

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής Εφαρμογών**

**Τρένο μαγνητικής αιώρησης ή Maglev**

**Magnetic levitation train**



**Πτυχιακή Εργασία:**

**Τζανάτος Πάρης(37460)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ**

**ΜΑΡΤΙΟΣ 2018**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την Πτυχιακή αυτή ολοκληρώνω ένα μεγάλο κεφάλαιο της ζωής μου αυτό των σπουδών μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου όλους του καθηγητές του ΤΕΙ Πειραιά που είχα την τιμή να διδαχθώ από αυτούς για την επιστήμη της Ηλεκτρολογίας και ιδιαίτερα τον Κ. Ηρακλή Βυλλιώτη για την αμέριστη βοήθεια του και υπομονή που επέδειξε κατά την συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας.

Η συγκεκριμένη εργασία είναι αφιερωμένη στην μητέρα μου Σοφία για όλους τους κόπους και της θυσίες που έκανε για να μεγαλώσει εμένα και τον αδερφό μου

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ – ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ .....	13
1.2. Αρχές της αεροδυναμικής .....	13
1.2. Ιστορική εξέλιξη.....	15
1.3. Οι νόμοι της αεροδυναμικής .....	20
1.3.1. Ο νόμος του Bernoulli .....	20
1.3.2. Το φαινόμενο του Venturi.....	24
1.3.3. Ο αριθμός Reynolds .....	26
1.4. Τα αεροδυναμικά βοηθήματα.....	28
1.5. Αεροδυναμική σήραγγα .....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ – Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΙΩΡΗΣΗ.....	33
2.1. Η αιώρηση.....	33
2.2. Η σταθερότητα .....	34
2.2.1. Δυναμική σταθερότητα .....	35
2.2.2. Στατική σταθερότητα .....	36
2.3. Οι μέθοδοι αιώρησης.....	36
2.3.1. Η ψευδοαιώρηση.....	37
2.3.2. Επαγωγικά ρεύματα.....	37
2.3.3. Οι σερβομηχανισμοί.....	40
2.3.4. Σταθεροποιημένη διαμαγνητική αιώρηση.....	42
2.3.5. Διαμαγνητική αιώρηση.....	42
2.3.6. Περιστροφική σταθεροποίηση .....	45
2.3.7. Οι υπεραγωγοί.....	46

2.3.8. Ισχυρή εστίαση.....	47
2.4. Χρήσεις.....	47
2.4.1. Τήξη μέσω αιώρησης .....	47
2.4.2. Μεταφορές.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ – ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ SHINKANSEN ..	49
3.1. Το σιδηροδρομικό δίκτυο.....	49
3.2. Η ιστορία του σιδηροδρομικού δικτύου.....	50
3.3. Επέκταση του σιδηροδρομικού δικτύου.....	52
3.4. Ασφάλεια του δικτύου.....	54
3.5. Γραμμές και μελλοντικά δεδομένα .....	56
3.6. Τρένα υψηλής ταχύτητας έξω από την Ιαπωνία.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ – ΤΑ ΤΡΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ.....	59
4.1. Γενικά για τα τρένα Maglev .....	59
4.2. Περιγραφή της λειτουργίας .....	64
4.3. Προβλήματα της λειτουργίας.....	69
4.4. Σύγκριση συμβατικών τρένων και τρένων Maglev.....	71
4.5. Το ρεκόρ ταχύτητας από τρένο Maglev .....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ – Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΡΕΝΩΝ .....	76
5.1. Τα πρώτα οχήματα έλξης και η εξέλιξη των τρένων.....	76
5.2. Ηλεκτροκίνητα τρένα.....	81
5.3. Τα τρένα νεότερης τεχνολογίας.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ – Η ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΩΣ ΠΡΟΠΟΜΠΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ MAGLEV.....	96
6.1 Είδη ηλεκτροκίνητων συρμών.....	96
6.2. Τα στοιχεία της ηλεκτροκίνησης.....	97
6.2.1. Τροφοδοσία .....	97
6.2.2. Η τροφοδότηση μέσω τρίτης γραμμής .....	98

6.2.3. Η τροφοδότηση μέσω εναέριων γραμμών.....	103
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	111

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Οι τρεις βασικές δυνάμεις που ασκεί ο αέρας στα οχήματα	14
Εικόνα 2. Το κέντρο βάρους είναι το σημείο που ισορροπεί το βάρος του αυτοκινήτου	15
Εικόνα 3. Η πατέντα του τραίνου του Samuel Calthrop	16
Εικόνα 4. Το <i>La Jamais Contente</i>	17
Εικόνα 5. Ατμορουκέτα του Στάνλεϊ	17
Εικόνα 6. Το αεροδυναμικό επιβατικό όχημα της Alfa Romeo	18
Εικόνα 7. Το «όχημα σταγόνα» της Volkswagen	18
Εικόνα 8. Κεντρομήχανο όχημα	19
Εικόνα 9. Τα φουτουριστικά μονοθέσια της Φόρμουλα 1	20
Εικόνα 10. Ο Νόμος του Bernoulli	22
Εικόνα 11. Η δημιουργία κάθετης δύναμης στην αεροτομή του μονοθεσίου	23
Εικόνα 12. Σχεδίαση για το καλύτερο αεροδυναμικό σχήμα	24
Εικόνα 13. Το φαινόμενο του Venturi	25
Εικόνα 14. Βελτίωση της αεροδυναμικής ροής	28
Εικόνα 15. Ο προφυλακτήρας και το Spoiler είναι ένα, με αποτέλεσμα την μείωση της οπισθέλκουσας	29
Εικόνα 16. Κλίση ροής με πρόσθιο μέρος χωρίς και με σπόιλερ	29
Εικόνα 17. Πίσω ποδιά αυτοκινήτου	31
Εικόνα 18. Η χρησιμοποίηση αεροτομής, βελτιώνει την αεροδυναμικότητα του αμαξώματος	31
Εικόνα 19. Η βελτίωση του σχήματος του προφυλακτήρα	32
Εικόνα 20. Σχηματική παρουσίαση του κανόνα του Λεντς. (α) Αγωγός πριν να εισχωρήσει μαγνήτης (β) αγωγός μετά την εισχώρηση μαγνήτη	38
Εικόνα 21. Το Γερμανικό σύστημα Transrapid χρησιμοποιεί σερβομηχανισμούς, ώστε να προκαλέσει αιώρηση του τρένου και να διατηρήσει σταθερό κενό, την ώρα που το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα	41
Εικόνα 22. Αιώρηση βατράχου στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς, με την χρησιμοποίηση μαγνητικού πεδίου της τάξεως των 16 τέσλα	44
Εικόνα 23. Το παιχνίδι ανύψωσης της εταιρείας Levitron	45
Εικόνα 24. Νέες συσκευές που χρησιμοποιούν την μαγνητική τεχνολογία ανύψωσης και την περιστροφική σταθεροποίηση	46
Εικόνα 25. Τρένο τεχνολογίας Hyperloop	48
Εικόνα 26. Ένα από τα γνωστότερα και πιο γρήγορα τρένα του πλανήτη είναι το Γαλλικό TGV. Ακόμη και αυτό όμως, δεν μπόρεσε να συναγωνιστεί την ταχύτητα ενός τρένου μαγνητικής αιώρησης	49
Εικόνα 27. Οι γραμμές του Σινκανσέν φιλοξενούν συμβατικούς και μαγνητικής αιώρησης συρμούς. Στην εικόνα, ένα από τα τρένα "Υπερ - Εξπρές"	50
Εικόνα 28. Τρένο - σφαίρα των γραμμών Σινκανσέν στο Βρετανικό σιδηροδρομικό μουσείο της Νέας Υόρκης	52
Εικόνα 29. Το τρένο Maglev μοντέλου JR MLX - 01	54
Εικόνα 30. Τα νέα τρένα FASTECH 360, θα προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη ασφάλεια στους επιβάτες τους	55
Εικόνα 31. Χάρτης του δικτύου Σινκανσέν: Αναλόγως του χρώματος της γραμμής, έχουμε και διαφορετική εταιρεία εκμετάλλευσης	57
Εικόνα 32. Γραμμές ανά εταιρεία: Πάνω αριστερά - JR East, Πάνω δεξιά - JR Central, JR West, Κάτω - JR Kyushu	58
Εικόνα 33. Το Γερμανικό επίτευγμα τρένου μαγνητικής αιώρησης, με τεχνολογία Transrapid.	60
Εικόνα 34. Η τεχνολογία Transrapid χαρακτηρίζεται από την μικρή της απόσταση μεταξύ τρένου και σιδηροτροχιάς, με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο ύπαρξης ατυχήματος	61

Εικόνα 35. Το τρένο μαγνητικής αιώρησης του Μπέρμινχαμ _____	62
Εικόνα 36. Το Ελβετικό πρόγραμμα ανάπτυξης τρένων Maglev φαίνεται πως έχει εγκαταληφθεί, λόγω του υψηλού κόστους υλοποίησης _____	63
Εικόνα 37. Το σχέδιο του Αμερικάνικου τρένου SERAPHIM _____	64
Εικόνα 38. Τρόπος λειτουργίας των γραμμών και των μαγνητών του τρένου _____	65
Εικόνα 39. Τρόπος λειτουργίας τρένων ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης _____	66
Εικόνα 40. Τρόπος ανύψωσης των σπειρών μορφής 8 _____	67
Εικόνα 41. Κίνηση μαγνητικού πεδίου γραμμικού κινητήρα _____	68
Εικόνα 42. Δύναμη ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης _____	69
Εικόνα 43. Το επόμενο μεγάλο σχέδιο της Ιαπωνικής τεχνολογίας Maglev. Το τρένο μαγνητικής αιώρησης από ανθρακονήματα _____	70
Εικόνα 44. Ένα από τα τελευταίας τεχνολογίας τρένα Maglev που παρουσίασε η Ιαπωνία. Το συγκεκριμένο, είναι κάτοχος του ρεκόρ ταχύτητας τρένου, αφού έφτασε σε πειραματική διαδρομή τα 603 χλμ/ώρα _____	75
Εικόνα 45. Το σχέδιο του Stephenson _____	76
Εικόνα 46. Το σχέδιο του John Blenkinsop, που αφορούσε την ατμάμαξα που πήρε το όνομά του _____	78
Εικόνα 47. Η ατμάμαξα "Puffing Billy" _____	78
Εικόνα 48. Η ατμάμαξα "Rocket" _____	79
Εικόνα 49. Vintage αφίσα της δεκαετίας του 1920, που διαφήμιζε τα πρώτα τρένα Diesel ως τα θαύματα του μέλλοντος _____	80
Εικόνα 50. Ένα από τα πρώτα τρένα που χρησιμοποιούσαν κινητήρες Diesel και ηλεκτρογεννήτριες _____	81
Εικόνα 51. Ο Kando με την πρώτη του ηλεκτράμαξα _____	83
Εικόνα 52. Η ηλεκτράμαξα RoadClass EP-2 _____	86
Εικόνα 53. Η ηλεκτράμαξα Eurosprinter ES64 - U4 _____	87
Εικόνα 54. Ένα από τα πολλά LGV του σιδηροδρόμου της Γαλλίας. Σταδιακά αντικαταστάθηκαν από το μοντέλο TGV, που αποτελούσε την βελτιωμένη έκδοση του συγκεκριμένου τρένου _____	89
Εικόνα 55. Τρένα TGV στον σταθμό της Λυών _____	90
Εικόνα 56. Το βελτιωμένο τρένο AGV _____	91
Εικόνα 57. Το εξωτερικό το ICE 3 έχει βασιστεί στα επιβατικά αεροσκάφοι _____	91
Εικόνα 58. Το εσωτερικό του τρένου ICE 3 _____	92
Εικόνα 59. Το ETR 500, που έρχεται από την Ιταλία _____	93
Εικόνα 60. Το Ισπανικό Talgo 350, που κατασκευάστηκε για να καλύπτει ταχύτατα την διαδρομή Βαρκελώνη - Μαδρίτη _____	94
Εικόνα 61. Τρένα του δικτύου Σινκανσέν _____	95
Εικόνα 62. Σύστημα ηλεκτροκίνησης με την χρησιμοποίηση τρίτης γραμμής _____	99
Εικόνα 63. Χαρακτηριστική εικόνα από τον συρμό του Μετρό της Αθήνας. Κοκλωμένο διακρίνεται το «παπούτσι» - συλλέκτης ρεύματος _____	101
Εικόνα 64. Παπούτσι επαφής τρίτης ράγας _____	102
Εικόνα 65. Απλοποιημένο διάγραμμα υποσταθμού συνεχούς τάσης τροφοδοσίας συστήματος ηλεκτροκίνησης με τρίτη ράγα _____	102
Εικόνα 66. Αλυσοειδής ανάρτηση καλωδίων _____	105
Εικόνα 67. Εναέριο σύστημα ηλεκτροδότησης _____	106



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην συγκεκριμένη εργασία προσπάθησα να διατυπώσω και να καταγράψω όλα τα στοιχεία εκείνα που συνθέτουν ένα τρένο μαγνητικής αιώρησης, από τις πρώτες απόπειρες μαγνητικής αιώρησης μέχρι την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων κίνησης. Παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των τρένων καθώς και η θεωρία της μαγνητικής αιώρησης, πιο συγκεκριμένα:

**Στο πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια αναδρομή στην εξέλιξη της αεροδυναμικής, καθώς η αεροδυναμική θεωρείται ένας από τους βασικούς παράγοντες που ενισχύουν και βοηθούν στην ομαλή κίνηση ενός αντικειμένου

**Στο δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται ανάλυση της έννοιας της μαγνητικής αιώρησης, βλέπουμε παραδείγματα τα οποία έγιναν σε εργαστηριακό περιβάλλον καθώς και μια ανάλυση των τρόπων επίτευξης της μαγνητικής αιώρησης

**Στο τρίτο κεφάλαιο** αναλύουμε το δίκτυο σιδηροδρομικών γραμμών Shinkansen της Ιαπωνίας. Ένα από τα μεγαλύτερα δίκτυα παγκοσμίως εξοπλισμένο με οχήματα τελευταίας τεχνολογίας, καθώς και ένα από τα πιο καινοτόμα δίκτυα σιδηροδρόμων το οποίο ξεκίνησε μελέτη για να εισάγει γραμμή τρένου μαγνητικής αιώρησης.

**Στο τέταρτο κεφάλαιο** αναφερόμαστε στο τρένο μαγνητικής αιώρησης, την αρχή λειτουργίας του, την ιστορική εξέλιξη καθώς και την σύγκριση τους με τα συμβατικά τρένα.

**Στο πέμπτο κεφάλαιο** μιλάμε για την ιστορική εξέλιξη των τρένων, τα πρώτα οχήματα που δημιουργήθηκαν, μέχρι και τα σημερινά τρένα υψηλών ταχυτήτων που κυκλοφορούν στα σιδηροδρομικά δίκτυα της Ευρώπης- ειδικότερα στην Γαλλία, Ισπανία κλπ.- και της Ιαπωνίας

**Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο** αναλύουμε την ηλεκτροκίνηση, τον πιο διαδεδομένο τρόπο κίνησης των σταθερών μέσω σήμερα, τους τρόπους τροφοδοσίας των γραμμών καθώς και τους καλωδίωσης των γραμμών

Τέλος βρίσκουμε τα συμπεράσματα που διαπιστώσαμε κατά την μελέτη για την συγκεκριμένη εργασία σχετικά με την ηλεκτροκίνηση και την αναβάθμιση της σε κίνηση με μαγνητική αιώρηση ή αλλιώς σε κίνηση με τεχνολογία MagLev

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μαγνητική αιώρηση (Magnetic Suspension), μαγνητική ανύψωση (Magnetic Levitation) ή Maglev, αποτελεί μέθοδο που βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της αιώρησης ενός αντικειμένου χωρίς καμία άλλη μορφή υποστήριξης, πέραν των μαγνητικών πεδίων. Μέσω της μαγνητικής δύναμης, εξουδετερώνονται οι επιπτώσεις των επιταχύνσεων του φυσικού περιβάλλοντος, όπως είναι για παράδειγμα η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Βασικά στοιχεία της μαγνητικής αιώρησης είναι οι δυνάμεις της σταθερότητας και της ανύψωσης. Χάρη στην δύναμη της σταθερότητας εξασφαλίζεται πως το σύστημα δεν θα αναποδογυρίσει ή δεν θα ολισθήσει αυθόρμητα, σε κάποια φάση εξουδετέρωσης της αιώρησης. Η δύναμη της ανύψωσης προσφέρει ανοδική δύναμη, αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει την εξουδετέρωση της βαρύτητας.

Η μαγνητική αιώρηση χρησιμοποιείται για τα μαγνητικά έδρανα – Ρουλεμάν, για την ανέπαφη τήξη – Contactless Melting και για τα τρένα Maglev's, με τα οποία θα ασχοληθούμε εκτενώς στην παρούσα εργασία.

Το τρένο μαγνητικής αιώρησης ή αλλιώς τρένο Maglev, είναι ένα όχημα τελευταίας τεχνολογίας που μπορεί να κινείται και να μεταφέρει επιβάτες με ταχύτητες που φτάνουν τα 500 χιλιόμετρα την ώρα. Το βασικό του χαρακτηριστικό, που το κάνει να διαφέρει από τα υπόλοιπα τρένα μεταφοράς, είναι το γεγονός ότι μπορεί να υψώνεται λίγο πάνω από τις ράγες που κινείται, χάρη στην παρουσία ισχυρών μαγνητικών πεδίων.

Οι μελέτες ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνολογικής προσπάθειας ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960, ενώ συνεχίστηκαν απτόητες και τις επόμενες δεκαετίες, στην Ιαπωνία, την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90 είχαν επικρατήσει δύο παραλλαγές μαγνητικής αιώρησης, που βασίζονταν στην ίδια αρχή λειτουργίας, δηλαδή την δημιουργία του φαινομένου της ανύψωσης και της προώθησης ενός τρένου, μέσω της χρησιμοποίησης ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Οι διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι ουσιαστικά σχεδιαστικές, ενώ παρατηρούνται και ορισμένες διαφορές διάταξης του μαγνητικού πεδίου. Ένας γραμμικός επαγωγικός κινητήρας είναι υπεύθυνος για την κίνηση του

τρένου, που ουσιαστικά είναι ένας εξελισσόμενος ηλεκτροκινητήρας που μπορεί να παράξει μαγνητικά πεδία.

Μία πρώτη περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής αιώρησης αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '70 στην Γερμανία, με το μαγνητικό τρένο «Transrapid». Το όχημα ήταν διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να περιβάλλει τις ράγες αφού έφερε στο κάτω μέρος του μόνιμους μαγνήτες. Χάρη στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούταν, το τρένο μπορούσε να ανυψωθεί ένα εκατοστό περίπου πάνω από τις σιδηροτροχιές, που ήταν συνηθέστερα κατασκευασμένες από μπετόν και σίδηρο, σε σχήμα T.

Μία δεύτερη παραλλαγή αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία, με την ονομασία «Maglev», δηλαδή Magnetic Levitation. Σε αυτήν την περίπτωση το τρένο χρησιμοποιούσε υπεραγώγιμους μαγνήτες που ψύχονταν με υγρό ήλιο, ενώ σαν υλικό κατασκευής χρησιμοποιούνταν κράμματα Νιοβίου – Κασσίτερου και Νιοβίου – Τιτανίου. Κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, σχήματος U, και πιο συγκεκριμένα στα πλάγια και στην βάση, τοποθετούνταν πηνία που απωθούσαν τους υπεραγώγιμους μαγνήτες, χάρη στην ύπαρξη του ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το τρένο να ανυψώνεται 10 με 15 εκατοστά πάνω από τις ράγες.

Τα τρένα μαγνητικής αιώρησης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά τρένα, αφού μπορούν να αναπτύξουν μεγαλύτερες ταχύτητες, με αποτέλεσμα να μπορούν να μειώσουν τις χρονικές αποστάσεις μεταξύ των δρομολογίων. Ταυτόχρονα, έχουν την δυνατότητα να φρενάρουν και να επιταχύνουν πιο γρήγορα, να λειτουργούν απροβλημάτιστα σε αντίξοες καιρικές, όπως οι καταιγίδες, η χιονόπτωση και ο παγετός και να κινούνται ευκολότερα σε ανηφόρες, όπου τα συμβατικά τρένα αντιμετωπίζουν ζητήματα.

Είναι πολυτελή, άνετα και αθόρυβα, αν και ο ήχος έχει αυξητική τάση, όσο η ταχύτητα πλησιάζει τα 400 χιλιόμετρα την ώρα.

Τέλος, και βάσει μακροχρόνιων μετρήσεων, αποδείχθηκε πως παρουσιάζουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με τα αεροπλάνα και τα συμβατικά τρένα υψηλής ταχύτητας, ενώ λόγω της χρησιμοποίησης μαγνητικών πεδίων δεν ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ – ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Επειδή η αεροδυναμική σαν επιστήμη είναι αρκετά εξειδικευμένη, είναι λογικό να προκαλεί σύγχυση στους απλούς ανθρώπους που δεν έχουν ιδιαίτερες γνώσης φυσικής και μηχανικής.

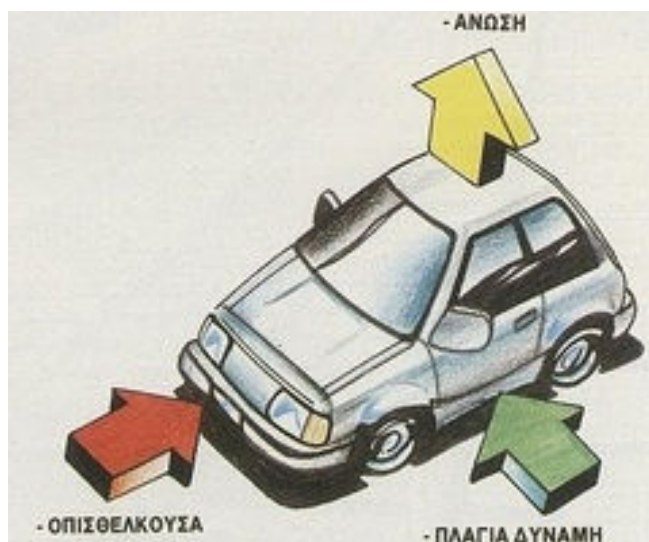
### 1.2. Αρχές της αεροδυναμικής

Σαν ορισμό της αεροδυναμικής θα μπορούσαμε να πούμε πως, είναι το πεδίο δυνάμεων που εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της κίνησης ενός στερεού σώματος μέσα από τον αέρα. Η αεροδυναμική όμως είναι τόσο σημαντική στον χώρο της αυτοκίνησης αφού εάν κατανοηθεί πλήρως, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές βελτιώσεις στους τομείς: της οικονομίας του καυσίμου, της υψηλής ταχύτητας, της σταθερότητας του οχήματος όταν δέχεται την επίδραση των πλευρικών ανέμων, της σταθερότητας του χειρισμού, του μειωμένου θορύβου από την αντίσταση του αέρα, της ψύξης, του εξαερισμού, του κλιματισμού, της διαδικασίας απόψυξης, του σταθερού κρατήματος των υαλοκαθαριστήρων και της μείωσης του ποσοστού σκόνης που καλύπτει το όχημα.

Η αεροδυναμική αντίσταση οφείλεται στις τριβές που αναπτύσσονται όταν ένα στερεό σώμα κινείται με κάποια ταχύτητα στον αέρα. Η αεροδυναμική αντίσταση εξαρτάται λοιπόν από την πυκνότητα ( $P$ ) του οχήματος, από την μετωπική επιφάνειά του ( $A$ ), από την ταχύτητά του ( $V$ ) και από τον συντελεστή της οπισθέλκουσας ( $CD$ ).

Όταν ένα όχημα κινείται στον δρόμο δέχεται τρεις βασικές δυνάμεις, την οπισθέλκουσα, την άνωση και την πλευρική δύναμη. Η οπισθέλκουσα, είναι η δύναμη που δημιουργεί εμπόδια στην κίνηση του οχήματος προς τα εμπρός, γι' αυτό και η χρησιμοποίηση ενός αεροδυναμικού σχήματος στο εμπρός μέρος του οχήματος, βοηθάει στην μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και στην μείωση του θορύβου, αφού απαιτείται μικρότερο έργο ώστε να υπερνικηθεί η αντίσταση του αέρα, λόγω της

μικρής μετωπικής επιφάνειας ( $A$ ) που συγκρούεται ο αέρας. Η άνωση είναι η δύναμη που προκαλεί απώλεια πρόσφυσης στο όχημα, το κάνει δηλαδή να σηκώνεται από το οδόστρωμα και η πλευρική δύναμη είναι υπεύθυνη για την απώλεια ευθύγραμμης κίνησης ή της ανατροπής του οχήματος, αφού είναι η δύναμη που σπρώχνει το αυτοκίνητο προς το πλάι.

