την κίνησης αλλάζει η κλίση με την οποία ο αέρας «χτυπάει» στο όχημα

Συμπεράσματα

Μετά την ανάλυση των δοκιμών που πραγματοποιήσαμε, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα αυτοκίνητα με το κατάλληλο αεροδυναμικό προφίλ παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις. Ένα καλό αεροδυναμικό προφίλ, για αγωνιστική εφαρμογή, παρέχει στο όχημα καλύτερη αναλογία μεταξύ επιτάχυνσης, πρόσφυσης στον δρόμο και τελικής ταχύτητας, ενώ εξασφαλίζει ταυτόχρονα, μικρή κατανάλωση καυσίμων και μειωμένο ήχο-φασαρία από τον αέρα στο εσωτερικό της καμπίνας. Για όλους τους παραπάνω λόγους, οι αυτοκινητοβιομηχανίες επενδύουν τεράστια ποσά για έρευνα και ανάπτυξη της αεροδυναμικής των αυτοκινήτων τους.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

[1] Δεληπορανίδης Γ., (Οκτώβριος 2010). Εργαστήριο Αεροδυναμικής, Τμήμα Οχημάτων. «Στοιχεία Αεροδυναμικής Οχημάτων», Τεύχος 1ο, σελ. 5-9 .
[2] Ιωάννου Α., Ντάνος Γ., Πήττας Α., Ράπτης Σ., (2016). Φυσική Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών Γ' Λυκείου, Αθήνα: Εκδόσεις ΙΤΥΕ «Διόφαντος», σσ. 94-99.
Wikipedia.org. Άρθρο «Αντίσταση (Μηχανική Ρευστών) »
[3] Επίσημη ιστοσελίδα του οργανισμού Formula 1 «https://www.formula1.com»
Ιστοσελίδα άγνωστου μηχανικού με συνεχόμενα ενημερωμένα άρθρα βασισμένα σε ανακοινώσεις και έρευνες εταιριών σχετιζόμενες με την Formula 1 «http://www.f1technical.net»
[4] Formula 1 Dictionary, έρευνα άγνωστου συγγραφέα επιβεβαιωμένη από παγκόσμια αναγνωρισμένες εταιρίες παραγωγής αυτοκινήτων «http://www.formula1-dictionary.net»
[5] Joseph Katz, «Race Car Aerodynamics: Designing for Speed (Engineering and Performance)» ISBN-13: 978-0837601427, 2nd Edition, 1996, Bentley Publisher