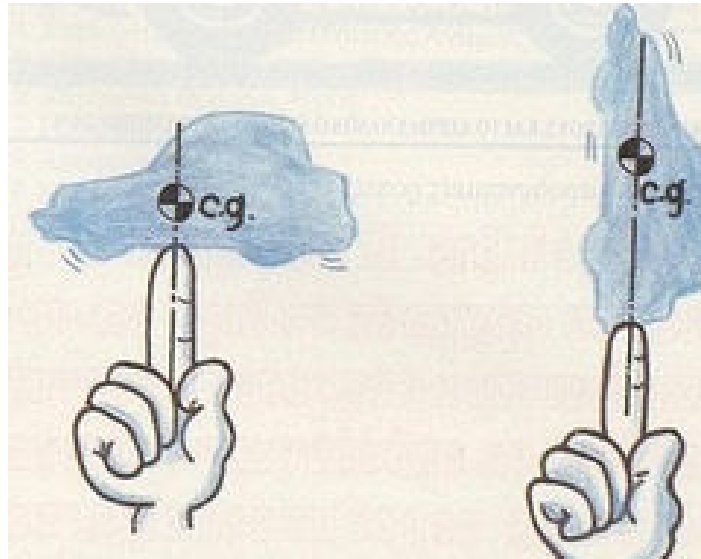


Εικόνα 1. Οι τρεις βασικές δυνάμεις που ασκεί ο αέρας στα οχήματα

Η ευστάθεια του οχήματος εξαρτάται από τρεις αεροδυναμικές συνιστώσες. Η πρώτη ονομάζεται *γωνία προσβολής* και αφορά το εμπρός τμήμα του αμαξώματος και την ανύψωσή του γύρω από το κέντρο βάρους του. Η συνιστώσα αυτή που δημιουργείται γύρω από το κέντρο βάρους δημιουργεί την λεγόμενη *ροπή ανατροπής*. Σε αυτή την ροπή λοιπόν, μεγάλη σημασία αποκτά η πρόσθια και οπίσθια τάση ανύψωσης του οχήματος, ανάλογα της γωνίας προσβολής του αέρα.

Η δεύτερη συνιστώσα ονομάζεται *ροπή περιστροφής* ή αλλιώς *ροπή περικύλισης*, και προκαλείται από τον πλευρικό αέρα που σπρώχνει το όχημα προς το πλάι.

Η τρίτη και τελευταία, είναι η *ροπή εκτροπής*, που προκαλείται όταν το όχημα δέχεται την αντίσταση του αέρα υπό γωνία. Με αυτό τον τρόπο το αυτοκίνητο δεν μπορεί να οδηγηθεί σε ευθεία γραμμή και εκτρέπεται από την πορεία του.



Εικόνα 2. Το κέντρο βάρους είναι το σημείο που ισορροπεί το βάρος του αυτοκινήτου

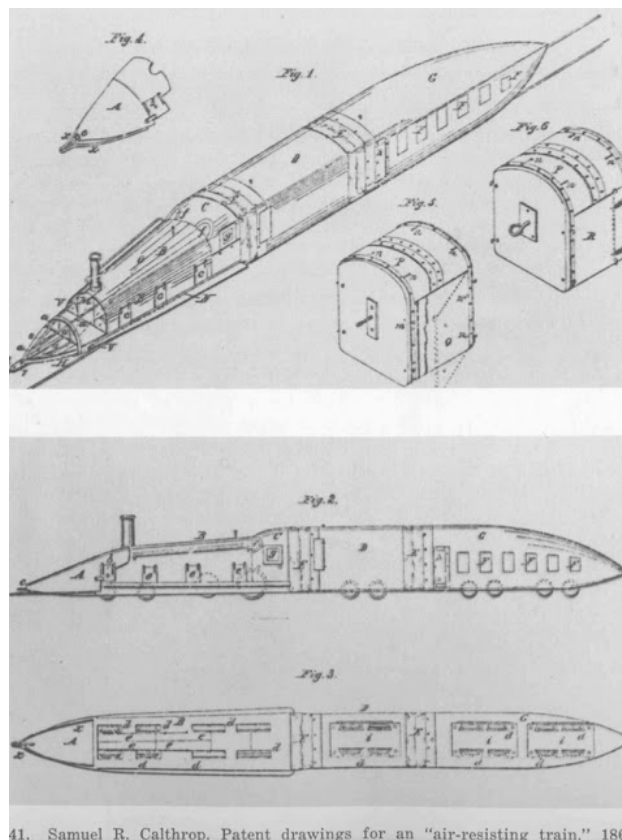
Θα πρέπει να αναλογιστούμε πως τα αυτοκίνητα μεταξύ τους, αλλά και τα διαφορετικά μοντέλα μιας εταιρείας, έχουν διαφορετικούς συντελεστές αεροδυναμικής, αλλά σαν γενικούς παράγοντες που επηρεάζουν τα ποσοστά οπισθέλκουσας θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, το πλάτος και την πίεση των ελαστικών, την ποσότητα καυσίμων, τους λασπωτήρες, την αεροτομή, την θέση των καθισμάτων, ακόμα και το κατά πόσο καινούριο ή πόσο βρώμικο είναι ένα όχημα, αφού ένα παλιό ή ακάθατο όχημα έχει και υψηλότερο CD.

## 1.2. Ιστορική εξέλιξη

Οι σχεδιαστές, οι μηχανικοί και οι άνθρωποι της αυτοκίνησης, κατέληξαν πως η μελέτη της αεροδυναμικής ήταν κάτι σημαντικό για την αναβάθμιση των αυτοκινήτων, και ιδιαιτέρως των αγωνιστικών. Κατάλαβαν πως η αντίσταση του αέρα δημιουργούσε προβλήματα στις επιδόσεις των οχημάτων και άρχισαν να σχεδιάζουν αγωνιστικά με πρωτότυπα αεροδυναμικά σχήματα. Έτσι μπήκαν τα θεμέλια ώστε να υπάρξει ο τομέας της αυτοκινητιστικής αεροδυναμικής. Τη δεκαετία το 1950, οι Βρετανοί και οι Γερμανοί μηχανικοί και σχεδιαστές ανέλυσαν τις επιδόσεις των οχημάτων, καθώς δέχονταν τις επιδράσεις του αέρα και έως το τέλος

της δεκαετίας του 1960, επιστήμονες είχαν βγάλει σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την αύξηση του ήχου και της κατανάλωσης καυσίμου, εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης του αέρα. Τα διαφαινόμενα κέρδη του τομέα της αεροδυναμικής, έκαναν τους επιχειρηματίες και τους μηχανικούς να θέλουν να ενασχοληθούν περισσότερο με το θέμα. Αν και προκαλούσαν την αισθητική του απλού κόσμου, δημιουργήθηκαν από τότε μερικά εξαιρετικά αυτοκίνητα τα οποία ήταν απολύτως αεροδυναμικά. Ο δρόμος για την απόλυτη μειωμένη αντίσταση, έχει πολλές αναταραχές.

Τα πρώτα εγκεκριμένα αεροδυναμικά σχέδια εμφανίστηκαν τουλάχιστον διακόσια χρόνια πριν. Ο George Cayley το 1804, ανέφερε για πρώτη φορά την ανάγκη αεροδυναμικού σχεδιασμού στα οχήματα, ώστε να μοιάζουν με σφαίρα και να κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Το 1865, ο Samuel Calthorpe παρουσίασε το σχέδιο ενός τραίνου που θα μπορούσε να υπερνικήσει την αντίσταση του αέρα, ένα σχέδιο που ήταν εξαιρετικό επίτευγμα για τα μέσα, τις απόψεις και την τεχνολογία της εποχής.



Εικόνα 3. Η πατέντα του τραίνου του Samuel Calthorpe

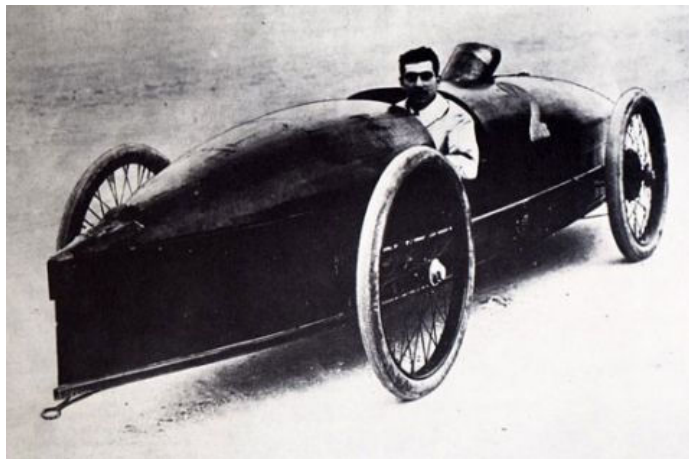


Φυσικά πολλοί άρχισαν να ασχολούνται με το θέμα και κυνηγούσαν το ρεκόρ ταχύτητας οχήματος στην άσφαλτο, με το αυτοκίνητο «La Jamais Contente» το 1899, να είναι το πρώτο που έσπασε το φράγμα των 100 χιλιομέτρων την ώρα.



**Εικόνα 4. Το La Jamais Contente**

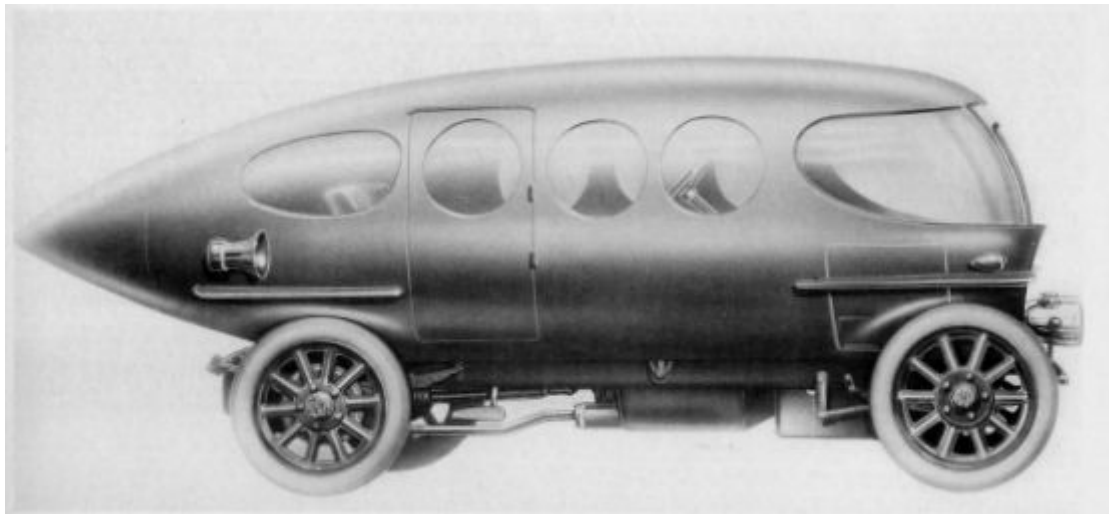
Οι εξελίξεις στην αεροδυναμική, έφεραν στο προσκήνιο πολλά νέα οχήματα που ευελπιστούσαν να καταρρίψουν το ρεκόρ ταχύτητας, κάτι που το πέτυχε τελικά η «Ατμοροκέτα του Στάνλεϊ», που έσπασε το φράγμα των 200 χιλιομέτρων την ώρα το 1906, επίδοση που δεν ξεπεράστηκε μέχρι το 1924.



**Εικόνα 5. Ατμοροκέτα του Στάνλεϊ**

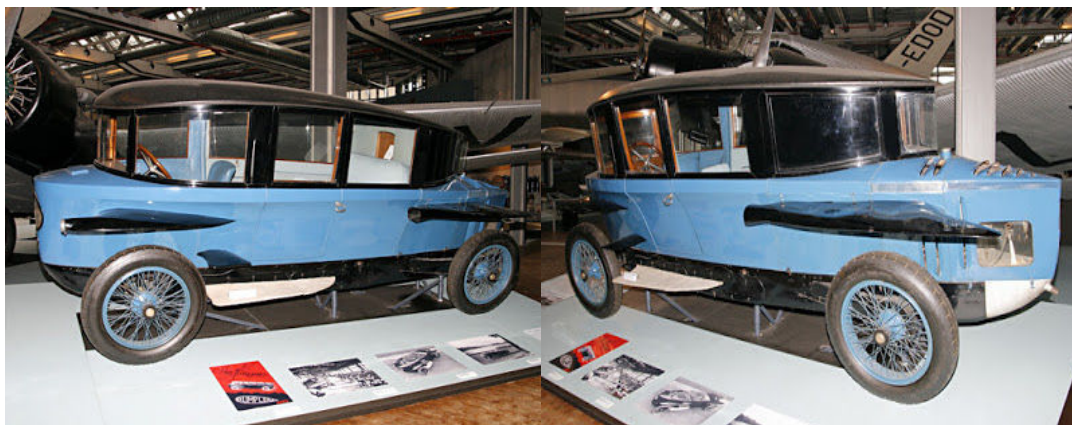
Η πρώτη προσπάθεια ώστε να παρουσιαστεί ένα αεροδυναμικό επιβατικό όχημα, ανήκε στην Alfa Romeo, από τον αρχικατασκευαστή Castagna. Ο κατασκευαστής εμπνεύστηκε από τις νουβέλες του Ιουλίου Βερν, και σχεδίασε μια βαριά κατασκευή

ενός φουτουριστικού αυτοκινήτου πολλών θέσεων. Η τελική ταχύτητα, λόγω μεγέθους θα ήταν μικρή και έτσι η ιδέα του συγκεκριμένου σχεδίου, εγκαταλείφθηκε.



Εικόνα 6. Το αεροδυναμικό επιβατικό όχημα της Alfa Romeo

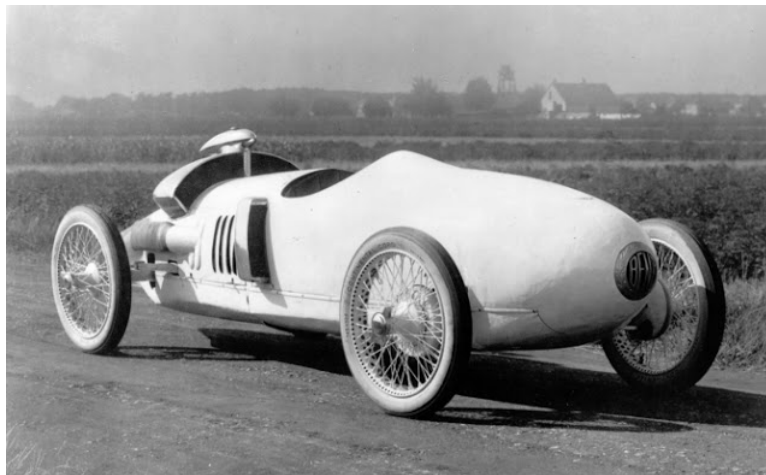
Την επανάσταση τελικά έκαναν πάλι οι Γερμανοί, με το «όχημα σταγόνα» το 1921. Σε σχέση με το πρωτότυπο της Alfa Romeo, το Rumpier ήταν εξαιρετικό μηχανικά και σχεδιαστικά. Επάνω του είχε μια W6 μηχανή, με ανεξάρτητο σύστημα ανάρτησης των τεσσάρων τροχών και εξαιρετικά μικρό αεροδυναμικό συντελεστή, της τάξεως του 0.28. Το Rumpier δοκιμάστηκε το 1979 στην σήραγγα αεροδυναμικής της Volkswagen, και η εταιρεία χρειάστηκε να περιμένει 9 χρόνια για να καταρρίψει την συγκεκριμένη τιμή.



Εικόνα 7. Το «όχημα σταγόνα» της Volkswagen

Το όνομα «σταγόνα» ήταν εμπνευσμένο από την φύση, αφού οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές θεωρούσαν την σταγόνα ως ότι πιο αεροδυναμικό μπορεί να παρουσιάσει ο φυσικός κόσμος, με τον μικρότερο συντελεστή αντίστασης. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον συντελεστή CD, μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα. Ένα τούβλο, οποιουδήποτε μεγέθους έχει αεροδυναμικό συντελεστή 1.0, ενώ μια σφαίρα 0.295. Το αεροδυναμικό όχημα κατέληξε να κατασκευαστεί περίπου 100 φορές και να χρησιμοποιείται κυρίως σαν ταξί στο Βερολίνο, εξαιτίας της mini-van εμφάνισής του. Αλλά εξαιτίας αυτού του αυτοκινήτου, εμπνεύστηκαν πολλές ιδέες αεροδυναμικής και βελτιώθηκε ολόκληρος ο κλάδος.

Η επιρροή του Rumpier Tropfenwagen (όχημα σταγόνα), ήταν εμφανής στο Benz Tropfenwagen του 1923, που αποτελούσε εξέλιξη του οχήματος σε αγωνιστική μορφή, με την χρησιμοποίηση ατόφιων εξαρτημάτων από το Rumpier. Τελικά όλα τα κεντρομήχανα θρυλικά αυτοκίνητα αυτής και της μετέπειτας εποχής, εμπνεύστηκαν από το Tropfenwagen που είχε τον κινητήρα του στο κέντρο και σπαστό διαφορικό στον πίσω άξονα.



**Εικόνα 8. Κεντρομήχανο όχημα**

Αργότερα, και ενώ ο τομέας της αεροδυναμικής εξελισσόταν, όλο και περισσότερες εταιρείες προσπαθούσαν να βρουν το κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα, ώστε να μειώσουν τις αντιστάσεις του αέρα. Έτσι ήταν πολύ λογικό να φτάσουμε στην εποχή της F1, όπου παρουσιάζονται τα πιο φουτουριστικά και αεροδυναμικά μονοθέσια οχήματα όλων των εποχών.



Εικόνα 9. Τα φουτουριστικά μονοθέσια της Φόρμουλα 1

### 1.3. Οι νόμοι της αεροδυναμικής

Κατασκευασμένο να αγγίζει την τελειότητα, το δυνατό αγωνιστικό μονοθέσιο που χρησιμοποιείται στην F1, θεωρείται ότι καλύτερο στην τεχνολογία της αυτοκίνησης. Ορίζεται για την καταπληκτική του ταχύτητα και τον εξαιρετικών χαρακτηριστικών χειρισμό του. Αυτά όμως δεν θα μπορούσαν να επιτευχθούν, εάν δεν ήταν άψογη και η αεροδυναμική λειτουργία. Η επιτυχία της αεροδυναμικής εξαρτάται κυρίως από την ορθή και αποτελεσματική αξιοποίηση της οπισθέλκουσας και κάθετης δύναμης, δύο δυνάμεων οι οποίες διέπονται από την φυσική και εξηγούνται επαρκώς στην εξίσωση του Bernoulli.

#### 1.3.1. Ο νόμος του Bernoulli

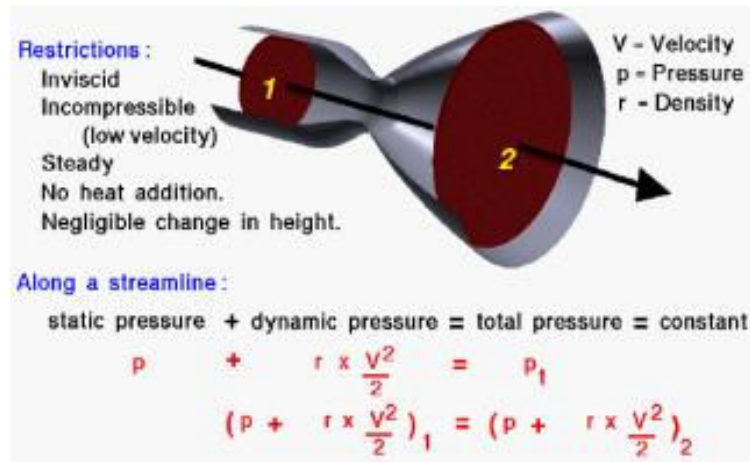
Στις αρχές του 1700, ο Bernoulli διερευνούσε την εξίσωση που καθόριζε τους νόμους της φυσικής σχετικά με την αεροδυναμική και την κίνηση του αέρα. Οι

αεροδυναμικές του έννοιες και εξισώσεις είναι απολύτως θεμελιώδης πάνω στην προσπάθεια μελέτης αυτών των εννοιών. Κάθε προσπάθεια από τους σχεδιαστές στοχεύει στο να βελτιώσει τον τρόπο που ένα μονοθέσιο ανοίγει δρόμο μέσα από τα μόρια του αέρα, μειώνοντας την φυσική σχέση μεταξύ των στοιχείων του ρευστού, της ταχύτητας και της πίεσεως.

Υπάρχουν πολλές μορφές και μεταφράσεις της εξίσωσης του Bernoulli, τρεις όμως είναι οι σημαντικότερες, η ροή κατά μήκος ενός ρεύματος (streamline), η ροή κατά μήκος πολλών streamlines και η ροή κατά μήκος της αεροτομής (airfoil). Οι τρεις εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν για να λύσουν διάφορες υποθέσεις όπως την πυκνότητα του αέρα που δεν αλλάζει όταν του ασκείται πίεση, αφού ο αέρας παραμένει ασυμπίεστος. Επειδή τα μονοθέσια ταξιδεύουν πιο αργά από την ταχύτητα Mach 1, αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν πολύ ακριβή αποτελέσματα.

Η χαμηλή ταχύτητα του ρευστού κατά μήκος ενός ή πολλών ρευμάτων ερμηνεύεται στο σχήμα, ενώ αναφέρονται και τα τεκμήρια σχετικά με την εφαρμογή της εξίσωσης του Bernoulli.

Σε αυτήν την κατάσταση υπάρχει στενή σχέση μεταξύ της ταχύτητας, της πυκνότητας και της πίεσεως. Καθώς μια μονή ροή ρεύματος υγρού ρέει μέσα σε έναν σωλήνα, με μεταβαλλόμενη επιφάνεια διατομής, όπως συμβαίνει με ένα μονοθέσιο της F1, η ταχύτητά του μειώνεται από το ένα άκρο στο άλλο, και η ολική του πίεση ισούται με την συνεχόμενη του. Με πολλές ροές ρεύματος η συνολική πίεση ισοδυναμεί με την συνεχόμενη κάθε μίας ξεχωριστής ροής. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει μόνο στην περίπτωση που οι διαφορές ύψους μεταξύ των γραμμών ροής είναι αμελητέες. Αλλιώς η κάθε ροή έχει την δική της μοναδική ολική πίεση.



Εικόνα 10. Ο Νόμος του Bernoulli

Ο Bernoulli λοιπόν συνέχισε με μια απλή εξίσωση που μειώνει την σχέση ταχύτητας και στατικής πίεσης.

$$(ΠΙΕΣΗ) + 0,5 (ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ) \times (ΤΑΧΥΤΗΤΑ)^2 = \SigmaΤΑΘΕΡΑ$$

Η εξίσωση αυτή υποδηλώνει ότι η αύξηση της πίεσης πρέπει να συνοδεύεται από μια μείωση στην ταχύτητα, και αντιστρόφως. Ολοκληρώνοντας την στατική πίεση κατά μήκος ολόκληρης της επιφάνειας της αεροτομής, δίνεται η συνολική αεροδυναμική δύναμη σε ένα σώμα. Τα συστατικά της άντωσης και της οπισθέλκουσας, μπορεί να καθορίζονται από το σπάσιμο αυτής της δύναμης προς τα κάτω.

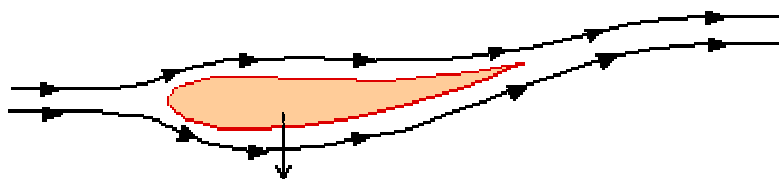
Σύμφωνα με τα πειράματα του Bernoulli, αν διάφορα υγρά ρέουν γύρω από ένα αντικείμενο με διαφορετική ταχύτητα, το υγρό που κινείται με την μικρότερη ταχύτητα θα ασκεί μεγαλύτερη πίεση στο αντικείμενο, σε σχέση με τα υγρά που κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Το αποτέλεσμα θα είναι το αντικείμενο να αναγκάζεται να κινηθεί προς το ταχύτερα κινούμενο υγρό. Έτσι δημιουργούνται οι δυνάμεις της άντωσης και της κάθετης δύναμης. Άντωση του φτερού έχουμε όταν η κάθετη δύναμη εμφανίζεται να κινείται προς τα κάτω.

Η αξιοσημείωτη ταχύτητα του αγωνιστικού αυτοκινήτου της F1, επιτυγχάνεται από τον προσεκτικό σχεδιασμό του ισχυρού κινητήρα και του φροντισμένου σε κορυφαίο επίπεδο αεροδυναμικού αμαξώματος. Κατά τα πρώτα χρόνια σχεδιασμού της F1, ο κινητήρας ήταν η κύρια μεταβλητή για τον προσδιορισμό της επιτυχίας ενός



αυτοκινήτου. Το αποτέλεσμα ήταν η τεχνολογία των κινητήρων να έχει υπερβεί κατά πολύ την αεροδυναμική ωριμότητα των οχημάτων. Η ταχύτητα ήταν ανέκαθεν συνυφασμένη με την ιπποδύναμη. Παρόλο που τα επίπεδα απόδοσης του κινητήρα εξακολουθούν να βελτιώνονται κάθε χρόνο, τα ρεκόρ επιτευγμάτων ταχύτητας εξαρτώνται και από το θέμα του σχεδιασμού της αεροδυναμικής. Ο μηχανικός αεροδυναμικής Will Gray, ανέφερε χαρακτηριστικά πως η τελική ταχύτητα του μονοθεσίου είναι συνυφασμένη με πολλούς παράγοντες όπως, το βάρος, της στρατηγική των καυσίμων και την καλή λειτουργία του κινητήρα. Ο κύριος παράγοντας όμως που διαχωρίζει τους νικητές από τους υπόλοιπους οδηγούς είναι η αεροδυναμική απόδοση, αφού εάν η αεροδυναμικότητα του οχήματος δεν είναι καλή, ο οδηγός θα σέρνει μαζί του και ένα ανεπιθύμητο βάρος από τον αέρα.

Η κάθετη δύναμη ή αρνητική άντωση, ωθεί το αυτοκίνητο πάνω στην πίστα. Το κράτημα επιτυγχάνεται με την χρήση αεροτομής που τοποθετείται με τρόπο τέτοιο ώστε το μεγαλύτερο μέρος της ροής του αέρα να παρουσιάζεται θετικό για το όχημα. Καθώς ο αέρας περνάει πάνω από την αεροτομή, δημιουργείται μια περιοχή χαμηλής πίεσης στην κάτω πλευρά του πτερυγίου. Μια περιοχή υψηλής πίεσης αναπτύσσεται εν συνεχεία στην άνω πλευρά του πτερυγίου δημιουργώντας μια καθοδική δύναμη. Αυτή η πίεση προκαλεί την καθαρή κάθετη δύναμη.



Εικόνα 11. Η δημιουργία κάθετης δύναμης στην αεροτομή του μονοθεσίου

Η κάθετη δύναμη είναι απαραίτητη για την διατήρηση της ταχύτητας στις στροφές. Δεδομένου του γεγονότος πως η ισχύς των κινητήρων που κατασκευάζονται σήμερα μπορεί να ξεπεράσει μεγάλο μέρος των αντίθετων δυνάμεων που προκαλούνται από την έλξη, η προσοχή του σχεδιασμού έχει εστιαστεί στην τελειοποίηση των ιδιοτήτων

της αεροδυναμικής πίεσης του μονοθεσίου ώστε να αντιμετωπιστούν φαινόμενα όπως της οπισθέλκουσας.



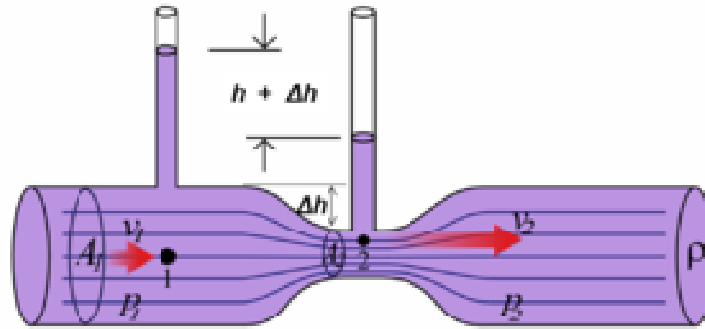
Εικόνα 12. Σχεδίαση για το καλύτερο αεροδυναμικό σχήμα

Το σχήμα σταγόνα εμφανίζει τις ιδανικές αεροδυναμικές ιδιότητες για μια χωρίς περιορισμούς ροή. Όμως όταν αυτό το σχέδιο ενσωματώνεται στην σχεδίαση ενός μονοθεσίου της F1, οι ροές τείνουν να αλλάξουν διότι τα αυτοκίνητα αυτά είναι πολύ κοντά στο έδαφος. Το έδαφος αποτρέπει τον σχηματισμό συμμετρικού μοτίβου ροής, και η αύξηση του ύψους των μονοθεσίων ώστε να απομακρυνθούν από το έδαφος, θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθούν οι αεροδυναμικές αντιστάσεις. Έτσι με την δημιουργία του σχήματος σταγόνα, η συμπεριφορά ροής παρουσιάζει δυσμενώς αυξημένο συντελεστή οπισθέλκουσας και δημιουργία ευνοϊκής κάθετης δύναμης. Ευτυχώς, η κάθετη δύναμη που δημιουργείται είναι εξαιρετικά πολύτιμη και η αυξημένη αντίσταση μπορεί να ξεπεραστεί με μια σειρά από αεροδυναμικές στρατηγικές.

### 1.3.2. Το φαινόμενο του Venturi

Το φαινόμενο Venturi είναι η μείωση της πίεσης του υγρού που προκύπτει όταν ένα υγρό ρέει μέσα σε ένα περιορισμένο τμήμα ενός σωλήνα. Το φαινόμενο Venturi πήρε το όνομά του από τον Giovanni Battista Venturi που ήταν ιταλός φυσικός.





Εικόνα 13. Το φαινόμενο του Venturi

*Η πίεση στον σωλήνα με τον αριθμό 1, είναι μεγαλύτερη από το σημείο 2, και η ταχύτητα του υγρού στο σημείο 1 είναι μικρότερη από το σημείο 2, επειδή η περιοχή διατομής της περιοχής του σημείο 1 είναι μεγαλύτερη από τους σημείου 2.*

Στην αεροδυναμική των υγρών, η ταχύτητα ενός υγρού αυξάνεται καθώς περνά μέσα από μία στένωση, σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας, ενώ η στατική του πίεση πρέπει να μειωθεί σύμφωνα με την αρχή της μηχανικής ενέργειας. Έτσι οποιαδήποτε αύξηση στην κινητική ενέργεια ενός υγρού μπορεί να προκύψει λόγω της αυξημένης ταχύτητά του την ώρα της συστολής, μπορεί να εξισορροπηθεί από μια πτώση στην πίεση.

Με την μέτρηση της μεταβολής της πίεσης, ο ρυθμός ροής μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορες συσκευές μετρήσεως, όπως ο μετρητής Venturi, τα ακροφύσια Venturi και οι πλάκες στομίου.

Μια εξίσωση για την πτώση της πίεσης λόγω της επίδρασης Venturi, μπορεί να προέλθει από τον συνδυασμό της αρχής του Bernoulli και της εξίσωσης της συνέχειας. Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε πως η θεωρητική πτώση της πίεσης κατά τη συστολή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2(U_2^2 - U_1^2)}$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υγρού,  $U_1$  είναι η μικρότερη ταχύτητα του υγρού εκεί που ο σωλήνας είναι πιο ευρύχωρος και  $U_2$  είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα του υγρού εκεί που ο σωλήνας στενεύει. Φυσικά στην παραπάνω εξίσωση θεωρείται πως, το

υγρό που ρέει δεν είναι σημαντικά συμπιεστό και παρόλο που η πίεση παραμένει σταθερή, η πυκνότητα του υγρού θεωρείται ότι παραμένει επίσης σταθερή.

Η οριακή περίπτωση της επίδρασης Venturi, είναι όταν ένα υγρό φτάνει στην κατάσταση του λεγόμενου στραγγαλισμού της ροής, όπου η ταχύτητα του υγρού προσεγγίζει την τοπική ταχύτητα του ήχου. Σε ροή στραγγαλισμού, ο ρυθμός ροής της μάζας δεν αυξάνεται με την περαιτέρω μείωση της πίεσεως του περιβάλλοντος. Ωστόσο, ο ρυθμός ροής της μάζας σε ένα συμπιεστό υγρό μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της πίεσης, η οποία σαν αποτέλεσμα θα αυξήσει την πυκνότητα του υγρού μέσω της συστολής, με δεδομένο πως η ταχύτητα θα παραμείνει σταθερή. Η αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής, δηλαδή στο παράδειγμά μας του σωλήνα, θα αυξήσει την τοπική ταχύτητα του ήχου, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την αυξημένη ταχύτητα ροής της μάζας.

### 1.3.3. Ο αριθμός Reynolds

Στην μηχανική των ρευστών, ο αριθμός Reynolds (RE) είναι ένας αριθμός που δίνει ένα μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων σε ιξώδεις δυνάμεις και κατά συνέπεια ποσοτικοποιεί τη σχετική σημασία των δύο τύπων δύναμης, σε δεδομένες συνθήκες ροής. Ο ίδιος ο αριθμός ονομάστηκε Reynolds από τον Osborne Reynolds που διέδωσε την χρήση του το 1883.

Οι αριθμοί Reynolds, συχνά προκύπτουν κατά την εκτέλεση διαστατικής ανάλυσης της δυναμικής των προβλημάτων των υγρών, και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της δυναμικής ομοιότητας μεταξύ διαφορετικών πειραματικών περιπτώσεων. Ο αριθμός Reynolds έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει διάφορα καθεστώτα ροής όπως η στρωτή ροή που έχει μικρό αριθμό Reynolds, όπου οι ιξώδεις δυνάμεις είναι κυρίαρχες και χαρακτηρίζεται από ομαλή και συνεχή κίνηση ρευστού και η τυρβώσης ροή που έχει υψηλούς αριθμούς Reynolds, και κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας, οι οποίες τείνουν να παράγουν χαοτικές δίνες και πολλές αστάθειες στην ροή.

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ένας αριθμός διαφορετικών καταστάσεων, όπου ένα ρευστό ή υγρό είναι σε σχετική κίνηση με μια επιφάνεια. Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει τις ιδιότητες του υγρού, την πυκνότητά του, το ιξώδες του, την ταχύτητα και το χαρακτηριστικό μήκος ή χαρακτηριστική διάσταση. Οι δυνάμεις αδρανείας, οι οποίες χαρακτηρίζουν το κατά πόσο ένα συγκεκριμένο ρευστό αντιστέκεται σε οποιαδήποτε αλλαγή στην κίνηση, δίνονται σύμφωνα με τον αριθμό Reynolds με τον παρακάτω τύπο:

$$R_e = \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}$$

Όπου V είναι η μέση ταχύτητα του αντικειμένου σε σχέση με το υγρό (SI μονάδες: m/s).

L είναι μια χαρακτηριστική γραμμική διάσταση.

Μ είναι το δυναμικό ιξώδες του υγρού (Pa x s ή N x s/m ή kg/ m x s)

ν είναι το κινηματικό οξώδες ( $\nu = \mu/\rho$ ) ( $M^2 / s$ ).

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού (kg / m).

Για την ροή σε έναν σωλήνα ο αριθμός Reynolds ορίζεται με τον τύπο:

$$R_e = \frac{\rho v D_H}{\mu} = \frac{v D_H}{\nu} = \frac{Q D_H}{\nu A}$$

Όπου DH είναι η υδραυλική διάμετρος του σωλήνα.

Q είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής ( $m^3 / s$ ).

A είναι ο σωλήνας διατομής ( $m^2$ ).

V είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού (SI μονάδες: m/s).

μ είναι το δυναμικό ιξώδες του υγρού (Pa x s ή N x s/m ή kg/ m x s).

ν είναι το κινηματικό ιξώδες ( $\nu = \mu/\rho$ ) ( $M^2 / s$ ).

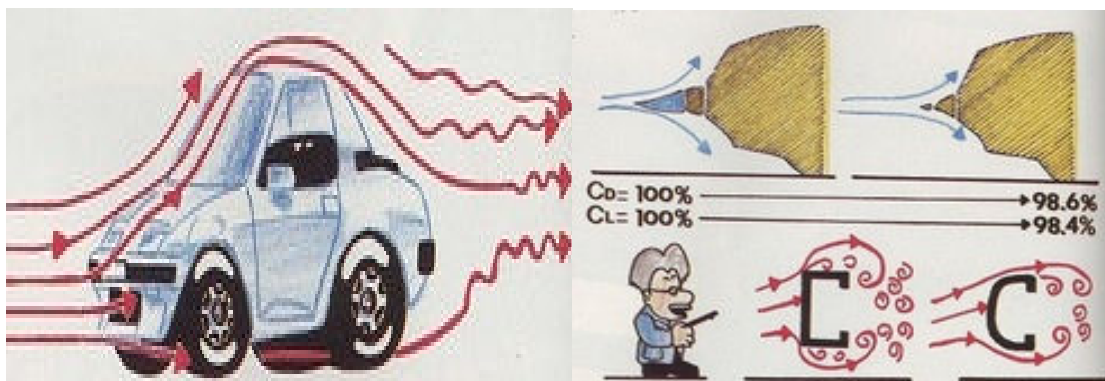
ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού (kg / m).

#### 1.4. Τα αεροδυναμικά βοηθήματα

Τα αεροδυναμικά βοηθήματα είναι πολύ σημαντικά ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αεροδυναμικότητα του οχήματος. Οι δημιουργίες των κατασκευαστών έχουν γεμίσει από αεροδυναμικά βοηθήματα που συμβάλουν στην μείωση της αντίστασης του αέρα, όπως είδαμε και σε προηγούμενα κεφάλαια.

Τα τελευταία χρόνια, το βάρος της έρευνας έπεφτε στο εμπρός μέρος του αμαξώματος, ώστε να βελτιωθεί η αεροδυναμικότητα. Ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης του κλάδου όμως είχαμε και την ανάλογη προσοχή στο πίσω μέρος του οχήματος αλλά και τα πλαϊνά. Στις έρευνες προστέθηκε και η ομαλή ροπή αέρα σε όλα τα διαμερίσματα του αυτοκινήτου, όπως για παράδειγμα την ομαλοποίηση στον χώρο του κινητήρα ή στον χώρο των επιβατών.

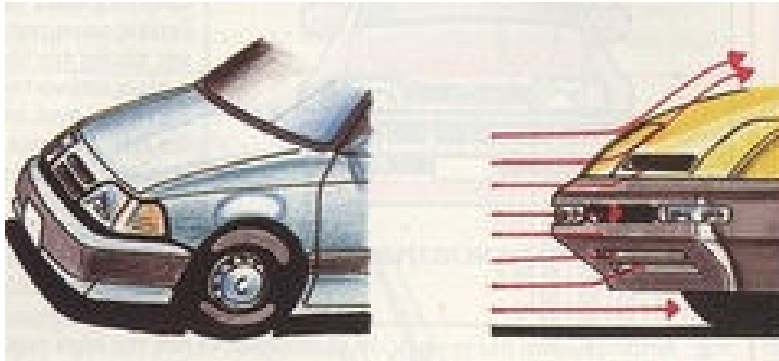
Έτσι οι έρευνες οδήγησαν στο συμπέρασμα πως ένας τριγωνικός προφυλακτήρας είναι σημαντικό αεροδυναμικό βοήθημα, αφού ένας πιο επίπεδος έχει χειρότερο συντελεστή οπισθέλκουσας και προκαλεί μεγαλύτερη άνωση.



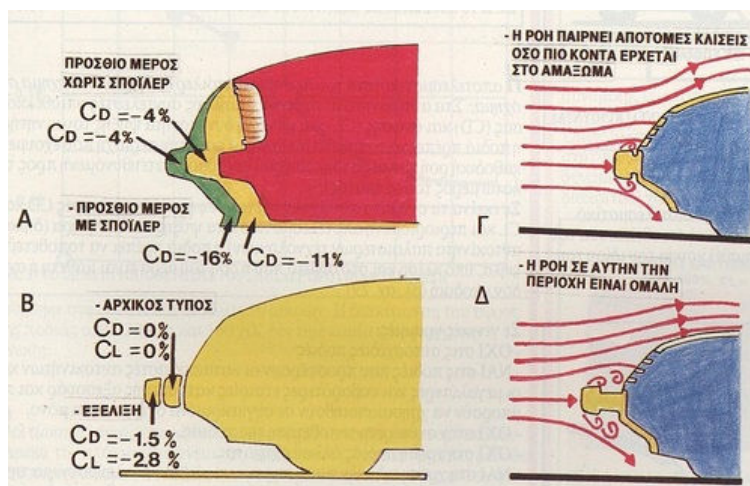
Εικόνα 14. Βελτίωση της αεροδυναμικής ροής

Πολλά αυτοκίνητα έχουν ένα κενό ανάμεσα στο αμάξωμά τους και τον προφυλακτήρα. Με την τοποθέτηση ενός ενιαίου πρόσθιου kit ή με μια διακοσμητική λωρίδα, καλύπτεται αυτό το κενό, και με τον τρόπο αυτό μειώνεται η οπισθέλκουσα και βελτιώνεται η διαδικασία ψύξης του κινητήρα. Τα νέα αυτοκίνητα έχουν σχεδόν όλα εμπρόσθιο spoiler, που βελτιώνει την αεροδυναμική δυνατότητα του οχήματος. Η

λύση αυτή θεωρείται από τους κατασκευαστές όσο η καλύτερη δυνατή. Σημαντικό στην ψύξη του κινητήρα, είναι και η χρησιμοποίηση προφυλακτήρα με δυνατότητα παγίδευσης του αέρα σε ειδικά σημεία, που βελτιώνει σημαντικά την μείωση της θερμοκρασίας της μηχανής.



Εικόνα 15. Ο προφυλακτήρας και το Spoiler είναι ένα, με αποτέλεσμα την μείωση της οπισθέλκουσας. Έρευνες έδειξαν πως όσο ο προφυλακτήρας εκτείνεται μπροστά από το αμάξωμα, τόσο πιο πολύ μειώνεται η οπισθέλκουσα και η άνωση. Το αποτέλεσμα είναι να πραγματοποιείται ομαλά η ροή του αέρα επάνω στο καπό του αυτοκινήτου, ενώ μειώνεται και ο όγκος του αέρα που εισέρχεται στο ψυγείο του κινητήρα. Αυτό το βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα, αν και είναι γενικά αποδεκτό πως δεν σημαίνει ότι είναι και πρακτικός ένας προφυλακτήρας που είναι απολύτως αεροδυναμικός.



Εικόνα 16. Κλίση ροής με πρόσθιο μέρος χωρίς και με σπόιλερ

Οι έρευνες έδειξαν πως όταν τα ρεύματα αέρα χτυπούν το εμπρόσθιο spoiler, δημιουργείται θετική πίεση, ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται στρόβιλοι στην οπίσθια επιφάνεια που προκαλούν αρνητική πίεση. Άρα αν και δημιουργεί οπισθέλκουσα, το spoiler στην πραγματικότητα μειώνει δραστικά την ολική οπισθέλκουσα που παρουσιάζει το όχημα. Αυτό συμβαίνει διότι ομαλοποιείται η ροή του αέρα και μειώνεται ο ολικός συντελεστής της οπισθέλκουσας σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή οπισθέλκουσας του ίδιου του spoiler.

Για να υπάρξει αεροδυναμική βελτίωση του πλαϊνού μέρους πρέπει να γίνει εξομάλυνση των χτυπημένων περιοχών, στρογγύλεμα των γωνιών, αφαίρεση προεξοχών και αεροδυναμικό σχήμα στους καθρέφτες του οχήματος.

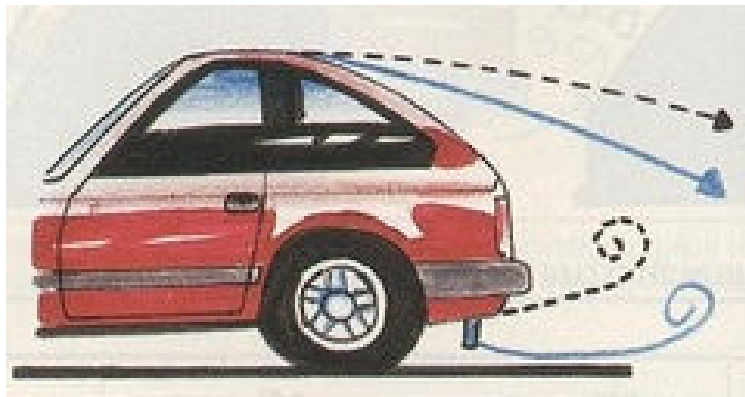
Ο τεχνικός μπορεί να επέμβει στο αμάξωμα τοποθετώντας έναν ανεμοθραύστη στο σημείο όπου ενώνεται η επιφάνεια του παρμπρίζ με τα πλαϊνά παράθυρα. Άλλο σημείο που επιδέχεται αεροδυναμικής προσαρμογής είναι το κάτω μέρος. Τα βοηθήματα που τοποθετούνται σε αυτό το σημείο ονομάζονται Skirts.

Με τα παραπάνω ομαλοποιείται η ροή του αέρα στα πλαϊνά και το κάτω μέρος του αυτοκινήτου, ελαχιστοποιούνται οι στρόβιλοι και οι έρευνες συνεχίζονται για την αλλαγή του τραχειού κάτω μέρους του αμαξώματος.

Άλλο βοήθημα τοποθετείται στα φανάρια του αμαξώματος, εάν παρουσιάζουν γωνίες και τραχιές επιφάνειες. Ονομάζονται «φρυδάκια» και βοηθούν περισσότερο στην εξομάλυνση της αεροδυναμικότητας. Η αποτελεσματική τοποθέτηση μιας αεροτομής στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου, δημιουργείται στατικός στρόβιλος που έχει κατεύθυνση από την οροφή και προς τα κάτω, κατά μήκος του οπίσθιου παρμπρίζ. Κάτι τέτοιο μειώνει αποτελεσματικά το συνολικό CD, αλλά και την άνωση οπίσθιου τμήματος. Η οπίσθια αεροτομή αυξάνει την πίεση της πίσω επιφάνειας του οχήματος επάνω στο οδόστρωμα, βελτιώνοντας τα κρατήματα και την σταθερότητα του.

Τέλος, με την χρησιμοποίηση πίσω ποδιάς, δηλαδή spoiler, στο κάτω μέρος του οχήματος εμποδίζεται η τάση του στρώματος αέρα που βρίσκεται κάτω από το αμάξωμα να επιστρέψει προς τα επάνω. Με την χρησιμοποίηση της ποδιάς, το στρώμα αέρα ακολουθεί την επιφάνεια του οχήματος και κυλάει ομαλά προς το

έδαφος, ενώ εμποδίζοντας την αναστροφή του, εμποδίζονται η σκόνη και η λάσπη που εναποτίθενται επάνω στο αυτοκίνητο.



Εικόνα 17. Πίσω ποδιά αυτοκινήτου



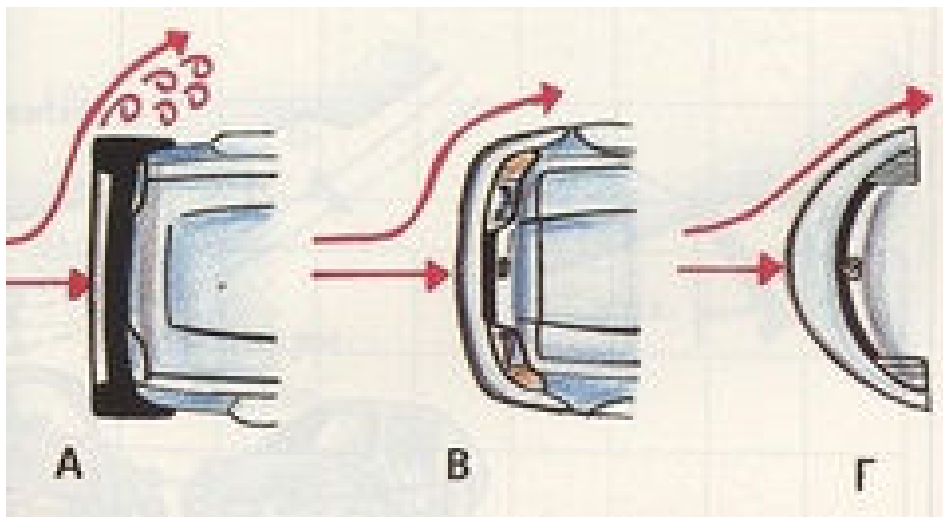
Εικόνα 18. Η χρησιμοποίηση αεροτομής, βελτιώνει την αεροδυναμικότητα του αμαξώματος

## 1.5. Αεροδυναμική σήραγγα

Η αεροδυναμική σήραγγα αποτελεί εργαλείο για τις εταιρείες αυτοκινήτων, που την χρησιμοποιούν ώστε να βελτιώσουν αεροδυναμικά τις επιδόσεις των οχημάτων. Κατά τα τελευταία χρόνια, οι μεγαλύτερες εταιρείες αυτοκινήτων και τα ερευνητικά τους κέντρα, έχουν αναπτύξει τις δικές τους σήραγγες οι οποίες είναι ευρείας κλίμακας και

οι υψηλών επιδόσεων. Προϋπόθεση της επιτυχίας των πωλήσεων του συγκεκριμένου μοντέλου άλλωστε είναι και η επιτυχημένη του αεροδυναμικότητα. Το αεροδυναμικό σχήμα βοηθάει στην κίνηση του αυτοκινήτου, αφού επάνω στο σασί εξασκούνται πολλές δυνάμεις και ροπές αέρα όπως είδαμε και παραπάνω, και έτσι αποκτά μικρό δείκτη CD.

Έτσι οι σήραγγες απέδειξαν πως οι τριγωνικοί προφυλακτήρες έχουν μικρότερο βαθμό οπισθέλκουσας, ενώ οι επίπεδοι προφυλακτήρες προκαλούν, λόγω και του χειρότερου συντελεστή οπισθέλκουσας, στασιμότητα του αέρα και αύξηση της αντίστασης που δέχεται το αυτοκίνητο από τις δυνάμεις του ανέμου.



**Εικόνα 19. Η βελτίωση του σχήματος του προφυλακτήρα**



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ – Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΙΩΡΗΣΗ**

### **2.1. Η αιώρηση**

Τα μαγνητικά υλικά και κατ' επέκταση τα μαγνητικά συστήματα, παρουσιάζουν μεταξύ τους δυνάμεις απώθησης και έλξης, που βασίζονται σε στοιχεία όπως η επιφάνεια των μαγνητών και το κατά πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο. Ένα παράδειγμα που θα μπορούσε να αναφερθεί, για να γίνει κατανοητή η αιώρηση, θα ήταν το να τοποθετήσουμε ένα μαγνητικό δίπολο εντός του μαγνητικού πεδίου ενός άλλου διπολικού μαγνήτη. Εάν ο προσανατολισμός γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε οι όμοιοι πόλοι να είναι ο ένας απέναντι στον άλλον, τότε θα δούμε πως θα κάνει την εμφάνισή της η δύναμη της απώθησης, που θα αναγκάσει τους μαγνήτες να αποφύγει ο ένας τον άλλο.

Όλοι οι μαγνήτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να προκληθεί ανύψωση μαγνητικής αιώρησης, όπως για παράδειγμα οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες, οι μόνιμοι, οι σιδηρομαγνήτες, οι ηλεκτρομαγνήτες και οι μαγνήτες επαγωγικών ρευμάτων στο εσωτερικό αγωγών.

Με τον ορισμό μίας μαγνητικής πίεσης, μπορεί να υπολογιστεί η ανύψωση. Για παράδειγμα, η πίεση ενός μαγνητικού πεδίου ενός υπεραγωγού, μπορεί να υπολογιστεί βάσει του παρακάτω τύπου:

$$P_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Όπου:

**$P_{mag}$**  = Δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας σε πασκάλ

**$B$**  = Μαγνητικό πεδίο πάνω από τον υπεραγωγό σε τέσλα

**$\mu_0$**  =  $4\pi * 10^{-7} \text{ N} * \text{A}^{-2}$  που αφορά την διαπερατότητα του κενού.

## 2.2. Η σταθερότητα

Χάρη στην θεώρηση του Earnshaw, αποδεικνύεται πως είναι αδύνατο για ένα στατικό σύστημα, να εμφανίσει σταθερή αιώρηση απέναντι στην βαρυτική δύναμη μόνο με την χρήση παραμαγνητικών υλικών.



Για παράδειγμα, εάν δημιουργήσουμε το πιο απλό παράδειγμα αιώρησης, που θα βασίζεται σε δύο απλά μαγνητικά δίπολα που θα απωθούν το ένα το άλλο, θα δούμε πως παρουσιάζει αστάθεια, αφού ο μαγνήτης που βρίσκεται στο επάνω μέρος μπορεί

να αναποδογυρίσει ή να ολισθήσει. Αυτό αποδεικνύει πως δεν μπορεί να επιτευχθεί σταθερότητα, με καμία διαμόρφωση μαγνητών.

Η σταθερότητα μπορεί να επιτευχθεί με την παρουσία υπεραγωγιμότητας, με την χρήση σερβομηχανισμών, με την χρήση συστημάτων που εμπεριέχουν ρεύματα Φούκο (Eddy Currents) ή με την χρήση διαμαγνητικών υλικών.

Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί, η δύναμη της αιώρησης να παρέχεται από την μαγνητική αιώρηση, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να παρέχεται σταθερότητα με μηχανική υποστήριξη και ένα μικρό φορτίο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ως ψευδοαιώρηση ή αλλιώς Pseudolevitation.

### **2.2.1. Δυναμική σταθερότητα**

Δυναμική σταθερότητα έχουμε όταν οποιαδήποτε κίνηση δόνησης που συμβαίνει μπορεί να αποσβεστεί από το σύστημα αιώρησης.

Ένα μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται ως «συντηρητικό πεδίο δύναμης», με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει ενσωματωμένη απόσβεση. Από την θεωρία στην πράξη παρατηρείται ότι τα περισσότερα σχήματα αιώρησης είναι αρνητικά αποσβενόμενα ή ασθενώς αποσβενόμενα. Αυτό συνεπάγεται καταστάσεις δόνησης, που εν τέλει μπορεί να οδηγήσουν το στοιχείο που αιωρείται σε εκτροπή από την σταθερή του περιοχή.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι, ώστε να επιτευχθεί απόσβεση της κίνησης. Παρακάτω καταγράφονται οι πιο συνηθισμένοι:

- Με αποσβεστήρες ρυθμιζόμενης μάζας επάνω στο στοιχείο που αιωρείται
- Με υποστήριξη εξωτερικής μηχανικής απόσβεσης (π.χ. αντίσταση αέρα, αποσβεστήρα ταλαντώσεων κ.α.)
- Με ηλεκτρομαγνήτες που ελέγχονται με ηλεκτρονικές μεθόδους
- Με απόσβεση ρεύματος Φούκο (πεδίο που επηρεάζει επαγωγικό μέταλλο).

### 2.2.2. Στατική σταθερότητα

Στατική σταθερότητα έχουμε όταν με οποιαδήποτε μικρή μετατόπιση, πέραν της σταθερής ισορροπίας, προκαλείται στο στοιχείο συνισταμένη δύναμη. Αυτή η δύναμη έχει την τάση να ωθεί το στοιχείο πίσω στο σημείο ισορροπίας.

Όπως είδαμε και παραπάνω, η θεώρηση του Earnshaw απέδειξε πως μόνο με την χρήση μακροσκοπικών, στατικών πεδίων δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί σταθερή αιώρηση. Σε όλα τα παραμαγνητικά στοιχεία δρουν δυνάμεις με διάφορους συνδυασμούς που περιλαμβάνουν βαρυτικά, μαγνητοστατικά και ηλεκτροστατικά πεδία. Χάρη στους συνδυασμούς αυτούς, το στοιχείο παρουσιάζει αστάθεια σε τουλάχιστον έναν από τους άξονές του, ενώ μπορεί να βρεθεί και σε ασταθή ισορροπία, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται όλοι οι άξονές του.

Είναι βέβαια αυξημένη η πιθανότητα για πετυχημένη αιώρηση, με την χρήση για παράδειγμα διαμαγνητικών υλικών ή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας. Τα διαμαγνητικά υλικά έχει αποδειχθεί πως παρουσιάζουν σταθερότητα σε έναν άξονα, ενώ υπό προϋποθέσεις μπορούν να είναι σταθερά και σε όλους τους υπόλοιπους άξονες. Τέλος, κάποια συστήματα χρησιμοποιούν απλούς ηλεκτρομαγνήτες με εναλασσόμενο ρεύμα, που έχουν την ιδιότητα να σταθεροποιούνται μόνοι τους.

### 2.3. Οι μέθοδοι αιώρησης

Για να επιτευχθεί αιώρηση και έλεγχος των αξόνων, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός ελκτικών πεδίων, απωστικών πεδίων, μόνιμων μαγνητών και ηλεκτρομαγνητών ή υπεραγωγών ή διαμαγνητών. Οι άξονες ισορροπίας είναι έξι στον αριθμό, ενώ πιο συγκεκριμένα αποτελούνται από βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή τρεις μεταφορικούς και τρεις περιστροφικούς.

Παίρνουμε σαν δεδομένο πως τουλάχιστον ένας σταθερός άξονας πρέπει να είναι παρών, για να καταφέρει να αιωρηθεί με επιτυχία ένα σύστημα, κάτι που προκύπτει

από το θεώρημα του Earnshaw. Όμως, χάρη στην χρήση σιδηρομαγνητισμού και οι άλλοι άξονες μπορούν να σταθεροποιηθούν.

Στα τρένα μαγνητικής αιώρησης χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι, δηλαδή η ηλεκτροδυναμική αιώρηση (Electrodynamic Suspension / EDS) και η ηλεκτρομαγνητική αιώρηση που σταθεροποιείται με σερβομηχανισμό (Servo – stabilized Electromagnetic Suspension / EMS).

### 2.3.1. Η ψευδοαιώρηση

Το να επιτευχθεί ψευδοαιώρηση, θεωρείται απλή διαδικασία, χάρη στην ύπαρξη ενός μικρού μηχανικού περιορισμού που να προσδίδει σταθερότητα.

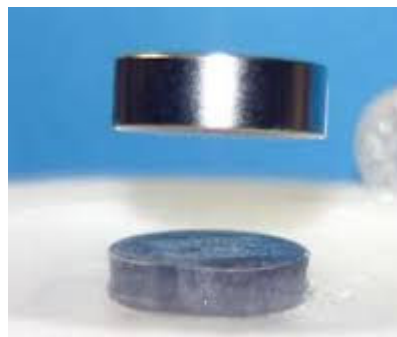
Εάν για παράδειγμα, δύο μαγνήτες περιοριστούν μηχανικά από έναν μοναδικό άξονα και τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να απωθούνται από το ισχυρό πεδίο, τότε θα επιτευχθεί το να αιωρηθεί ο ένας πάνω από τον άλλον.

Ένα άλλο παράδειγμα που μπορεί να αναφερθεί, είναι αυτό της έλξης των μαγνητών, που όμως περιορίζονται από το να ακουμπήσουν ο ένας τον άλλο με ένα αγώγιμο στοιχείο, όπως είναι για παράδειγμα μία χορδή ή ένα καλώδιο.

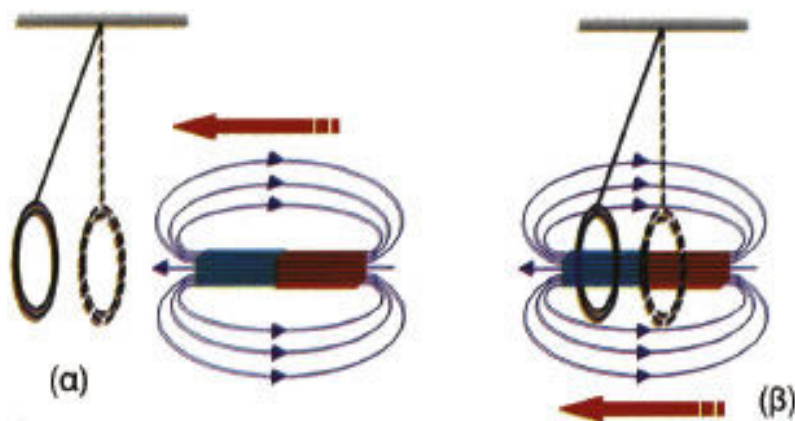
Τέλος, μπορούμε να αναφέρουμε το παράδειγμα φυγόκεντρου τύπου, όπου κάτω από έναν μαγνήτη έλξης αιωρείται ένας κύλινδρος, που έχει σταθεροποιηθεί χάρη στην ύπαρξη ενός ρουλεμάν.

### 2.3.2. Επαγωγικά ρεύματα

Είναι στοιχεία και σχήματα που λειτουργούν βάση της απόθησης, όπως περιγράφεται στον κανόνα του Λεντς. Όταν σε ένα μαγνητικό πεδίο, εμφανίζεται ένας αγωγός με χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά ρεύματα, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του αγωγού, ώστε να παράξει μαγνητικό πεδίο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί δύναμη απόθησης.



Αυτή η κατηγορία συστημάτων, παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό σταθερότητας, αν και είναι απαραίτητη η παρουσία επιπλέον απόσβεσης.



Εικόνα 20. Σχηματική παρουσίαση του κανόνα του Λεντς. (α) Αγωγός πριν να εισχωρήσει μαγνήτης (β) αγωγός μετά την εισχώρηση μαγνήτη

### Ταλαντούμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Εάν ρέει μέσα από έναν αγωγό εναλλασσόμενο ρεύμα, τότε ο ίδιος αγωγός μπορεί να ανυψωθεί πάνω από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Έτσι, ένας οποιοσδήποτε αγωγός συμπεριφέρεται σαν διαμαγνήτης, λόγω των δινορρευμάτων που δημιουργούνται στο εσωτερικό του. Τα δινορρεύματα με την σειρά τους έχουν την τάση να δημιουργούν τα δικά τους πεδία που λειτουργούν αντίθετα από το μαγνητικό πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται απώθηση του αγωγίμου αντικειμένου μακριά από τον ηλεκτρομαγνήτη, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου σταματούν να διεισδύουν στο αγωγίμο στοιχείο.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο απαιτεί πολύ αγωγίμα υλικά, όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο, ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται τα υλικά μη σιδηρομαγνητικής φύσεως. Αυτό συμβαίνει επειδή τα σιδηρομαγνητικά υλικά έλκονται ισχυρά στον ηλεκτρομαγνήτη, παρόλο που το πεδίο μπορεί ακόμη να απωθείται σε υψηλές συχνότητες. Τα υλικά αυτά επίσης, έχουν την τάση να προσφέρουν χαμηλότερο

επίπεδο δινορρευμάτων, λόγω της πιο υψηλής τους ειδικής αντιστάσεως. Σύμφωνα με την διαθέσιμη βιβλιογραφία, τα καλύτερα αποτελέσματα τα δίνουν τα καλώδια Λιτζ.

Το φαινόμενο αυτό είναι διαδεδομένο κυρίως στον κλάδο της διαφήμισης για διαφημιστικά τρικ, όπου παρατηρείται η αιώρηση ενός αντικειμένου, που μέσα του μπορεί να έχει κρυμμένο έναν δίσκο αλουμινίου.

Έχει παρατηρηθεί πως μικρές ποσότητες μετάλλων μπορούν να αιωρηθούν και να λιώσουν, με ισχύ μερικών KW (Κιλοβάτ) και σε υψηλές συχνότητες μερικών δεκάδων ΚΗ (Κιλοχέρτζ). Αυτό γίνεται με την τήξη αιώρησης ή αλλιώς Levitation Melting, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης των μετάλλων από το χωνευτήρι.

Ο γραμμικός επαγωγικός κινητήρας ή αλλιώς Linear Induction Motor, χρησιμοποιείται ως πηγή ταλαντούμενου μαγνητικού πεδίου, αφού μπορεί να δημιουργήσει καταστάσεις προώθησης και αιώρησης.

### **Σχετικότητα κίνησης μαγνητών και αγωγών**

Εάν κατασκευάσουμε μία βάση, από καλό ηλεκτρικό αγωγό, όπως είναι για παράδειγμα το αλουμίνιο, ο άργυρος και ο χαλκός, και την πλησιάσουμε σε έναν μαγνήτη, τότε θα παρατηρήσουμε να δημιουργείται στον αγωγό ένα δινορρευμα, που θα λειτουργεί απωθητικά με τον μαγνήτη, αφού παρουσιάζει αντίθετο πεδίο, σύμφωνα πάντα με τον κανόνα του Λεντς. Εάν λοιπόν δημιουργηθεί ένας υψηλός ρυθμός κίνησης, τότε είτε ένα αιωρούμενο μέταλλο θα μπορέσει να ανυψώσει τον μαγνήτη, είτε ένας αιωρούμενος μαγνήτης θα μπορέσει να ανυψώσει το μέταλλο. Τα καλώδια Λιτζ, ή αλλιώς Litz Wires, παρασκευάζονται από καλώδια τόσο λεπτά, που βρίσκονται κάτω από το επιδερμικό βάθος, με αποτέλεσμα οι συχνότητες του μετάλλου να είναι αποτελεσματικότερες από τις συχνότητες των στερεών αγωγών.

Ένα παράδειγμα χρήσης αυτής της τεχνολογικής περίπτωσης, είναι η διάταξη Χάλμπακ ή αλλιώς Halbach, που έχει την δυνατότητα να διπλασιάζει την ένταση του πεδίου, ενώ ταυτόχρονα μπορεί και να διπλασιάζει την ένταση που παρατηρείται στα δινορρεύματα. Αυτό έχει ως τελικό αποτέλεσμα, τον τριπλασιασμό της δύναμης

αιώρησης, ενώ έχει παρατηρηθεί πως με την χρησιμοποίηση δύο διατάξεων τύπου Χάλμπακ, η ένταση του πεδίου αυξάνεται σε ακόμη πιο υψηλά επίπεδα.

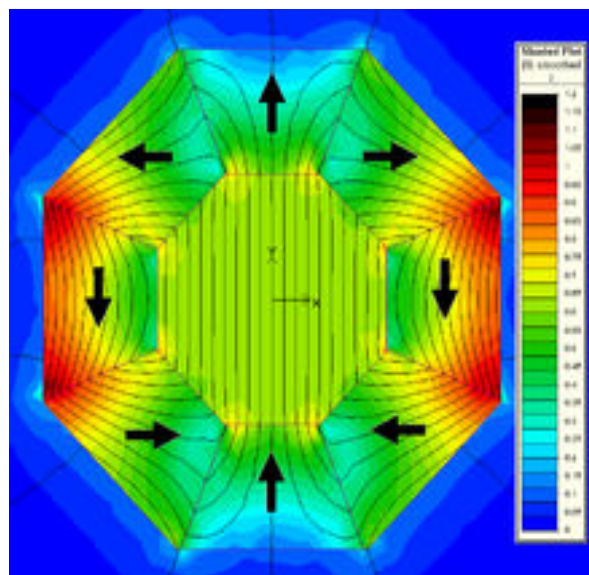
Η διάταξη Χάλμπακ είναι κατάλληλη σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές που συμπεριλαμβάνουν την μαγνητική αιώρηση, όπως για παράδειγμα την σταθεροποίηση των αξόνων των ηλεκτρικών κινητήρων, των γεννητριών και των γυροσκοπίων.

### 2.3.3. Οι σερβομηχανισμοί

Σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής, όταν έχουμε έναν μαγνήτη σταθερής δύναμης, τότε παρατηρούμε πως η δύναμη της έλξης του αυξάνεται σε μικρές αποστάσεις και μειώνεται όσο η απόσταση αυξάνεται. Αυτό προκαλεί

αστάθεια σε ένα σύστημα. Για να σταθεροποιηθεί το σύστημα αυτό, θα πρέπει να συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή οι διακυμάνσεις από την σταθερή θέση να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο, ώστε το στοιχείο να επιστρέφει στην επιθυμητή θέση.

Για να επιτευχθεί η σταθερότητα της μαγνητικής αιώρησης, είναι αναγκαίο να γίνονται δύο πράγματα: Αρχικά, να μετράται η ταχύτητα και η θέση του στοιχείου που αιωρείται και κατά δεύτερον, να χρησιμοποιείται ένας βρόχος ανάδρασης ή αλλιώς ένας Feedback Loop. Αυτός θα ρυθμίζει τους ηλεκτρομαγνήτες, ώστε να επαναφέρουν και να διορθώνουν την κίνηση του στοιχείου. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται «σερβομηχανισμός».







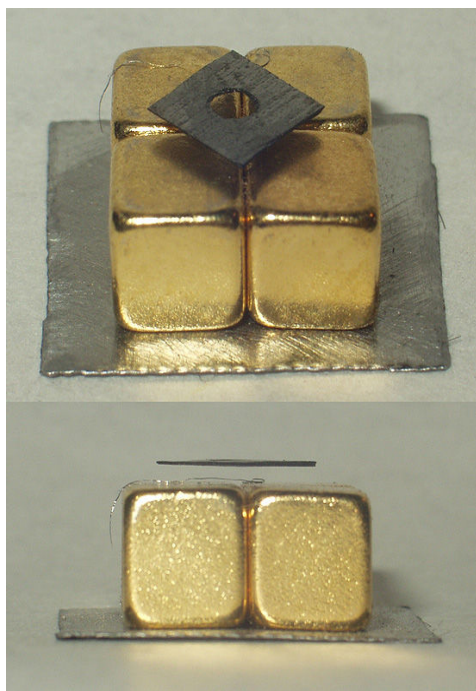
**Εικόνα 21. Το Γερμανικό σύστημα Transrapid χρησιμοποιεί σερβομηχανισμούς, ώστε να προκαλέσει αιώρηση του τρένου και να διατηρήσει σταθερό κενό, την ώρα που το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα**

Η βαρύτητα προσφέρει μία έμφυτη πλευρική σταθερότητα, γι' αυτό πολλά συστήματα χρησιμοποιούν την μαγνητική έλξη για να δώσουν ώθηση αντίθετη προς την δύναμη της βαρύτητας. Άλλα συστήματα, χρησιμοποιούν ταυτόχρονες δυνάμεις άπωσης και μαγνητικής έλξης, ώστε να επιτύχουν την ώθηση προς τα πάνω.

Τα συστήματα που περιγράφηκαν, ανήκουν στην κατηγορία των EMS, δηλαδή της ηλεκτρομαγνητικής αιώρησης με την χρήση σερβομηχανισμού. Ένα παράδειγμα που μπορούμε να αναφέρουμε, είναι αυτό που πραγματοποιείται στις επιδείξεις αιώρησης, όπου ένα στοιχείο αποκόπτει μία δέσμη φωτός, ώστε να δείξει την θέση του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο ηλεκτρομαγνήτης βρίσκεται πάνω από το στοιχείο που αιωρείται και απενεργοποιείται όταν το στοιχείο πλησιάζει και ενεργοποιείται όταν το στοιχείο απομακρύνεται. Αυτό το παράδειγμα δείχνει την βασική ιδέα, παρόλο που υπάρχουν συστήματα πολύ πιο δυνατά και αποτελεσματικά.

Τα τρένα με τεχνολογία μαγνητικής αιώρησης ή αλλιώς Magnetic Levitation Trains, λειτουργούν με βάση αυτό το είδος αιώρησης. Το τρένο περιβάλλει την ράγα και ωθείται από κάτω προς τα πάνω. Ο έλεγχος της ασφαλούς διατήρησης μίας σταθερής

απόστασης του τρένου από την ράγα, επιτυγχάνεται με την παρουσία του σερβομηχανισμού.



#### 2.3.4. Σταθεροποιημένη διαμαγνητική αιώρηση

Γνωρίζουμε πως η θεωρία του Earnshaw δεν έχει αντίκρισμα στους διαμαγνήτες. Οι διαμαγνήτες παρουσιάζουν αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα, αφού η σχετική τους μαγνητική διαπερατότητα, που συμβολίζεται ως  $\mu_r$ , είναι μικρότερη της μονάδας. Άρα, καταλήγουμε στο ότι οι διαμαγνήτες συμπεριφέρονται αντίθετα από τους κανονικούς μαγνήτες. Έτσι, η διαμαγνητική αιώρηση χαρακτηρίζεται από τους φυσικούς ως «εγγενώς σταθερή».

Ο μόνιμος μαγνήτης αιωρείται σταθερά, χάρη στην παρουσία διαφόρων συνδυασμών ισχυρών διαμαγνητών και μόνιμων μαγνητών. Ο μόνιμος μαγνήτης μπορεί να αιωρηθεί και να σταθεροποιηθεί πανεύκολα, όταν χρησιμοποιούνται ισχυροί υπεραγώγιμοι μαγνήτες.

#### 2.3.5. Διαμαγνητική αιώρηση

Όταν σε ένα στοιχείο προκαλείται η δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου, που είναι αντίθετο από το μαγνητικό πεδίο που του εφαρμόζεται εξωτερικά, τότε το στοιχείο αυτό απωθείται εξαιτίας των αντιθέσεων των δυνάμεων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διαμαγνητισμός. Τα διαμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες, όπως το ότι μπορούν να προκαλέσουν καμπύλωση προς τα έξω των γραμμών της μαγνητικής ροής. Η μαγνητική διπολική ροπή αλλάζει, εξαιτίας του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, αφού μεταβάλλεται η τροχιακή ταχύτητα των ηλεκτρονίων, που βρίσκονται στο εσωτερικό του στοιχείου.

Οι διαμαγνήτες παρουσιάζουν μαγνητική διαπερατότητα μικρότερη του  $\mu_0$ . Με πιο απλά λόγια, έχουμε το φαινόμενο του διαμαγνητισμού σε ένα στοιχείο, μόνο όταν του εφαρμοστεί ένα ισχυρό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το σύστημα που βασίζεται σε αυτήν την αρχή χαρακτηρίζεται από την αστάθειά του, παρόλο που οι υπεραγωγοί που χρησιμοποιούνται, είναι αρκετά ισχυροί στις μαγνητικές τους ιδιότητες.

### **Άμεση διαμαγνητική αιώρηση**

Μία διαμαγνητική ουσία παρουσιάζει αποθητικές δυνάμεις απέναντι στα μαγνητικά πεδία. Όλα τα υλικά διαθέτουν διαμαγνητικές ιδιότητες, αλλά η επίδραση που καταγράφεται είναι πολύ ασθενής. Αυτή η επίδραση τις περισσότερες φορές υπερνικάται από τις αντίθετα δρώντες σιδηρομαγνητικές ή παραμαγνητικές ιδιότητες του στοιχείου. Οποιοδήποτε υλικό παρουσιάζει ισχυρότερη διαμαγνητική συνιστώσα, τότε είναι λογικό να απωθείται από τους μαγνήτες.

Χάρη στην διαμαγνητική αιώρηση, μπορούν να ανυψωθούν πολύ ελαφριά κομμάτια βισμούθιου ή πυρολυτικού μαγνήτη, πάνω από έναν μετρίως ισχυρό μόνιμο μαγνήτη. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί για να αιωρηθούν σταγονίδια νερού, εξαιτίας των διαμαγνητικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ύδατος, ενώ έχει επιτευχθεί και αιώρηση ζωντανών πλασμάτων, όπως οι ακρίδες, τα ποντίκια και οι βάτραχοι. Για να πραγματοποιηθεί τέτοιου είδους αιώρηση, απαιτούνται ισχυρότατα μαγνητικά πεδία, που ξεπερνούν τα 16 τέρσλα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημαντικά προβλήματα με τα σιδηρομαγνητικά υλικά που βρίσκονται εντός εμβέλειας του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 22. Αιώρηση βατράχου στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς, με την χρησιμοποίηση μαγνητικού πεδίου της τάξεως των 16 τέσλα

Το ελάχιστο όριο για να επιτευχθεί διαμαγνητική αιώρηση δίνεται από τον τύπο:

$$B \frac{dB}{dz} = \mu_0 \rho \frac{g}{\chi}$$

Όπου:

$B$  = Μαγνητικό πεδίο

= Ρυθμός μεταβολής μαγνητικού πεδίου στον κάθετο άξονα

$\mu_0$  = Διαπερατότητα ελεύθερου χώρου

$\rho$  = Πυκνότητα υλικού

$g$  = Τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας ( $-9,8 \text{ m/s}^2$  της Γης)

$\chi$  = Μαγνητική επιδεκτικότητα

Εάν υποθέσουμε πως οι συνθήκες είναι οι ιδανικότερες στην κατεύθυνση  $Z$  του σωληνοειδούς μαγνήτη έχουμε:

- Αιώρηση νερού στα:  $\approx 1400 \text{ T}^2 / \text{m}$
- Αιώρηση γραφίτη στα:  $B \approx 375 \text{ T}^2 / \text{m}$

### 2.3.6. Περιστροφική σταθεροποίηση

Εάν χρησιμοποιήσουμε έναν μαγνήτη ή μία συναρμολογημένη με τον ορθό τρόπο διάταξη μαγνητών με δαχτυλιοειδές πεδίο, μπορεί να επιτευχθεί σταθερή αιώρηση, ενάντια στις βαρυτικές δυνάμεις. Αυτό μπορεί να συμβεί με την γυροσκοπική σταθεροποίηση και αγκύρωση σε ένα δεύτερο δαχτυλιοειδές πεδίο, που θα έχει δημιουργηθεί από μία βάση με μαγνήτες.

Το φαινόμενο ανακάλυψε πρώτος ένας εφευρέτης από το Βέρμοντ, ο Roy Harrigan, που κατοχύρωσε το 1983 μία συσκευή αιώρησης που βασιζόταν στην παραπάνω παρατήρηση. Χάρη στην ύπαρξη αυτής της ευρεσιτεχνίας, εμφανίστηκαν πολλές συσκευές που χρησιμοποιούσαν την περιστροφική σταθεροποίηση, όπως για παράδειγμα το παιχνίδι ανύψωσης της σβούρας, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Levitron.



Εικόνα 23. Το παιχνίδι ανύψωσης της εταιρείας Levitron

Παρόμοιες συσκευές χρησιμοποιούνται σε πειραματικά εργαστήρια πανεπιστημίων, όπου κατασκευάζονται και υπερβολικά ισχυροί μαγνήτες που δεν θα ήταν ασφαλείς για δημόσια αλληλεπίδραση.



Εικόνα 24. Νέες συσκευές που χρησιμοποιούν την μαγνητική τεχνολογία ανύψωσης και την περιστροφική σταθεροποίηση

### 2.3.7. Οι υπεραγωγοί

Οι υπεραγωγοί είναι ουσιαστικά «τέλειοι διαμαγνήτες», αφού απωθούν πλήρως τα πεδία μαγνητισμού, όταν αρχίζει να σχηματίζεται υπεραγωγιμότητα, βάσει του φαινομένου Μάισνερ. Η υπεραγωγίμη αιώρηση με απλά λόγια, μπορούμε να πούμε πως είναι μία άλλη μορφή διαμαγνητικής αιώρησης. Εάν χρησιμοποιήσουμε έναν υπεραγωγό τύπου II, τότε έχουμε σταθεροποίηση του μαγνήτη σε υψηλό επίπεδο, εξαιτίας της αγκύρωσης ροής που παρατηρείται στο εσωτερικό του υπεραγωγού. Έτσι, ακόμη και αν το αιωρούμενο σύστημα αντιστρεφόταν, η μετακίνηση του υπεραγωγού προς το πεδίο μαγνητισμού θα σταματούσε.

Οι αρχές αυτές αξιοποιούνται κυρίως από τα ρουλεμάν (υπεραγωγίμα μαγνητικά έδρανα), τους σφονδύλους (Flywheels) και από την τεχνολογία ηλεκτροδυναμικής αιώρησης EDS (Electrodynamic Suspension).

Φυσικά για να επιτευχθεί η αιώρηση ενός τρένου, που αποτελεί και θέμα της εργασίας μας, απαιτείται η παρουσία ενός πολύ ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Αξίζει να αναφερθεί πως τα τρένα τύπου JR- Maglev, έχουν υπεραγώγιμα μαγνητικά πηνία, αλλά δεν αιωρούνται εξαιτίας του φαινομένου Μάισνερ.

### **2.3.8. Ισχυρή εστίαση**

Αυστηρά μόνο σε στατικά πεδία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεώρηση του Earnshaw. Το φαινόμενο της αιώρησης, μπορεί να επιτευχθεί μέσα σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία και σε καθαρά εναλλασσόμενα ελκτικά πεδία, αφού επάγεται σταθερότητα και υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού της τροχιάς, μέσω του μαγνητικού πεδίου.

Η περίπτωση αυτή έχει προταθεί για μελλοντική χρήση σε τρένα μαγνητικής αιώρησης, ενώ χρησιμοποιείται ήδη στους επιταχυντές σωματιδίων, ώστε να ανυψωθούν και να περιοριστούν τα φορτισμένα σωματίδια.

## **2.4. Χρήσεις**

### **2.4.1. Τήξη μέσω αιώρησης**

Το 1923 κατοχυρώθηκε από τον Muck, η ηλεκτρομαγνητική αιώρηση ή αλλιώς EML (Electromagnetic Levitation). Θεωρείται ως μία από τις παλαιότερες τεχνικές αιώρησης για πειραματικούς σκοπούς. Η τεχνική βασίζεται στην χρησιμοποίηση ηλεκτρομαγνητών, ώστε να ενεργοποιηθεί το φαινόμενο της αιώρησης.

Το σύστημα αποτελείται από ένα τυπικό πηνίο τεχνολογίας EML με ανεστραμμένη περιέλιξη, που παίρνει συνεχόμενη ενέργεια από μία «παραδοχή ραδιοσυχνότητας».

### **2.4.2. Μεταφορές**



Χάρη στην μαγνητική αιώρηση, εμφανίστηκε η τεχνολογία «μαγνητικής αιώρησης οχημάτων τύπου Maglev» ή αλλιώς Magnetic Levitation. Χάρη σε αυτό το σύστημα μεταφορών τα οχήματα, και ειδικά τα τρένα, μπορούν να αιωρούνται και να προωθούνται με την χρήση μαγνητικών πεδίων. Με την μέθοδο αυτή, οι μεταφορές γίνονται πιο ήσυχες, πιο γρήγορες και πιο ομαλές, σε σχέση με τα συμβατικά μέσα μαζικής μεταφοράς με τροχούς.

Χάρη στην ύπαρξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας, η ταχύτητα ενός στοιχείου μπορεί να ξεπεράσει τα 6.400 χιλιόμετρα την ώρα, μέσα σε μία σύραγγα κενού. Εάν όμως δεν χρησιμοποιηθεί σε κενό, τότε το μεγαλύτερο ποσοστό της απαιτούμενης δύναμης για να επιτευχθεί ανύψωση, χρησιμοποιείται ώστε να ξεπεραστούν οι αντιστάσεις του αέρα.

Τα υψηλής τεχνολογίας οχήματα Hyperloop, άρχισαν να αναπτύσσονται το 2015 και έκαναν τις πρώτες τους δοκιμές σε κενό, τους τελευταίους μήνες του 2016.



**Εικόνα 25. Τρένο τεχνολογίας Hyperloop**

Η υψηλότερη ταχύτητα που καταγράφηκε ποτέ, ήταν τα 603 χιλιόμετρα την ώρα που επιτεύχθηκε στις 21 Απριλίου του 2015 στην Ιαπωνία, από ένα τρένο μαγνητικής αιώρησης τελευταίας τεχνολογίας. Η ταχύτητα αυτή ξεπέρασε κατά 28.2 χιλιόμετρα την υψηλότερη ταχύτητα που είχε καταγραφεί ποτέ από ένα συμβατικό τρένο TGV.





Εικόνα 26. Ένα από τα γνωστότερα και πιο γρήγορα τρένα του πλανήτη είναι το Γαλλικό TGV. Ακόμη και αυτό όμως, δεν μπόρεσε να συναγωνιστεί την ταχύτητα ενός τρένου μαγνητικής αιώρησης

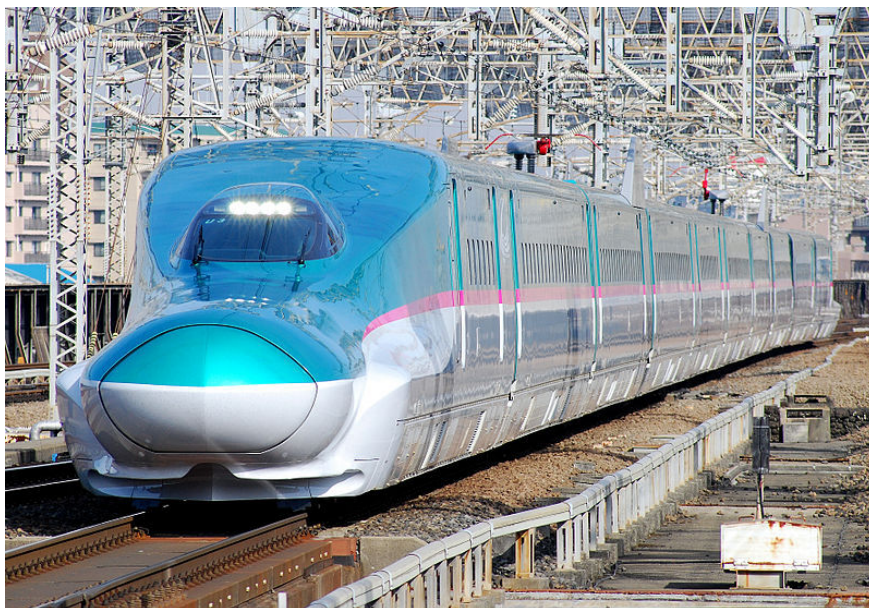
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ – ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ SHINKANSEN

### 3.1. Το σιδηροδρομικό δίκτυο

Το σιδηροδρομικό δίκτυο Shinkansen της Ιαπωνίας, αποτελείται από γραμμές υψηλής ταχύτητας, που ανήκουν στις εθνικές Ιαπωνικές σιδηροδρομικές υπηρεσίες, ή αλλιώς Japan Railways. Το δίκτυο άρχισε να κατασκευάζεται το 1964, από την περιοχή του Τοκαϊντο Σινκανσέν και επεκτάθηκε ώστε να ενώσει τις μεγαλύτερες πόλεις μεταξύ των νήσων Κιούσου και Χονσού. Το περιβάλλον θεωρείται ανθεκτικό σε τυφώνες και σεισμούς, ενώ οι ταχύτητες διαδρομής μπορούν να φτάσουν τα 300 χιλιόμετρα την ώρα. Σε δοκιμές επιτεύχθηκαν 443 χιλιόμετρα την ώρα για τα συμβατικά τρένα και 580 χιλιόμετρα την ώρα για τα τρένα Maglev – μαγνητικής αιώρησης.

Η λέξη Σινκανσέν, μεταφράζεται ως «η νέα βασική γραμμή», και αφορά τις σιδηροδρομικές γραμμές, ενώ τα τρένα της συγκεκριμένης γραμμής ονομάζονται «υπερ – εξπρές». Οι σιδηροδρομικές γραμμές του Σινκανσέν θεωρούνται κανονικές,

αφού έχουν κατασκευαστεί κοιλαδογέφυρες και σήραγγες ώστε να τρένα να διασχίζουν τα εμπόδια και να μην χρειάζεται να τα παρακάμπτουν.



Εικόνα 27. Οι γραμμές του Σινκανσέν φιλοξενούν συμβατικούς και μαγνητικής αιώρησης συρμούς. Στην εικόνα, ένα από τα τρένα "Υπερ - Εξπρές"

### 3.2. Η ιστορία του σιδηροδρομικού δικτύου

Στην Ιαπωνία για πρώτη φορά, δημιουργήθηκαν σιδηροδρομικές γραμμές προορισμένες για μεταφορές επιβατών με υψηλές ταχύτητες. Είναι γεγονός πως οι ράγες της χώρας αυτής, ανήκαν στις γραμμές στενού εύρους, δηλαδή της τάξεως των 1,067 mm, λόγω της ορεινής φύσεως του εδάφους της. Οι γραμμές αυτές δεν ήταν ευθείες, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ταξίδια με σχετικά μεγάλη ταχύτητα. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη να φτιαχθεί ένα νέο δίκτυο με σιδηροδρομικές γραμμές υψηλών ταχυτήτων, παρόλο που σε άλλες χώρες του πλανήτη, οι σιδηροδρομικές τους γραμμές είχαν μεγαλύτερα περιθώρια εξέλιξης και αναβάθμισης.

Κατά την δεκαετία του 1930, άρχισε να γίνεται εμφανής η ανάγκη ανάπτυξης του σιδηροδρομικού δικτύου της Ιαπωνίας. Μάλιστα οι Δυτικοί, όταν αναφέρονταν στο συγκεκριμένο έργο, το έκαναν χρησιμοποιώντας τον όρο «τρένα – σφαίρες», σε μία μετάφραση του Ιαπωνικού όρου «Dangan Ressha». Αυτή η ονομασία δόθηκε

εξαιτίας των τρένων που χρησιμοποιούσαν τις γραμμές του Σινκανσέν, που κινούνταν με υψηλή ταχύτητα και είχαν έντονο, αεροδυναμικό σχήμα, που θύμιζε σφαίρες.

Το 1940 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η ονομασία «Σινκανσέν», για την μεικτή γραμμή μεταξύ Σιμονοσέκι – Τόκυο, τόσο με ηλεκτρική, όσο και με ατμήλατη έλξη, ενώ η μέγιστη ταχύτητα μπορούσε να φτάσει τα 200 χιλιόμετρα την ώρα, που αποτελούσε την διπλάσια ταχύτητα σε σχέση με την ταχύτητα το πιο γρήγορου Ιαπωνικού τρένου εκείνης της εποχής. Όταν μιλάμε για μεικτή γραμμή, εννοούμε την ταυτόχρονη εμπορική και επιβατική κυκλοφορία των τρένων. Στα επόμενα τρία χρόνια, το Ιαπωνικό Υπουργείο Μεταφορών, ανέπτυξε ακόμη πιο μεγάλα σχέδια, που αφορούσαν την περαιτέρω επέκταση των σιδηροδρομικών γραμμών. Αυτά τα σχέδια περιελάμβαναν γραμμή προς την Σιγκαπούρη και το Πεκίνο, μέσω σήραγγας προς την Κορέα, καθώς και συνδέσεις με τον Υπερσιβηρικό και κάποιες βασικές αρτηρίες της υπόλοιπης Ασίας.

Το 1943, τα παραπάνω σχέδια εγκαταλείφθηκαν, λόγω της στρατιωτικής παρουσίας της Ιαπωνίας στον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Βέβαια, κάποια από τα έργα είχαν ξεκινήσει να πραγματοποιούνται, με αποτέλεσμα πολλές από τις σήραγγες του σημερινού Σινκανσέν, να αποτελούν έργα πριν την συμμετοχή της Ιαπωνίας στον πόλεμο.

Όταν η Ιαπωνία ηττήθηκε το 1945, το σιδηροδρομικό δίκτυο υψηλών ταχυτήτων έπρεπε να ξεχαστεί για ορισμένα χρόνια. Στα μέσα της δεκαετίας του 1950 όμως, η κυριώς χρησιμοποιούμενη σιδηροδρομική γραμμή Τοκάιντο, έφτασε στο μέγιστο όριο επιβατικής δυναμικότητάς της, με αποτέλεσμα το σχέδιο Σινκανσέν να ενεργοποιηθεί ξανά. Το 1958, η Ιαπωνική κυβέρνηση ενέκρινε το σχέδιο, με αποτέλεσμα το 1959 να ξεκινήσουν τα έργα κατασκευής του πρώτου κομματιού της γραμμής Τοκάιντο Σινκανσέν, μεταξύ της Οσάκα και του Τόκυο. Η Παγκόσμια Τράπεζα βοήθησε σημαντικά στην υλοποίηση της κατασκευής, αφού χορήγησε δάνειο ύψους 80 εκατομμυρίων δολλαρίων. Το 1962 στην Ονταουάρα, άνοιξε μία πρώτη εγκατάσταση δοκιμών τρένων, που αργότερα ενσωματώθηκε με την υπόλοιπη γραμμή του δικτύου. Το Σινκανσέν άνοιξε επίσημα την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου του 1964, με αποτέλεσμα να προλάβει τους Ολυμπιακούς Αγώνες που πραγματοποιήθηκαν στο Τόκυο. Η επιτυχία του ήταν τεράστια, αφού μέσα σε τρία χρόνια φιλοξένησε 100

εκατομμύρια επιβάτες, ενώ μέχρι το 1976, είχαν χρησιμοποιήσει τους συρμούς ένα δισεκατομμύριο επιβάτες. Στην περιοχή της Οσάκα, η Expro '70 είχε 16άδυμους συρμούς.



Εικόνα 28. Τρένο - σφαίρα των γραμμών Σινκανσέν στο Βρετανικό σιδηροδρομικό μουσείο της Νέας Υόρκης

Τα πρώτα τρένα Σινκανσέν, έφταναν τα 200 χιλιόμετρα την ώρα, αν και αργότερα η ταχύτητά τους αυξήθηκε στα 220 χιλιόμετρα. Τα τρένα έμειναν στην ιστορία των μεταφορών, λόγω του σχήματός τους που θύμιζε σφαίρα, ενώ πολλά από αυτά παραμένουν σε κυκλοφορία ακόμη και στις μέρες μας. Ένα από τα πρώτα τρένα Σινκανσέν, βρίσκεται στην Νέα Υόρκη και εκτίθεται στο Βρετανικό Εθνικό Σιδηροδρομικό Μουσείο.

### 3.3. Επέκταση του σιδηροδρομικού δικτύου

Το 1975 και λόγω της μεγάλης επιτυχίας της γραμμής έγινε επέκταση με την ονομασία «Σάννιο Σινκανσέν» στην περιοχή της Φουκουόκα και της Χιροσίμα. Εκείνη την εποχή, πρωθυπουργός της Ιαπωνίας ήταν ο Κακουέι Τανάκα, που δήλωνε φανατικός υποστηρικτής της γραμμής Σινκανσέν, με αποτέλεσμα η κυβέρνησή του να προτείνει ένα εκτεταμένο σιδηροδρομικό δίκτυο, με γραμμές παράλληλες προς τις

περισσότερες προϋπάρχουσες γραμμές της Ιαπωνίας. Βάσει αυτού του σχεδίου κατασκευάστηκαν δύο νέες γραμμές και πιο συγκεκριμένα η Τζοέτσου Σινκανσέν και η Τοχόκου Σινκανσέν. Παρόλα αυτά, η κατασκευή άλλων γραμμών ακυρώθηκε ή αναβλήθηκε λόγω των χρεών του Εθνικού Σιδηροδρόμου που ολοένα και αυξανόταν, εξαιτίας του υψηλού κόστους κατασκευής του δικτύου υψηλών ταχυτήτων Σινκανσέν. Στις αρχές του 1980, είχε επέλθει χρεωκοπία στον Εθνικό Σιδηρόδρομο της Ιαπωνίας, κάτι που οδήγησε στην ιδιωτικοποίησή του το 1987.

Η ανάπτυξη βέβαια του δικτύου Σινκανσέν συνεχιζόταν, παρά τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι, τα επόμενα υπήρξε εισαγωγή νεωτερισμών και νέων τρένων, που ακολούθησαν την πρώτη σειρά, αλλά είχαν την δική τους ιδιαίτερη εμφάνιση. Στις μέρες μας, οι Ιαπωνικοί συρμοί φτάνουν την ταχύτητα των 300 χιλιομέτρων την ώρα κατά την κανονική τους λειτουργία, με αποτέλεσμα να κατατάσσονται μεταξύ των γρηγορότερων τρένων του πλανήτη, μαζί με το TGV της Γαλλίας, το AVE της Ισπανίας, το TAV της Ιταλίας, το KTX της Νοτίου Κορέας και το ICE της Γερμανίας.

Αξίζει να αναφερθεί πως από την δεκαετία του '70, εξελίσσεται η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης, ώστε να ολοκληρωθεί το σχέδιο «Τσούο Σινκανσέν», που αφορά την σύνδεση της Οσάκα με το Τόκιο με την χρησιμοποίηση τρένων Maglev. Μάλιστα, στις 2 Δεκεμβρίου 2003, είχαμε παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας συρμού στα 581 χιλιόμετρα την ώρα, από ένα τρένο της νέας αυτής τεχνολογίας.





Εικόνα 29. Το τρένο Maglev μοντέλου JR MLX - 01

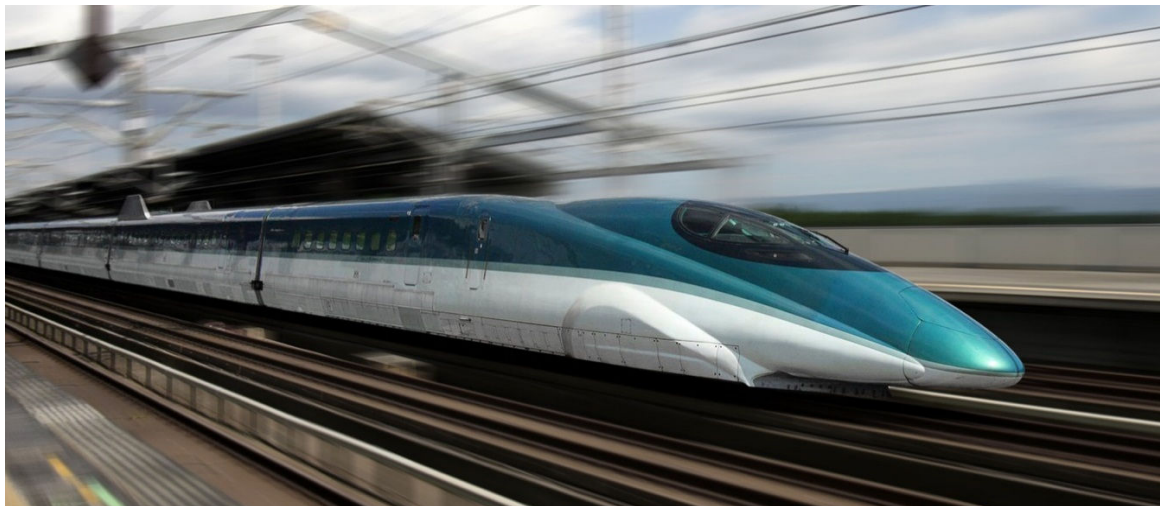
Το 1997, ο μέσος χρόνος άφιξης των συρμών Σινκανσέν ήταν εντός 0,3 λεπτών ή αλλιώς εντός 18 δευτερολέπτων από τον προγραμματισμένο χρόνο άφιξης. Το 2003, οι νέες μετρήσεις έδειξαν μείωση του παραπάνω χρόνου στα 0,1 λεπτά ή αλλιώς στα 6 δευτερόλεπτα. Το 2004, η Ιαπωνία προχώρησε σε εορτασμούς για τα σαράντα χρόνια λειτουργίας των γραμμών υψηλής ταχύτητας, ενώ μόνο με την γραμμή Τοκάιντο Σινκανσέν, είχαν μεταφερθεί μέχρι εκείνη την χρονική περίοδο 4,16 δισεκατομμύρια επιβάτες.

### 3.4. Ασφάλεια του δικτύου

Στα χρόνια λειτουργίας του Σινκανσέν, δεν υπήρξε αναφορά για θανατηφόρα ατυχήματα επιβατών. Βέβαια, έχουν καταγραφεί τραυματισμοί επιβατών λόγω της πολυκοσμίας κατά την είσοδό τους στα βαγόνια, αλλά υπάρχουν συνοδοί που σε

καθημερινή βάση επιλύουν τα προβλήματα κλεισίματος των θυρών, πρωτού τα τρένα ξεκινήσουν το ταξίδι τους.

Έχουν υπάρξει βέβαια αυτοκτονίες επιβατών, που πηδούσαν μπροστά από τους συρμούς κατά την είσοδό τους στους σταθμούς. Αυτά τα συμβάντα οδήγησαν στην εγκατάσταση φραγμάτων ασφαλείας, ώστε οι επιβάτες να μην μπορούν να αυτοτραυματιστούν, αν και στις 9 Ιανουαρίου του 1999 στον σταθμό Σακουντάιρα, ένας άνδρας σκαρφάλωσε πάνω από τα φράγματα ασφαλείας και συγκρούστηκε με διερχόμενο τρένο. Το συμβάν αυτό απέδειξε πως όταν ένας άνθρωπος είναι αποφασισμένος να αφαιρέσει την ζωή του, θα το κάνει ακόμη και με την παρουσία φραγμάτων ασφαλείας.



**Εικόνα 30. Τα νέα τρένα FASTECH 360, θα προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη ασφάλεια στους επιβάτες τους**

Ένας σημαντικός εκτροχιασμός τρένου Σινκανσέν, έλαβε χώρα στις 23 Οκτωβρίου του 2004 εξαιτίας σεισμού, που οδήγησε 8 από τα 10 βαγόνια της αμαξοστοιχίας Τόκι 325 να εκτροχιαστούν, στην περιοχή της Ναγκαόκα. Το ευτύχημα ήταν ότι μεταξύ των 154 επιβατών δεν αναφέρθηκαν θάνατοι ή ακόμη και τραυματισμοί. Το συμβάν οδήγησε στην ανάπτυξη συστήματος ανίχνευσης σεισμού, που θα φέρει την αμαξοστοιχία από υψηλή ταχύτητα σε πλήρη στάση. Μάλιστα, στα τρένα νέας γενιάς με την ονομασία FASTECH 360, θα εγκατασταθούν εκτεινόμενα πτερύγια αεροδυναμικής πέδησης, που θα επιτρέπουν την τάχιση ακινητοποίηση του συρμού, ανεξαρτήτως της ταχύτητάς του.

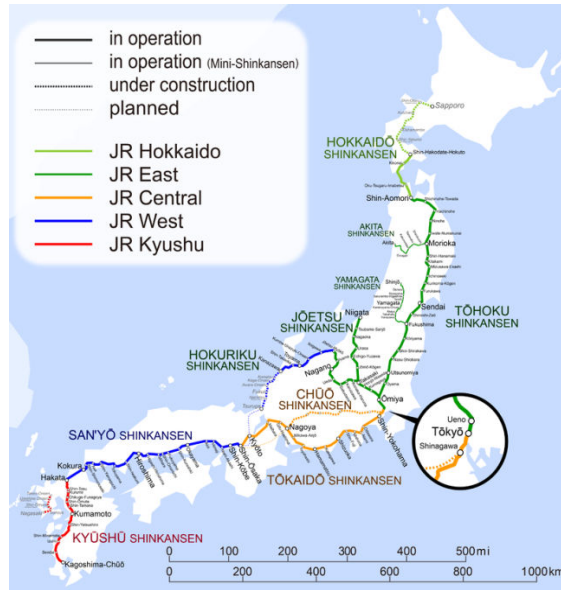
### 3.5. Γραμμές και μελλοντικά δεδομένα

Οι κύριες σιδηροδρομικές γραμμές του Ιαπωνικού δικτύου είναι:

- Η Τοκάιντο Σινκανσέν, με απόσταση τα 515,4 χιλιόμετρα
- Η Τοχόκου Σινκανσέν, με απόσταση τα 674,9 χιλιόμετρα
- Η Σάνυο Σινκανσέν, με απόσταση τα 553,7 χιλιόμετρα
- Η Χοκουρίκου Σινκανσέν, με απόσταση τα 117,4 χιλιόμετρα
- Η Τζοέτσου Σινκανσέν, με απόσταση τα 269,5 χιλιόμετρα
- Η Κιούσου Σινκανσέν, με απόσταση τα 256,8 χιλιόμετρα
- Η Ακίτα Σινκανσέν, με απόσταση τα 127,3 χιλιόμετρα
- Η Γιαναγκάτα Σινκανσέν, με απόσταση τα 148,6 χιλιόμετρα.

Παρακάτω, μπορούμε να δούμε υπό ποιας εταιρείας γίνεται η εκμετάλλευση της κάθε γραμμής:





**Εικόνα 31. Χάρτης του δικτύου Σινκανσέν: Αναλόγως του χρώματος της γραμμής, έχουμε και διαφορετική εταιρεία εκμετάλλευσης**

Ένα από τα βασικά προβλήματα της περαιτέρω ανάπτυξης του δικτύου και κατ' επέκταση των συρμών, είναι η ηχορύπανση, που αυξάνεται με την άνοδο της ταχύτητας. Αυτό οδήγησε στον σχεδιασμό των τρένων μαγνητικής αιώρησης, ώστε να μειωθεί ο θόρυβος των συρμών, ειδικά κατά την είσοδό τους σε σήραγγες, όπου έχουμε το φαινόμενο του «tunnel boom», αφού κατά την είσοδο του τρένου με υψηλή ταχύτητα σε έναν κλειστό χώρο, ακούγεται ένας δυνατός ήχος σαν έκρηξη. Τα τρένα FASTECH 360 βρίσκονται ακόμη υπό δοκιμή και γίνονται προσπάθειες, ώστε να μειωθεί ο θόρυβος που κάνουν κατά την κίνησή τους.



Εικόνα 32. Γραμμές ανά εταιρεία: Πάνω αριστερά - JR East, Πάνω δεξιά - JR Central, JR West, Κάτω - JR Kyushu

### 3.6. Τρένα υψηλής ταχύτητας έξω από την Ιαπωνία

Η τεχνολογία τύπου Σινκανσέν, έχει κάνει την εμφάνισή της και εκτός της Ιαπωνίας. Η Κίνα για παράδειγμα χρησιμοποιεί από το 2006, 60 ηλεκτροκίνητες οκτάδυμες αυτοκινητάμαξες που μπορούν να φτάσουν τα 200 χιλιόμετρα την ώρα και αποτελούν σχέδιο της κοινοπραξίας μεταξύ των εταιρειών Hitachi, Kawasaki Heavy Industries και Mitsubishi Electric Corporation.

Η Ταϊβάν έχει τον δικό της σιδηρόδρομο υψηλών ταχυτήτων, με συρμούς της σειράς 700T, που προέρχονται από την εταιρεία Kawasaki Heavy Industries.

Η Hitachi κατασκευάζει επίσης αυτοκινητάμαξες, όμοιες με αυτές που κυκλοφορούν στο δίκτυο του Σινκανσέν, ώστε να πραγματοποιηθεί σιδηροδρομική σύνδεση της Σύραγγας της Μάγχης, που θα προσφέρουν και στην Βρετανία ταξίδια υψηλών

ταχυτήτων. Άλλα δίκτυα υπάρχουν στην Γαλλία, την Ιταλία, την Γερμανία, την Νότια Κορέα και την Ισπανία, χωρίς ωστόσο την σημαντική συμμετοχή τρένων Maglev.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ – ΤΑ ΤΡΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ**

### **4.1. Γενικά για τα τρένα Maglev**

Τα τρένα μαγνητικής αιώρησης, ή αλλιώς τρένα Maglev, αποτελούν υπερσύγχρονα οχήματα μεταφοράς επιβατικού κοινού, που έχουν να παρουσιάσουν σαν βασικό τους χαρακτηριστικό την κίνηση με υψηλή ταχύτητα, που προσφέρει γρήγορες μεταφορές μεταξύ περιοχών, πόλεων ή και χωρών. Η ταχύτητά τους φτάνει εύκολα τα 400 με 500 χιλιόμετρα την ώρα, ενώ η κίνησή τους βασίζεται στην μαγνητική αιώρηση, δηλαδή την τεχνολογία ανύψωσης πάνω από τις γραμμές, με την βοήθεια ισχυρών μαγνητικών πεδίων.

Στις αρχές της δεκαετίας του '70 είχαμε την δοκιμή του Ιαπωνικού Maglev, που έκανε την πρώτη του πειραματική δοκιμή σε μία γραμμή μήκους επτά χιλιομέτρων στην περιοχή του Μιγιαζάκι και είχε καταφέρει να φτάσει την απίστευτη ταχύτητα των 517 χιλιομέτρων την ώρα.

Ένα από τα πρώτα Ευρωπαϊκά τρένα αυτής της τεχνολογίας, πέραν των Ιαπωνικών που είχαν κάνει επίσης την εμφάνισή τους, ήταν το τεχνολογίας Transrapid, που δοκιμάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 σε μια πειραματική διαδρομή μήκους 31,5 χιλιομέτρων στο Λατέν της Γερμανίας. Το 1989, το ίδιο τρένο είχε καταφέρει να φτάσει την ταχύτητα των 435 χιλιομέτρων την ώρα.



**Εικόνα 33. Το Γερμανικό επίτευγμα τρένου μαγνητικής αιώρησης, με τεχνολογία Transrapid.**

Μέχρι την ταχύτητα των 100 χιλιομέτρων την ώρα, το τρένο μαγνητικής αιώρησης χρησιμοποιεί συμβατικούς ελαστικούς τροχούς, ενώ εν συνεχεία και όσο η ταχύτητα αυξάνεται, τείνει να ανυψώνεται. Μελετώντας γενικά τις δύο χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, δηλαδή την Ιαπωνική και την Ευρωπαϊκή, θα καταλήγαμε στο συμπέρασμα πως παρόλο που ασχολούνται με το ίδιο φαινόμενο, εντούτοις παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές. Με την τεχνολογία Transrapid, απαιτείται συνεχόμενη ρύθμιση της σιδηροτροχιάς μέσω υπολογιστών, αφού το τρένο κινείται σε πολύ μικρή απόσταση από τις ράγες, με αποτέλεσμα να είναι αυξημένος ο κίνδυνος να συγκρουστεί με αυτές.





**Εικόνα 34. Η τεχνολογία Transrapid χαρακτηρίζεται από την μικρή της απόσταση μεταξύ τρένου και σιδηροτροχιάς, με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο ύπαρξης ατυχήματος**

Αντιθέτως, τα τρένα τεχνολογίας Maglev, ταξιδεύουν σε μεγαλύτερη απόσταση από την σιδηροτροχιά, εξαιτίας των πανίσχυρων υπεραγωγίων μαγνητών που εξασφαλίζουν πολύ ισχυρότερα μαγνητικά πεδία. Με αυτόν τον τρόπο αποκλείεται ο κίνδυνος σύγκρουσης, ενώ το ίδιο το τρένο δεν μπορεί να μετακινηθεί από την θέση του, ακόμη και σε περίπτωση σεισμού. Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως η τεχνολογία Maglev παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα, με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαίες οι συνεχόμενες ρυθμίσεις μέσω υπολογιστών. Λόγω όμως της παρουσίας των υπεραγωγίων μαγνητών εμφανίζεται πολύ πιο υψηλό κόστος λειτουργίας και κατασκευής. Επίσης, παρατηρείται αυξημένη μαγνητική ροή, που υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια, κάτι που μπορεί να οδηγήσει στο να επηρεαστούν ηλεκτρονικές συσκευές στο εσωτερικό του τρένου, αν η κατασκευή δεν είναι άψογη.

Σε γενικές γραμμές, τα τρένα μαγνητικής αιώρησης έχουν να επιδείξουν πολλά πλεονεκτήματα, σε σχέση με τα συμβατικά τρένα, αφού μπορούν να επιταχύνουν και

να φρενάρουν ταχύτερα, να αναπτύσσουν υψηλότερες ταχύτητες, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι χρόνοι των δρομολογίων, να λειτουργούν απροβλημάτιστα σε αντίξοες συνθήκες, όπως οι καταιγίδες, το χιόνι και ο παγετός και παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση στην κίνησή τους στις ανωφέρειες. Επίσης, είναι υπερπολυτελή για τους ταξιδιώτες και αθόρυβα, παρόλο που όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυξάνεται και η ηχορύπανση. Μεταξύ των άλλων, δεν ρυπαίνουν τις περιοχές όπου κινούνται, αφού χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια, σε σχέση με τα συμβατικά τρένα ή ακόμη και τα αεροπλάνα. Τα τρένα μαγνητικής αιώρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρές αποστάσεις, για να συνδέουν λιμάνια, αεροδρόμια, πόλεις κ.λπ. σε ταχύτητες μικρότερες των 100 χιλιομέτρων την ώρα. Μία τέτοια περίπτωση είναι το τρένο του Μπέρμινχαμ της Αγγλίας, που συνδέει το σταθμό με το αεροδρόμιο, από το 1984 μέχρι και στις μέρες μας.



**Εικόνα 35. Το τρένο μαγνητικής αιώρησης του Μπέρμινχαμ**

Παρόλα αυτά, από τα μέσα της δεκαετίας του '90 και μετά, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στα τρένα μαγνητικής αιώρησης, ώστε να καλύπτονται μεγαλύτερες αποστάσεις, με μεγαλύτερη ταχύτητα. Το 1994 για παράδειγμα, αποφασίστηκε η κατασκευή γραμμών μήκους 284 χιλιομέτρων, που θα επέτρεπαν την εισαγωγή μαγνητικού τρένου που θα εξυπηρετούσε την σύνδεση μεταξύ Βερολίνου και Αμβούργου. Πριν από μερικά χρόνια κατασκευάστηκε, 43 χιλιόμετρα δυτικά του Τόκιο, άλλη μία γραμμή που θα φιλοξενούσε τις δοκιμές για το πιο εξελιγμένο τρένο τύπου Maglev, και πιο συγκεκριμένα του μοντέλου FASTECH 360, που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά, ώστε να συνδέσει το Τόκιο με την Οσάκα. Μεγάλο είναι το παγκόσμιο ενδιαφέρον για τρένα τύπου Maglev, από χώρες που θέλουν να το

εισάγουν στις συγκοινωνίες τους, όπως για παράδειγμα οι Η.Π.Α. Από το 1994, προωθείται στην Ελβετία σχέδιο ανάπτυξης υπογείων μαγνητικών τρένων, κάτι που θα εξυπηρετούσε την συγκεκριμένη χώρα, λόγω της ορεινής της γεωμορφίας. Το σκεπτικό ήταν να μην επιβαρυνθεί το περιβάλλον από επίγειους ρύπους και κατασκευές, ενώ τα πρώτα σχέδια περιελάμβαναν την διάνοιξη διπλών σηραγγών μήκους εκατοντάδων μέτρων και διαμέτρου πέντε μέτρων που θα συνδέουν την Γενεύη με την Βασιλεία, την Μπελινζόν και το Σαιντ Γκάλεν.

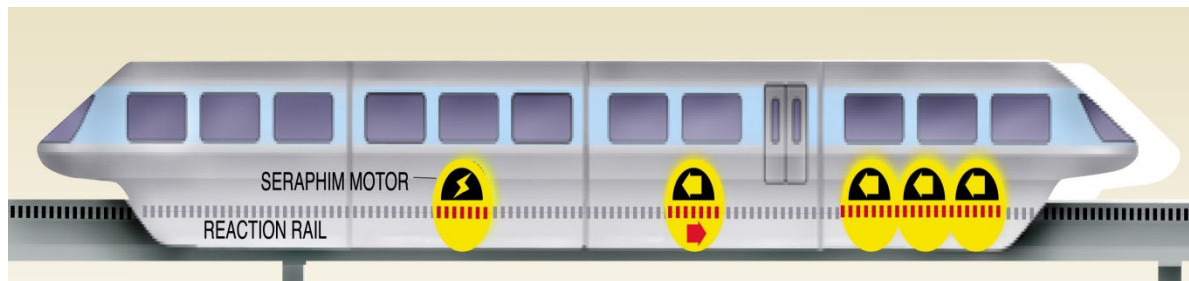


**Εικόνα 36. Το Ελβετικό πρόγραμμα ανάπτυξης τρένων Maglev φαίνεται πως έχει εγκαταληφθεί, λόγω του υψηλού κόστους υλοποίησης**

Δυστυχώς, το μεγάλο αυτό έργο φαίνεται πως δεν θα ολοκληρωθεί, αφού εδώ και πολλά χρόνια και λόγω της οικονομικής κρίσης, οι γραμμές φαίνεται να έχουν εγκαταληφθεί.

Με την ανάπτυξη δικτύων μαγνητικών τρένων, είναι βέβαιο πως οι αυτοκινητόδρομοι θα αποσυμφορηθούν, ενώ θα μειωθεί σημαντικά και η εσωτερική εναέρια κυκλοφορία. Ένας σημαντικός παράγοντας όμως, που λειτουργεί ανασταλτικά στην ευρεία διάδοση των τρένων Maglev, είναι οι υψηλές δαπάνες που απαιτούνται για την δημιουργία του αναγκαίου δικτύου που θα φιλοξενούσε την συγκεκριμένη εξελιγμένη τεχνολογία.

Για να υπάρξει ισορροπία μεταξύ της τεχνολογίας και του υψηλού κόστους του νέου δικτύου, προωθείται στις Η.Π.Α. μία νέα πειραματική μορφή των Maglev train, που έχει γίνει γνωστή με την ονομασία SERAPHIM, που προέρχεται από τα αρχικά Segmented Rail Phased Induction Motor. Το σχέδιο αυτό συνδυάζει κίνηση τροχών και μαγνητικής προώθησης, με αποτέλεσμα να μπορεί να κινείται με υψηλή ταχύτητα και στο υπάρχον συμβατικό σιδηροδρομικό δίκτυο. Στην περίπτωση των τρένων τύπου SERAPHIM, οι τροχοί δεν θα χρησιμοποιούνται κατά κόρων για να κινούν τα βαγόνια, αλλά για να τα κατευθύνουν, ώστε η ισχύς που θα προκύπτει από τα μαγνητικά πεδία να χρησιμοποιείται στην προώθηση.



Εικόνα 37. Το σχέδιο του Αμερικάνικου τρένου SERAPHIM

#### 4.2. Περιγραφή της λειτουργίας

Τα τρένα τεχνολογίας Maglev, μπορούν να κινηθούν με ταχύτητες της τάξεως των 450 – 500 χιλιομέτρων την ώρα, με αποτέλεσμα να μπορούν να ανταγωνιστούν τα αεροπλάνα, χρησιμοποιώντας μόλις την μισή ενέργεια. Ένας γραμμικός ηλεκτροκινητήρας είναι υπεύθυνος για την προώθηση του τρένου, που βρίσκεται απλωμένος κατά μήκος όλου του σιδηροδρόμου. Ο γραμμικός ηλεκτροκινητήρας είναι ουσιαστικά ένας κοινός κυκλικός, που έχει ανοιχτεί ώστε να είναι επίπεδος. Τριφασικό ρεύμα είναι υπεύθυνο για την τροφοδότησή του, που παράγει κινούμενο,

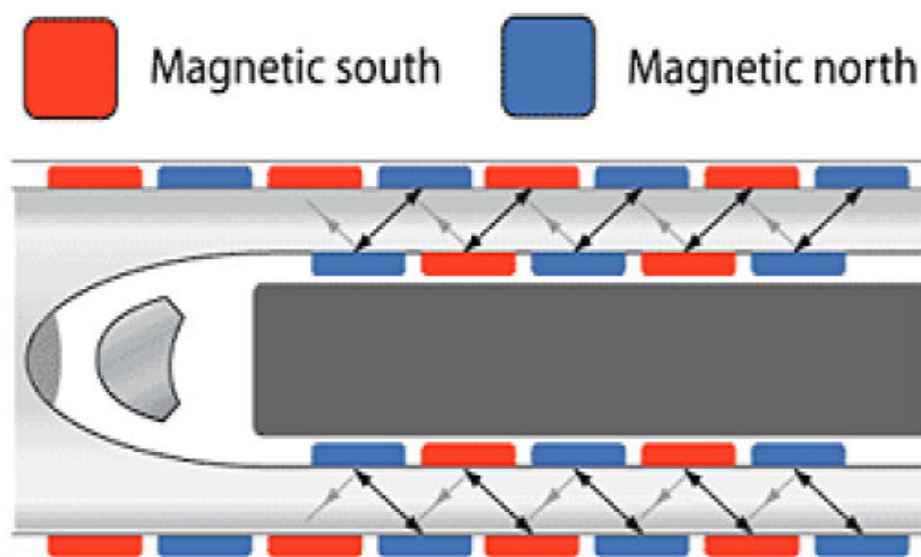


εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που παρασύρει τους μαγνήτες που διαθέτει το τρένο στο κάτω μέρος του.

Οι γραμμές τροφοδοτούνται με ρεύμα, μόνο στα κομμάτια όπου κινείται το τρένο, ενώ η ενεργοποίηση γίνεται πάντα στο μπροστινό μέρος. Εάν οι φάσεις αντιστραφούν, τότε ο γραμμικός κινητήρας μετατρέπεται σε γεννήτρια με αποτέλεσμα να επιστρέφει το ρεύμα στο δίκτυο και να φρενάρει ο συρμός.

Ανάλογα με τον τρόπο που ανυψώνονται, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Στα τρένα ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης, τύπου Transrapid και Swiss metro
- Στα τρένα ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης, τύπου Maglev και Yamanashi.



Εικόνα 38. Τρόπος λειτουργίας των γραμμών και των μαγνητών του τρένου

Τα τρένα ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης, που έχουν τους ηλεκτρομαγνήτες τους στο κάτω μέρος, έλκουν το πάνω μέρος της σιδηροτροχιάς μορφής T, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αιώρηση ενός με 1,2 εκατοστών. Στην τεχνολογία αυτού του τύπου, υπάρχει γραμμική γεννήτρια που διοχετεύει με ρεύμα τα βαγόνια, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει και σύστημα ελέγχου του διακένου, που λειτουργεί μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Εικόνα 39. Τρόπος λειτουργίας τρένων ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης

Από την άλλη μεριά, έχουμε τα τρένα ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης, που βασίζουν την αιώρησή τους στο φαινόμενο της επαγωγής. Βάσει του νόμου του Faraday, όταν ο ηλεκτρομαγνήτης κινείται σε κάποια απόσταση από ένα αγώγιμο μέταλλο ή ένα φύλλο αλουμινίου, παράγει τάση στις μάζες των μετάλλων.

Η μάζα βραχυκυκλώνει την τάση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κλειστά ρεύματα, που ονομάζονται δινορρεύματα, που σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, παράγουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο που είναι αντίθετο του μαγνήτη. Λόγω των αντίθετων μαγνητικών πεδίων, έχουμε έντονη δύναμη απόθησης, που οδηγεί το τρένο σε πέδηση και ανύψωση τουλάχιστον 10 εκατοστών πάνω από τις ράγες.

Τα τρένα Maglev, κινούνται με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ φέρουν μόνιμα στο κύτος τους ισχυρούς ηλεκτρομαγνήτες. Κατά την εκκίνησή τους, ακουμπούν σε ρόδες, μέχρι να φτάσουν σε μία υψηλή, προκαθορισμένη ταχύτητα, όπου δέχονται την δύναμη της ανύψωσης των επαγόμενων μαγνητών αλουμινίου, που τα οδηγούν σε αιώρηση.

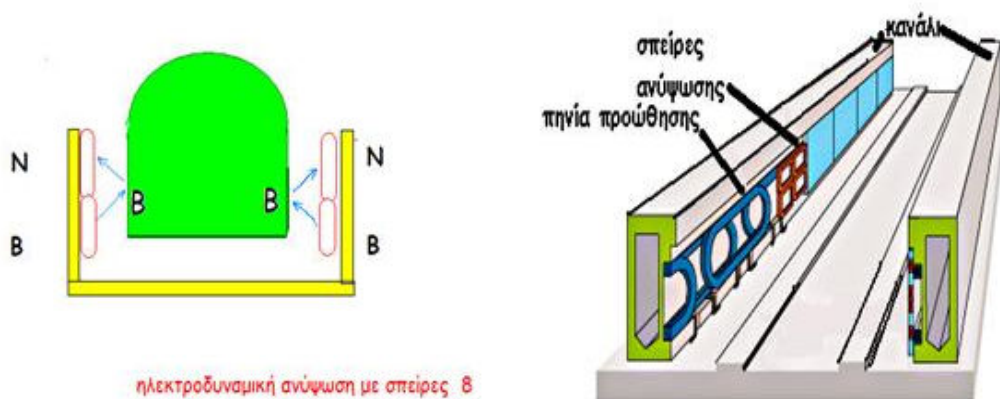
Η δύναμη της ανύψωσης μπορεί να αναλυθεί σε κατακόρυφη, που προκαλεί το τρένο να αιωρηθεί και σε οριζόντια, που το ευθυγραμμίζει στην τροχιά του.

Σε αυτό το σημείο, θα μπορούσαμε να αναλύσουμε ένα από τα νεότερα τρένα ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης, με την ονομασία Yamanashi. Ο συρμός αυτός, έχει στο βαγόνι του μία ηλεκτρογεννήτρια που τροφοδοτεί, μέσω υπεραγώγιμων πηνίων,

τους ισχυρούς πλαϊνούς ηλεκτρομαγνήτες, που ψύχονται με την χρησιμοποίηση του αερίου «ήλιον». Για τις χαμηλές ταχύτητες, που λαμβάνουν χώρα κατά την εκκίνηση και το σταμάτημα, το τρένο κινείται με τροχούς. Τέλος, υπάρχουν δύο γραμμικοί τριφασικοί κινητήρες, στο πλάι των καναλιών, που επιτρέπουν την προώθηση του τρένου.

Στην περίπτωση του Yamanashi, η μαγνητική αιώρηση δεν παράγεται στο αλουμίνιο, αλλά σε σπείρες που βρίσκονται και αυτές στα πλαϊνά των καναλιών. Οι σπείρες είναι μορφής 8, με το πάνω μέρος τους να μετατρέπεται σε N πόλο που έλκει τον B πόλο του συρμού και το κάτω μέρος τους να μετατρέπεται σε B πόλο που απωθεί τον B πόλο του τρένου, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αιώρηση.

Εάν ο συρμός πλησιάσει περισσότερο κάποιο σημείο, τότε παρατηρείται αύξηση της απωστικής δύναμης, που αναγκάζει το τρένο να επανέλθει στην θέση του και να ευθυγραμμιστεί. Άλλωστε, λόγω της φυσικής, είναι γνωστό πως η απόσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόθησης.

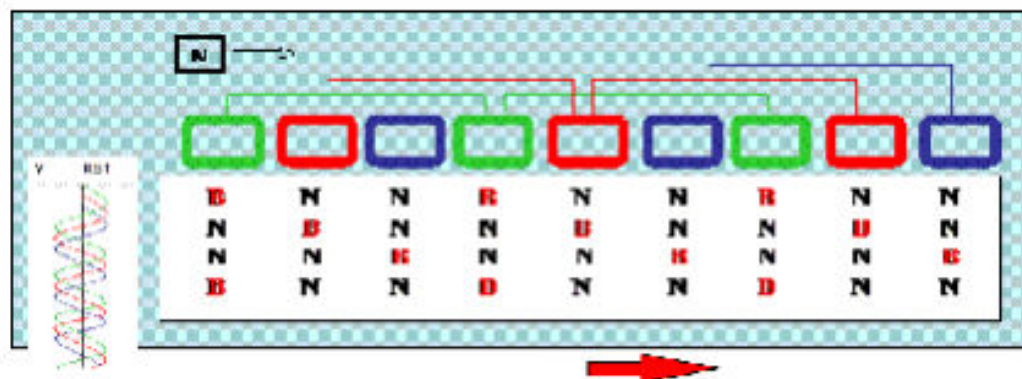


Εικόνα 40. Τρόπος ανύψωσης των σπειρών μορφής 8

Παρακάτω μπορούμε να δούμε αναλυτικά, μερικά από τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των τρένων μαγνητικής αιώρησης:

ΤΡΕΝΟ	ΜΗΚΟΣ * ΠΛΑΤΟΣ * ΥΨΟΣ	ΒΑΡΟΣ ΣΕ ΤΟΝΟΥΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣ Η ΑΝΑ 400 ΧΛΜ	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ
Swiss Metro	80 * 3 * 3 m	50	43 WH	500 km/h
Transrapid	27 *4.1*3.7 m	50	50.4 WH	500 km/h

<b>Maglev</b>	28 * 4 * 4 m	45	30 WH	500 km/h
<b>Yamanashi</b>	28 * 3 * 3 m	33	60 WH	550 km/h



Εικόνα 41. Κίνηση μαγνητικού πεδίου γραμμικού κινητήρα

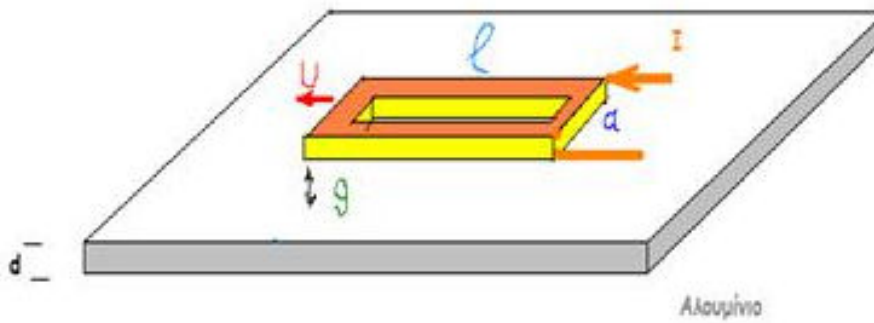
Η δύναμη της ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης δίνεται από τον τύπο των Guderjahn και Hannakam.

Ένα πηνίο σπειρών  $N$ , διαρρέεται από ρεύμα  $I$ , ενώ οι διαστάσεις του είναι  $a \times l$ . Όταν ταξιδεύει με ταχύτητα  $U$  σε μία απόσταση  $g$  από το φύλλο αλουμινίου με πάχος που δίνεται ως  $d$ , δημιουργείται κατακόρυφη δύναμη απόθησης ίση με:

$$F = \frac{\mu_0 (NI)^2}{\pi g} \left\{ \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + g^2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + g^2} - 2g - \left[ \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 + g^2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + g^2} \right] \frac{g^2}{(a/2)^2} \right\}$$

όπου  $k = 2/\mu_0 u \sigma d$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται οριζόντια δύναμη πέδησης που δίνεται ως  $F k.F$ .



Εικόνα 42. Δύναμη ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης

### 4.3. Προβλήματα της λειτουργίας

Βάσει των μελετών και των ερευνών ανάπτυξης που έχουν πραγματοποιηθεί όλα αυτά τα χρόνια, έχουν παρατηρηθεί ορισμένοι παράγοντες, που φαίνεται να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την λειτουργία, την κατασκευή και την περαιτέρω ανάπτυξη των τρένων Maglev.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες φαίνεται πως είναι οι παρακάτω:

- Το βάρος των βαγονιών
- Το υλικό με το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τρένα
- Η απόσταση των μαγνητών
- Το είδος των μαγνητών που χρησιμοποιούνται.

#### Το βάρος των βαγονιών

Είναι λογικό, το βάρος του συρμού να επηρεάζει την γενική του απόδοση, αφού εάν είναι βαρύς θα απαιτείται πιο ισχυρό μαγνητικό πεδίο για να επιτευχθεί η αιώρησή του. Γι αυτό το λόγο, γίνονται συνεχώς μελέτες, ώστε το τρένο να έχει μόνο όσα βαγόνια χρειάζονται, για να μην αυξάνεται με περιττό βάρος ολόκληρο το όχημα.



Επίσης, το τρένο Maglev σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι μεν πολυτελές, αλλά το εσωτερικό του να μην έχει περιττό βάρος, από καθίσματα, συσκευές και άλλες κατασκευές.

### **Το υλικό με το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τρένα**

Γίνονται έρευνες από τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές, ώστε να μειωθεί το συνολικό βάρος, αλλάζοντας το μέταλλο με το οποίο κατασκευάζονται τα τρένα μαγνητικής αιώρησης. Αντί λοιπόν να χρησιμοποιούνται τα συμβατικά μέταλλα, με τα οποία κατασκευάζονται τα υπόλοιπα τρένα, γίνονται μελέτες ώστε να χρησιμοποιούνται πιο ελαφριά υλικά, όπως είναι για παράδειγμα τα ανθρακονήματα.

Τα ανθρακονήματα, εκτός του ότι είναι πιο ελαφριά, κάνουν τα τρένα Maglev ακόμη πιο ασφαλή, αφού διαθέτουν μεγαλύτερες αντοχές σαν υλικά, σε περίπτωση σύγκρουσης.



**Εικόνα 43. Το επόμενο μεγάλο σχέδιο της Ιαπωνικής τεχνολογίας Maglev. Το τρένο μαγνητικής αιώρησης από ανθρακονήματα**

## **Η απόσταση των μαγνητών**

Η απόσταση των μαγνητών από τον σιδηρόδρομο είναι ανάλογη της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται. Στην τεχνολογία των τρένων Transrapid, η απόσταση είναι σχετικά μικρή, της τάξεως του ενός με 1.5 εκατοστών. Στα τρένα τύπου Maglev, η απόσταση μπορεί να φτάσει ακόμη και στα 10 εκατοστά. Φυσικά είναι λογικό πως, όσο η απόσταση μεταξύ συρμού και γραμμών μεγαλώνει, τόσο πιο ισχυρό θα πρέπει να είναι το μαγνητικό πεδίο, ώστε να συγκρατεί το όχημα και να του επιτρέπει να κινείται με υψηλή ταχύτητα.

## **Το είδος των μαγνητών που χρησιμοποιούνται**

Όπως είδαμε και παραπάνω, οι μαγνήτες είναι ανάλογοι της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας. Για παράδειγμα, οι μαγνήτες της τεχνολογίας Maglev είναι ισχυρότεροι σε σχέση με τους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στην Γερμανία και πιο συγκεκριμένα στην τεχνολογία Transrapid.

Επιπροσθέτως, φαίνεται πως στην τεχνολογία μαγνητικής αιώρησης, υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που δεν επηρεάζουν την λειτουργία της, όπως:

- Οι καιρικές συνθήκες και
- Οι αντιστάσεις του αέρα.

Οι παράγοντες αυτοί δεν θεωρούνται σημαντικοί για την απόδοση των τρένων Maglev και επηρεάζουν απειροελάχιστα την μέγιστη ταχύτητα του τρένου.

## **4.4. Σύγκριση συμβατικών τρένων και τρένων Maglev**

Τα τρένα maglev ή αλλιώς μαγνητικής αιώρησης, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά τρένα, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα, με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί ως τεχνολογία μόνο σε λίγες

χώρες του πλανήτη, όπως είναι η Ιαπωνία, η Γερμανία και η Γαλλία. Το βασικότερο και πιο σημαντικό πλεονέκτημα των συρμών υψηλής ταχύτητας είναι πως μειώνουν τους χρόνους των δρομολογίων, λόγω αυτής ακριβώς της υψηλής ταχύτητας που αναπτύσσουν. Επιπροσθέτως, έχουν την δυνατότητα να επιταχύνουν και να φρενάρουν πιο γρήγορα, ενώ μπορούν να κινηθούν με ευκολία ακόμη και σε περιπτώσεις με κακές καιρικές συνθήκες όπως οι καταιγίδες και η έντονη χιονόπτωση. Επίσης, η ορμή τους δεν επηρεάζεται καθόλου όταν έχουν να αντιμετωπίσουν ανωφέρειες στην πορεία τους.

Στα θετικά τους τοποθετούνται επίσης, το ότι δεν καταναλώνουν τόσο πολύ ενέργεια όσο τα συμβατικά τρένα και τα αεροπλάνα, δεν προκαλούν ρύπανση του περιβάλλοντος, αφού η ηλεκτρική ενέργεια είναι ασφαλής, ενώ δεν έχουν να παρουσιάσουν υψηλά επίπεδα θορύβου κατά την κίνησή τους. Η απόδοση ενέργειας των τρένων maglev είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τα συμβατικά τρένα, διότι απουσιάζει η δύναμη της αντίστασης κύλισης.

Ένα βασικό μειονέκτημα των τρένων Maglev, σε σχέση με τα ηλεκτροκίνητα τρένα και τα συμβατικά, είναι το ότι δεν έχουν συμβατότητα στις ήδη υφιστάμενες γραμμές που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροκίνηση. Αυτό πρακτικά συνεπάγεται πως πρέπει να κατασκευαστεί εξολοκλήρου το σύνολο της υποδομής των δικτύων, ώστε να φιλοξενηθούν τρένα Maglev, κάτι που θα οδηγούσε σε ένα πολύ αυξημένο κατασκευαστικό κόστος. Παρακάτω μπορούμε να καταγράψουμε κάποιες συγκρίσεις:

➤ Ένα κοινό επιβατικό τετραθέσιο αυτοκίνητο ξοδεύει **350 Wh** / ανά επιβατοχιλιόμετρο, για μία μέση ταχύτητα 130 χλμ / ώρα.

Ένα συμβατικό ηλεκτροκίνητο τρένο καταναλώνει **160 Wh** / επιβατοχιλιόμετρο, για μέση ταχύτητα 250 χλμ / ώρα.

Ένα αεροπλάνο χρησιμοποιεί **400 – 600 Wh** / επιβατοχιλιόμετρο, για μέση ταχύτητα 900 χλμ / ώρα.

Ένα Maglev καταναλώνει **300 Wh** / επιβατοχιλιόμετρο, για μέση ταχύτητα 300 χλμ / ώρα.



- Στα παραπάνω πρέπει να αναφερθεί πως τα ενεργειακά έξοδα λειτουργίας, δεν θα υπερβαίνουν το 10% του λειτουργικού κόστους για το σύστημα Maglev. Άρα η τεχνολογία αυτή συμφέρει να χρησιμοποιείται, μόλις φυσικά βρεθούν τα απαραίτητα χρήματα για να κατασκευαστεί.
- Το Maglev, εξαιτίας της ύπαρξης ηλεκτρικής ενέργειας, δεν εξαρτάται καθόλου από υγρά και επιβλαβή καύσιμα, όπως είναι για παράδειγμα το πετρέλαιο.
- Το Maglev μπορεί να κινείται εντελώς αθόρυβα, σε σχέση με τα υπόλοιπα επιβατικά οχήματα. Ο μόνος θόρυβος που ακούγεται είναι ο ήχος που κάνει όταν διασχίζει τον αέρα.
- Όλα τα τροχοφόρα οχήματα σε πολύ υψηλές ταχύτητες εμφανίζουν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, κάτι που απουσιάζει από την κίνηση των συρμών Maglev.
- Είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ευκολότερη χάραξη τροχιάς ή αλλιώς μικρότερη ακτίνα στροφής, αφού στην τεχνολογία Maglev δεν βασιζόμαστε πλέον στην πρόσφυση των τροχών.
- Η συντήρηση των τρένων Maglev είναι ευκολότερη και γίνεται σε πιο αραιά διαστήματα, αφού η τροχιά δεν παρουσιάζει φθορές, λόγω της απουσίας επαφής με το όχημα, ενώ το μοναδικό κινητό τμήμα, είναι ο ίδιος ο συρμός.
- Εξαιτίας της ανάρτησης ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων, το φορτίο του τρένου κατανέμεται ομοιόμορφα, με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι ελαφρύτερο, αντιθέτως της περιπτώσεως όπου η στήριξη βασίζεται στην ύπαρξη τροχών.
- Ένα ουσιώδες μειονέκτημα των συρμών Maglev, είναι το ότι απαιτείται πολύ μεγαλύτερη επένδυση ανά χιλιόμετρο γραμμής, σε σχέση πάντα με τον συμβατικό σιδηρόδρομο.

- Η πέδηση, στην περίπτωση συνδυασμού μηχανικής και ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, προκαλεί αύξηση της ταχύτητας, καθώς και της ασφάλειας, ενώ η ισχύς έχει την απαιτούμενη δυνατότητα ώστε να αναγεννάται.
- Εάν πάρουμε το παράδειγμα των Γαλλικών συμβατικών τρένων υψηλών ταχυτήτων TGV, τότε θα δούμε πως το όριο των 500 χλμ / ώρα έχει ξεπεραστεί, με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις η ύπαρξη τρένων Maglev να μην είναι απαραίτητη ή ανταγωνιστική, λόγω κόστους και προσφερόμενης υπηρεσίας, αφού τα δρομολόγια θα είναι εξίσου ταχύτατα και με ένα τρένο τύπου TGV. Στις υπόγειες διαδρομές όμως, καθώς και στις περιπτώσεις υποθαλάσσιων συραγγών, το Maglev θεωρείται μονόδρομος.

#### **4.5. Το ρεκόρ ταχύτητας από τρένο Maglev**

Το 2015, και για πρώτη φορά στην ιστορία, ένα τρένο Maglev μπόρεσε να ξεπεράσει την ταχύτητα των 600 χιλιομέτρων την ώρα. Φυσικά μιλάμε για πειραματική διαδρομή, όπου το τρένο της Ιαπωνικής εταιρείας JR Tokai, κατάφερε να κινηθεί με 603 χλμ/ώρα.

Σύμφωνα με τον υπάρχοντα σχεδιασμό, το τρένο αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στην γραμμή Ναγκόγια – Τόκυο από το 2027 και μετά, ενώ έχει υπολογιστεί πως θα κινείται καθημερινά με λίγο περισσότερο από 550 χλμ / ώρα, κατά μέσο όρο.

Είναι γεγονός πως χάρη στην παρουσία αυτού του τρένου, θα επιτευχθεί η κάλυψη μίας απόστασης 286 χιλιομέτρων σε μόλις 40 λεπτά, που θα αποτελεί τον μισό χρόνο από αυτόν που απαιτούν τα υπάρχοντα τρένα Σινκανσέν, για να διανύσουν αυτήν την απόσταση.

Αξίζει να αναφερθεί πως, το προηγούμενο ρεκόρ ταχύτητας είχε επιτευχθεί λίγες μέρες πριν από το ίδιο μοντέλο τρένου και ήταν τα 590 χιλιόμετρα την ώρα.

Η ολοκληρωμένη σύνδεση του έργου με την Οσάκα, ώστε να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά τρένα τεχνολογίας Maglev, αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι το 2045.

Φυσικά, το κόστος είναι αστρονομικό και έχει υπολογιστεί στα 70 δισεκατομμύρια ευρώ. Σε αυτό δεν περιλαμβάνεται μόνο η δημιουργία γραμμών, αλλά και η περαιτέρω εξέλιξη των τρένων και η διάνοιξη των απαραίτητων συραγγών και τούνελ.

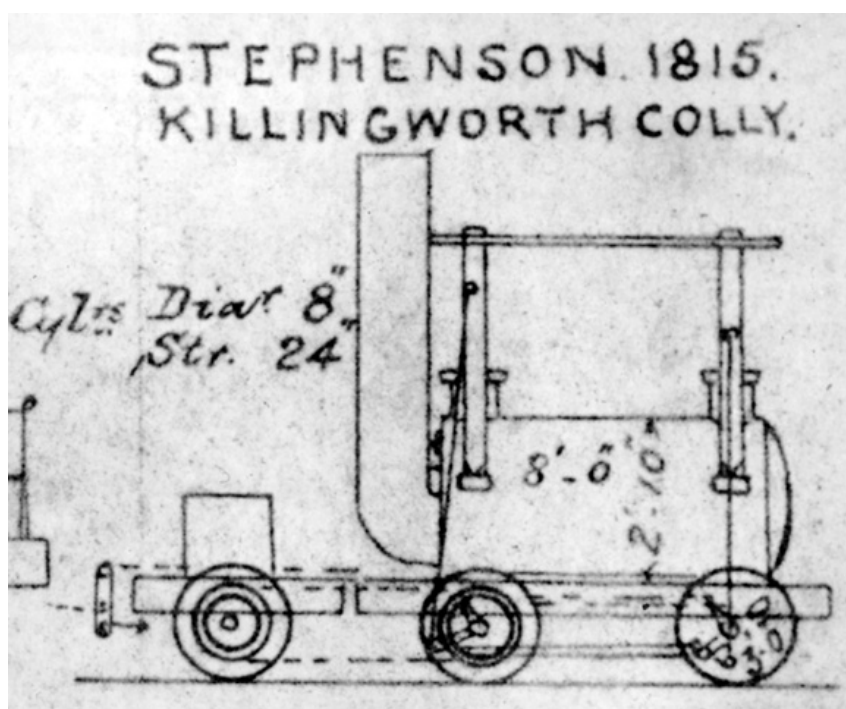


**Εικόνα 44. Ένα από τα τελευταίας τεχνολογίας τρένα Maglev που παρουσίασε η Ιαπωνία. Το συγκεκριμένο, είναι κάτοχος του ρεκόρ ταχύτητας τρένου, αφού έφτασε σε πειραματική διαδρομή τα 603 χλμ/ώρα**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ – Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΡΕΝΩΝ

### 5.1. Τα πρώτα οχήματα έλξης και η εξέλιξη των τρένων

Το πρώτο όχημα έλξης, ή αλλιώς η δημιουργία της πρώτης ολοκληρωμένης ατμομηχανής, που θα μπορούσε να μεταφέρει επιβάτες και φορτία, παρουσιάστηκε το 1814 από τον George Stephenson. Το όχημα αυτό, είχε μόλις δύο άξονες και μπορούσε να σύρει ένα βαγόνι βάρους 30 τόνων, με μέγιστη ταχύτητα τα 6 χιλιόμετρα την ώρα. Βέβαια, και νωρίτερα είχαν παρουσιαστεί κάποια οχήματα που αποτελούσαν τους προπομπούς των τρένων, αλλά είτε δεν ήταν ολοκληρωμένα, είτε παρουσίαζαν πληθώρα προβλημάτων στην λειτουργία τους.



Εικόνα 45. Το σχέδιο του Stephenson

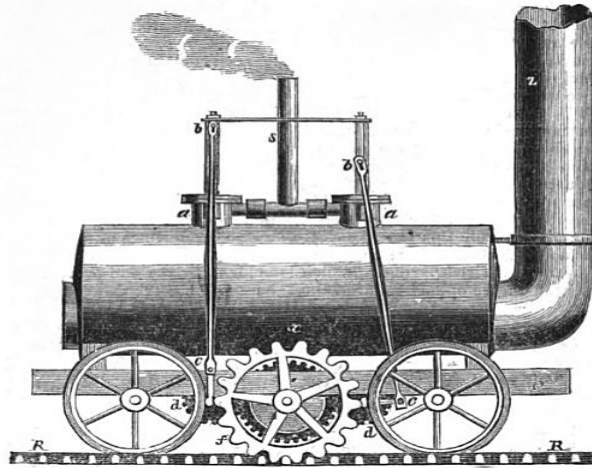
Από εκείνο το σημείο και όσο οι πρωτεύουσες εξελίσσονταν και μετατρέπονταν από πόλεις πεζών σε πόλεις οχημάτων, άρχισαν να εμφανίζονται περισσότεροι εφευρέτες με τα δικά τους επίδοξα σχέδια, σχετικά με την δημιουργία τρένων. Τα περισσότερα

από αυτά καταδικάζονταν σε αποτυχία, αν και μία περίπτωση φαινόταν να ξεχωρίζει από όλες τις υπόλοιπες. Το 1824, ο John Vallans, πατεντάρισε την δική του μηχανή και το 1826 την δοκίμασε σε μία νέα πειραματική γραμμή. Το τρένο κινήθηκε στο εσωτερικό μίας σύραγγας διαμέτρου 2,4 μέτρων και μπόρεσε να καλύψει μία απόσταση 46 μέτρων εντός 50 δευτερολέπτων. Η ταχύτητά του έφτανε τα 3,3, χιλιόμετρα την ώρα, αλλά παρόλο που εντυπωσίασε, δεν βρήκε υποστηρικτές, με αποτέλεσμα να μην προχωρήσει για ευρεία χρήση. Οι πρώτες ατμάμαξες κινούνταν με μηχανές του Watt, ενώ από τον ίδιο πήρε το όνομά της η μονάδα μέτρησης της υποδύναμης. Στο πρώτο όχημα της μηχανής ατμού, ήταν τοποθετημένα τα διάφορα αναγκαία εξαρτήματα, ενώ στην εφοδιοφόρο, δηλαδή το δεύτερο κατά σειρά όχημα, βρίσκονταν οι δεξαμενές κάρβουνου και νερού. Τα κυριότερα όργανα των πρώτων ατμάμαξων ήταν:

- Οι ατμοσωλήνες
- Ο λέβητας και οι σωλήνες διοχέτευσης της φωτιάς που συγκοινωνούσαν με τον φούρνο
- Τα έμβολα, που συμπίζαν τον ατμό
- Το έγκεντρο και
- Ο διωστήρας

Μερικές από τις πιο χαρακτηριστικές, ολοκληρωμένες και γρήγορες ατμάμαξες ήταν:

Το «**Blenkinsop**», που αποτελούσε δημιούργημα του εφευρέτη John Blenkinsop και μπορούσε να κινείται με την ταχύτητα των 1812,5 μέτρων την ώρα.



Εικόνα 46. Το σχέδιο του John Blenkinsop, που αφορούσε την ατμάμαξα που πήρε το όνομά του Το «Puffing Billy», που μπορούσε να κινείται με ταχύτητα 1813, 8 μέτρων την ώρα.



Εικόνα 47. Η ατμάμαξα "Puffing Billy"

Η ατμάμαξα «Rocket», που μπορούσε να κινείται με ταχύτητα 1829,32 μέτρων την ώρα.



**Εικόνα 48. Η ατμάμαξα "Rocket"**

Το 1913, η πρώτη μηχανή Diesel έκανε την εμφάνισή της σε σιδηροδρομικό όχημα, με αποτέλεσμα από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και μετά, οι ντιζελομηχανές να έχουν αντικαταστήσει σχεδόν ολοκληρωτικά τις ατμάμαξες. Η εξέλιξη συνέχισε την διαδρομή της, αφού εμφανίστηκαν οχήματα με μηχανές Diesel και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Σε αυτά τα τρένα, άρχισαν να χρησιμοποιούνται και πιο προηγμένα όργανα, παρόμοια με αυτά που είχαν τα λεωφορεία. Τα πρώτα οχήματα αυτού του τύπου βέβαια, χρησιμοποιούνταν ως μικρές μηχανές έλξης, ώστε να μεταφέρουν ελαφριά βαγόνια με λίγους επιβάτες ή φορτία.



Εικόνα 49. Vintage αφίσα της δεκαετίας του 1920, που διαφήμιζε τα πρώτα τρένα Diesel ως τα θαύματα του μέλλοντος

Βλέποντας την ανάγκη για έλξη μεγαλύτερων φορτίων με υψηλότερη ταχύτητα, οι κατασκευαστές κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η σύνδεση του κινητήρα Diesel με τους τροχούς ήταν ανεπαρκής. Αυτό οδήγησε στο να παρεμβληθεί μία ηλεκτρογεννήτρια, που θα λάμβανε κίνηση από τον κινητήρα Diesel, ώστε να παράξει ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα με την σειρά του θα διοχετευόταν σε ηλεκτροκινητήρες, μέσω κατάλληλων διατάξεων, ώστε να κινηθούν οι τροχοί. Χάρη σε αυτό το σχέδιο, οι μηχανές Diesel αποδείχτηκε ότι παρουσίαζαν πολλά πλεονεκτήματα λόγω της μεγάλης τους ισχύς, αφού είχαν την δυνατότητα να έλκουν βαρύτερα φορτία με μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ ταυτόχρονα παρουσίαζαν μεγαλύτερη αυτονομία, ευκολότερη διαδικασία τροφοδοσίας και πιο απλή οδήγηση.





Εικόνα 50. Ένα από τα πρώτα τρένα που χρησιμοποιούσαν κινητήρες Diesel και ηλεκτρογεννήτριες

Παρόλο που το πρώτο τρένο που κινήθηκε με ρεύμα κατασκευάστηκε το 1834, δεν κατάφερε να κερδίσει το κοινό, αφού η κίνησή του τροφοδοτούνταν από μπαταρίες που απαιτούσαν συχνή φόρτιση και χαρακτηρίζονταν από το μεγάλο τους βάρος. Στις μέρες μας, οι ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες λαμβάνουν την ισχύ του ρεύματος από καλώδια που βρίσκονται σε κάποιο ύψος πάνω από τα τρένα. Τα ηλεκτρικά τρένα ήταν η φυσική εξέλιξη των τρένων Diesel, αφού είναι οικονομικότερα και δεν μολύνουν το περιβάλλον σε τόσο μεγάλο βαθμό.

Χάρη στην δύναμη του ηλεκτρισμού, μπορούν να κινούνται και τα τρένα τελευταίας τεχνολογίας μαγνητικής αιώρησης, που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό το ότι ταξιδεύουν λίγο πάνω από την επιφάνεια μίας υπερυψωμένης μονής ράγας, χάρη στην ύπαρξη ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Τα τρένα αυτά αναπτύσσονται ιδιαίτερα στην Ιαπωνία, την Γερμανία και την Γαλλία.

Το επόμενο στάδιο εξέλιξης των τρένων, θεωρείται το να επιτευχθεί η κίνησή τους, με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.

## 5.2. Ηλεκτροκίνητα τρένα

Όπως είδαμε και προηγουμένως, η κίνηση των τρένων μέσω του ηλεκτρισμού, δεν αποτελεί νεότερο φαινόμενο, αφού ως τεχνολογία άρχισε να χρησιμοποιείται από το 1834. Βέβαια, οι πρώτη ηλεκτράμαξα, είχε πολλά προβλήματα να παρουσιάσει, ενώ την κίνησή της την βάσιζε σε πολύ βαριές και δύσχρηστες μπαταρίες γαλβανικών κυττάρων. Μία βελτιωμένη έκδοση ακολούθησε το 1837, που βασιζόταν στην ίδια φιλοσοφία και επίσης δεν κατάφερε να δημιουργήσει τον απαραίτητο αντίκτυπο στο κοινό.

Ο Robert Davidson το 1841, αποφάσισε να ασχοληθεί με το συγκεκριμένο ζήτημα και κατασκεύασε μία ηλεκτράμαξα με μεγαλύτερη μηχανή, με την ονομασία Galvani, που δοκιμάστηκε για πρώτη φορά στην σιδηροδρομική γραμμή Γλασκώβης – Εδιμβούργου. Επειδή όμως εκείνη την εποχή, η διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας από μπαταρίες ήταν σε μεγάλο βαθμό περιορισμένη, είχε ως αποτέλεσμα να μην γενικευθεί η χρήση της στον σιδηροδρομικό τομέα.

Η εταιρεία Wernervon Siemens το 1879, παρουσίασε στο Βερολίνο ένα πρώτο επιβατικό ηλεκτρικό όχημα. Το τρένο αυτό, αποτελούνταν από την ηλεκτράμαξα και 3 βαγόνια, ενώ μπορούσε να φτάσει την μέγιστη ταχύτητα των 13 χιλιομέτρων την ώρα, χάρη στον κινητήρα των 2.2 kW. Μία τρίτη σιδηροδρομική γραμμή που ήταν τοποθετημένη μεταξύ των τυπικών γραμμών, ήταν υπεύθυνη για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ ένα δυναμό σταθερής τάσης παρείχε την ενέργεια.

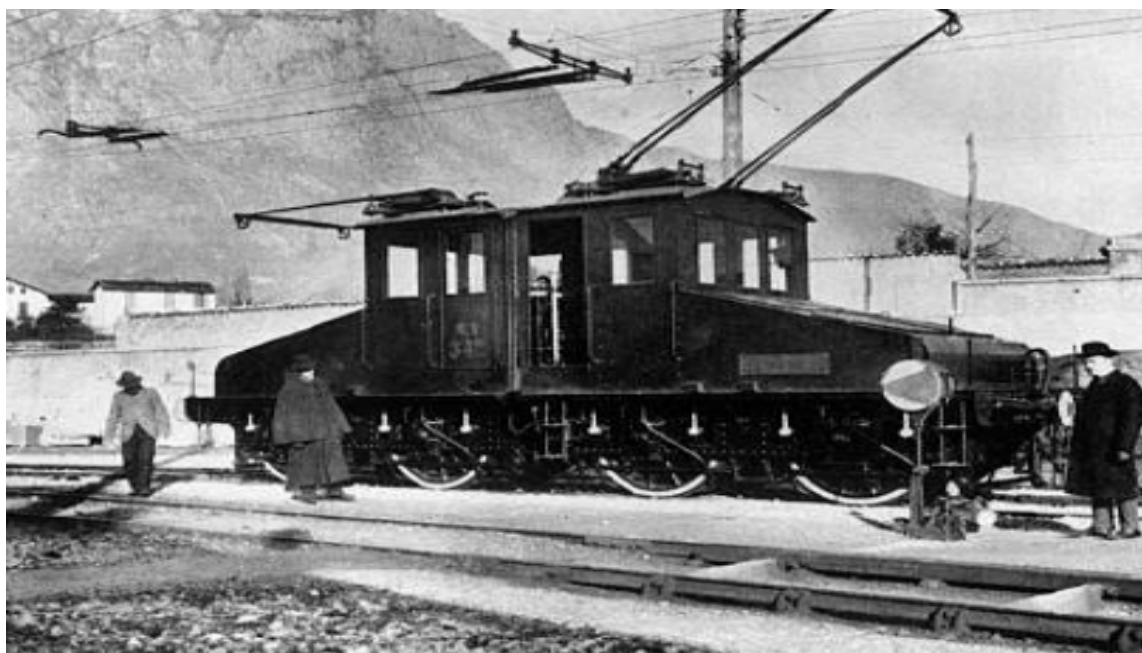
Το 1883 στο Brighton της Αγγλίας, εγκαινιάστηκε ο πρώτος ηλεκτρικός σιδηρόδρομος, κάτι που οδήγησε στο συμπέρασμα πως ο ηλεκτρισμός είχε αρχίσει να εισέρχεται με αξιώσεις στους σιδηροδρόμους.

Η αυξανόμενη χρήση σηράγγων σε περιοχές αστικών κατοικιών, ήταν ένας βασικός παράγοντας για την μαζική ανάπτυξη της μετακίνησης μέσω ηλεκτράμαξων, αφού ο καπνός από τις ατμάμαξες θεωρούνταν εξαιρετικά βλαβερός και οι διοικήσεις των δήμων επιθυμούσαν σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό την απόσυρσή τους από την καθημερινότητα. Η ρήτρα απαγόρευσης της ατμοκίνησης άρχισε να γίνεται πραγματικότητα στην Μεγάλη Βρετανία και πιο συγκεκριμένα στους υπόγειους σιδηροδρόμους South London Railway και City. Οι εταιρεία Platt and Mather, ήταν υπεύθυνη για την επαναλειτουργία των γραμμών αυτών, με την αποκλειστική χρησιμοποίηση ηλεκτράμαξων.

Το 1894, ο Ούγγρος Kalman Kando προχώρησε στην δημιουργία γεννητριών και κινητήρων υψηλής τάσης με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα. Έτσι, η συγκεκριμένη χρονιά αποτέλεσε ορόσημο στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης.

Το 1897, η εφεύρεση του Sprague που αφορούσε αμαξοστοιχίες πολλαπλών μονάδων, αναβάθμισε τους υπόγειους σιδηρόδρομους, που πλέον είχαν τον ηλεκτρισμό ως κύρια επιλογή τροφοδοσίας. Φυσικά, είχαμε και την κίνηση στην επιφάνεια, που κατά κύριο λόγο πραγματοποιούνταν με τον ατμό, αν και σύντομα, τα διατάγματα απαγόρευσης ατμού άρχισαν να αφορούν το σύνολο του σιδηροδρόμου.

Το 1915, και πάλι από τον Kando, διατυπώθηκε ότι εάν χρησιμοποιηθεί άμεσα η τυποποιημένη συχνότητα ηλεκτρικής ενέργειας του δημοσίου δικτύου, τότε τα ηλεκτρικά συστήματα των τρένων θα είναι πολύ πιο πετυχημένα, εάν δημιουργηθούν απλοί υποσταθμοί μετασχηματιστών. Βάσει αυτής της θεώρησης, επινόησε έναν περιστροφικό μετατροπέα φάσης, που θα ήταν κατάλληλος για να τον χρησιμοποιούν οι συρμοί.



**Εικόνα 51. Ο Kando με την πρώτη του ηλεκτράμαξα**

Βάσει της βιβλιογραφίας του μελετητή Duffy, είδαμε πως όταν ξέσπασε ο Πρώτος Παγκόσμιος Πόλεμος, η ηλεκτροκίνηση λειτουργούσε κυρίως στις Η.Π.Α. και σε

λίγες χώρες της Ευρώπης, ενώ με την λήξη του, μεγάλα προγράμματα άρχισαν να πραγματοποιούνται στην Ελβετία, την Γερμανία, την Σουηδία, την Αυστρία και την Νορβηγία.

Σύμφωνα με τον Duffy, τα έργα ηλεκτροδότησης στην Ευρώπη, επικεντρώνονταν κατά κύριο λόγο σε ορεινές περιοχές λόγω των παρακάτω παραγόντων:

- Οι ηλεκτροκίνητες μηχανές προσέφεραν μεγαλύτερη ελκτική δύναμη, κάτι που ήταν απαραίτητο εξαιτίας της φύσης των γραμμών. Στις μέρες μας για παράδειγμα, η Ελβετία έχει να παρουσιάσει ως επί το πλείστον ηλεκτροκίνητες σιδηροδρομικές γραμμές.
- Οι προμήθειες σε κάρβουνα ήταν δύσκολο να ενσωματωθούν στα τρένα, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια ήταν άμεση διαθέσιμη.

Το 1902, έγινε μία σύγκρουση στην σήραγγα Park Avenue. Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα να απαγορευτεί η χρήση των τρένων με ατμό από τον Ιούλιο του 1908 και μετά, στην πολιτεία της Νέας Υόρκης. Έτσι, οδηγηθήκαμε στην σταδιακή χρησιμοποίηση ηλεκτροκίνητων συρμών από το 1904 και έπειτα, ενώ μέχρι την δεκαετία του 1930, ο σιδηρόδρομος στην περιοχή της Πενσυλβάνια εξυπηρετούσε ολόκληρη την περιοχή ανατολικά του Harrisburg.

Οι Ιταλοί θεωρούνται οι πρώτοι που εφάρμοσαν την ηλεκτροδότηση του συνόλου των σιδηροδρομικών γραμμών του δικτύου τους, ενώ για την σχεδιάσή του προσλήφθηκε ο Kalman Kando. Το τριφασικό σύστημα του δικτύου, είχε συχνότητα 15 Hz και τάση 3 kV. Ήταν λογικό πως θα έπρεπε να δημιουργηθούν νέα σχέδια συσκευών μετάδοσης και ηλεκτρικών κινητήρων, αφού η τάση ήταν χαρακτηριστικά πιο υψηλή σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια. Την περίοδο της αναβάθμισης των σιδηροδρόμων σε ηλεκτροκίνητους, πραγματοποιούνταν δοκιμές για τον τύπο τροφοδότησης που θα χρησιμοποιούταν σε πιο μόνιμη βάση. Σε εκείνο το σημείο είχε παρατηρηθεί διαφορετική τάση μεταξύ των τμημάτων, αφού σε ορισμένα είχε μετρηθεί τριφασική παροχή ρεύματος με 16,6 Hz – 3,6 kV και σε άλλα είχε σημειωθεί DC 3 kV, 50 Hz, 10 kVAC και 1500 VDC. Την δεκαετία του 1930, επιλέχθηκε η τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος 3 kV που θα εξυπηρετούσε το σύνολο του Ιταλικού δικτύου σιδηροδρόμων. Στις μέρες μας, η τροφοδοσία 50 Hz / 25 kV

χρησιμοποιείται στα τρένα υψηλών ταχυτήτων και τα 1500 VDC, σε ορισμένες γραμμές κοντά στην Γαλλία.

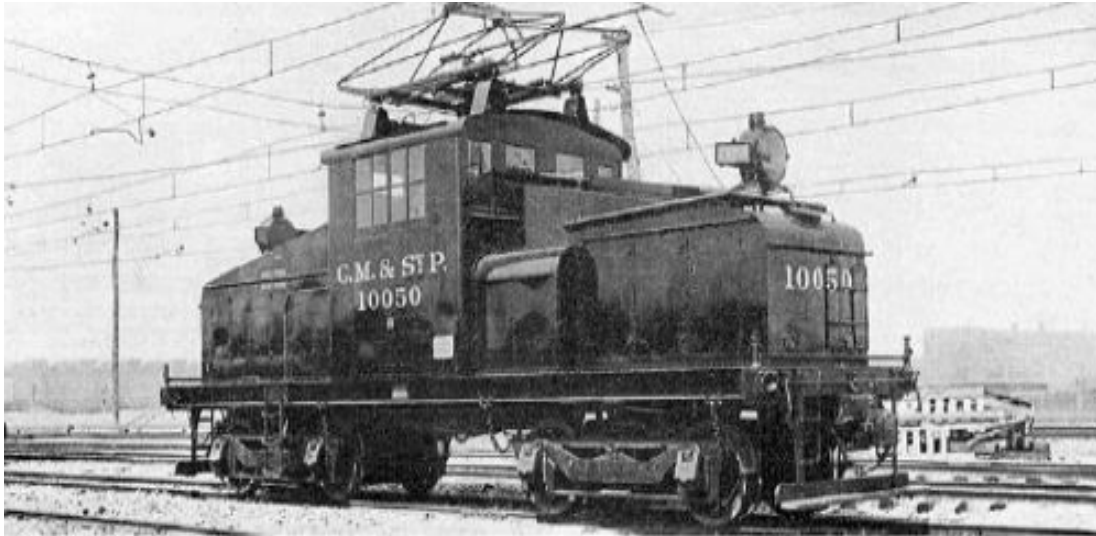
Ο Haut το 1987, ανέφερε χαρακτηριστικά στα γραπτά του πως, οι κυριότερες σιδηροδρομικές γραμμές της Ευρώπης είχαν ηλεκτροδοτηθεί, μέχρι την δεκαετία του 1960. Άλλωστε, από το 1920 έως την εποχή μας, η τεχνολογία των ηλεκτρικών συρμών δεν έπαψε να αναπτύσσεται. Αξίζει να αναφερθούν ορισμένα από τα σημαντικότερα τρένα της εποχής αυτής:

Το 1918, είχαμε την αμαξοστοιχία του Milwaukee, με την ονομασία RoadClassEP-2. Η συγκεκριμένη είχε ισχύ της τάξεως των 3.300 kW, μέγιστη ταχύτητα που έφτανε τα 112 χιλιόμετρα την ώρα, ενώ ζύγιζε 240 τόνους.

Η Γερμανική E-18, είχε ισχύ 2.800 kW, μέγιστη ταχύτητα 150 χιλιόμετρα την ώρα και βάρος 108 τόνων.

Στις 29/03/1955 οι Γάλλοι παρουσίασαν ένα ακόμη εξαιρετικό σχέδιο με την ονομασία CC7107, που μπορούσε να φτάσει την μέγιστη ταχύτητα των 331 χιλιομέτρων την ώρα. Πέντε χρόνια αργότερα, το Σουηδικό SJClassDM 3 έκανε επίδειξη ισχύος που έφτανε τα 7.200 kW. Την ίδια περίοδο οι Γερμανοί και οι Γάλλοι δεν έμεναν με σταυρωμένα τα χέρια, αφού κατασκεύαζαν συνεχώς αμαξοστοιχίες που μπορούσαν να ξεπεράσουν τα 200 χιλιόμετρα την ώρα και χρησιμοποιούνταν ώστε να μεταφέρουν φορτία και επιβατικό κοινό μεταξύ αποστάσεων.

Χάρη στην ύπαρξη της ηλεκτροκίνησης, βελτιώθηκε σημαντικά η τεχνολογία των τρένων, αφού πλέον ήταν δυνατό να χρησιμοποιούνται μικρότεροι μεν αλλά ισχυρότεροι κινητήρες. Η αναγέννηση της ηλεκτροδότησης που παρουσίασε μία μικρή κάμψη, επήλθε κατά την δεκαετία του 1980, αφού χάρη στην Γαλλία και την Ιαπωνία αναβίωσε η ανάγκη χρησιμοποίησης τρένων υψηλών ταχυτήτων. Οι δύο χώρες κατασκεύασαν από το μηδέν ολόκληρα δίκτυα γραμμών υψηλής ταχύτητας, ώστε να μπορέσουν να φιλοξενήσουν τρένα που θα κινούνταν πιο γρήγορα από τα συμβατικά. Έτσι δημιουργήθηκε το δίκτυο Σινκανσέν στην Ιαπωνία και το δίκτυο τρένων LGV στην Γαλλία. Παρόμοια συστήματα άρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους στην Γερμανία, την Ιταλία και την Ισπανία, ενώ οι Η.Π.Α. απλώς πραγματοποιούσαν επεκτάσεις στο ήδη υπάρχων δίκτυό τους.



Εικόνα 52. Η ηλεκτράμαξα RoadClass EP-2

Από το 1990 και έπειτα, άρχισε η πιο συχνή χρήση ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων που τροφοδοτούνταν από GTO Inverter.

Ένα νέο τρένο με την ονομασία Europrinter ES64-U4, παρουσιάστηκε από την εταιρεία Siemens στις 2/9/2006, που αποτελούσε συρμό ηλεκτρικής έλξης. Το συγκεκριμένο μοντέλο πέτυχε ταχύτητα ρεκόρ για μηχανή με ρυμουλκούμενο τρένο, αφού έφτασε τα 357 χιλιόμετρα την ώρα, στην γραμμή μεταξύ Νυρεμβέργης και Ingolstadt.



Εικόνα 53. Η ηλεκτράμαξα Eurosprinter ES64 - U4

### 5.3. Τα τρένα νεότερης τεχνολογίας

Στις μέρες μας τα τρένα μοιάζουν σε μεγάλο βαθμό το ένα με το άλλο, εξαιτίας της υψηλής συχνότητας των συναλλαγών μεταξύ των κρατών, καθώς και των καθημερινών μετακινήσεων, που έχουν καταστήσει την συγκοινωνία του πλανήτη ως ένα μικρό χώρο, όπου όλοι μπορούν να κινηθούν. Έτσι, τα δίκτυα μεταφοράς έχουν πλέον αυξημένη επαφή μεταξύ τους, κάτι που δεν γινόταν τόσο έντονα στο παρελθόν. Τα τρένα πολλών κατασκευαστών χρησιμοποιούν τα δίκτυα άλλων χωρών, ώστε να εξυπηρετήσουν τις κινητήριες ανάγκες του κοινού τους, με αποτέλεσμα η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία να μην μπορεί να αποκρυφθεί. Έτσι, κάθε καινούρια ιδέα αναβάθμισης αυτών των οχημάτων, βλέπουμε να γίνεται σταδιακά πραγματικότητα σε κάθε τρένο του πλανήτη, όπως είναι για παράδειγμα το έντονο αεροδυναμικό σχήμα που το έχουν υιοθετήσει οι περισσότερες, αν όχι όλες, οι κατασκευάστριες εταιρίες τρένων του κόσμου, αφού προσδίδει ταχύτητα στο όχημα με αποτέλεσμα να φέρνει εις πέρας πιο γρήγορα τα καθημερινά του δρομολόγια.

Άλλωστε, είναι γνωστό πως οι εταιρείες που προμηθεύουν τους συρμούς είναι σχετικά λίγες και συνήθως κατασκευάζουν τα ίδια περίπου τρένα, αναλόγως της τεχνολογίας της κάθε εποχής, για όλες τις χώρες διεθνώς.

Η Γαλλία δικαίως θεωρείται η χώρα στην οποία ξεκίνησε η συστηματική έρευνα για τα τρένα υψηλότερης ταχύτητας. Από το 1950 και μετά, οι Γάλλοι προσπαθούσαν να επιτύχουν την αύξηση του κατώτατου ορίου ταχύτητας, αφού διέκριναν πως η ταχύτητα ήταν βασικός παράγοντας ώστε να υπάρξει περαιτέρω βελτίωση στον σιδηροδρομικό κλάδο. Αξίζει να αναφερθεί πως το όριο το 1962, ήταν στα 160 χιλιόμετρα την ώρα. Οι Γερμανοί επίσης βοήθησαν στις εξελίξεις, αφού ήταν οι πρώτοι που λειτούργησαν συρμούς τακτικά σε αυτό το όριο ταχύτητας. Ο Γερμανικός Ομοσπονδιακός Σιδηρόδρομος ή αλλιώς Deutsche Bahn, αναγνώρισε επίσης την ανάγκη σταδιακής αναβάθμισης των γραμμών, καθώς αν βελτιώνονταν μόνο τα τρένα, τα δρομολόγια θα κέρδιζαν σε ταχύτητα και θα έχαναν σε ασφάλεια, αφού οι σιδηροτροχιές θα φθείρονταν περισσότερο με τα νέα δεδομένα.

Τα παραπάνω, οδήγησαν στην σταδιακή βελτίωση των γραμμών, ώστε να φιλοξενηθούν τρένα υψηλότερης ταχύτητας, σε περιοχές όπως η Ιαπωνία και η Ευρώπη. Το 1976, η Γαλλία παρουσίασε το πρώτο της σχέδιο σχετικά με την ανάπτυξη των συρμών, με το μοντέλο LGV. Η μέση ταχύτητά του ήταν τα 214 χιλιόμετρα την ώρα και συνέδεε την Λυών με το Παρίσι σε μόλις δύο ώρες.





**Εικόνα 54.** Ένα από τα πολλά LGV του σιδηροδρόμου της Γαλλίας. Σταδιακά αντικαταστάθηκαν από το μοντέλο TGV, που αποτελούσε την βελτιωμένη έκδοση του συγκεκριμένου τρένου

Ακολούθησε το μοντέλο TGV, που μέχρι το 2007 κρατούσε τα πρωτεία μέγιστης ταχύτητας οχήματος με ρόδες, αφού σε πειραματικές διαδρομές άγγιζε τα 575 χιλιόμετρα την ώρα. Το δίκτυο σταδιακά επεκτάθηκε και το Γαλλικό τρένο μπορούσε να συνδέσει πόλεις, όχι μόνο στην Γαλλία αλλά και σε άλλες χώρες της Ευρώπης. Εξαιτίας της μεγάλης επιτυχίας του TGV, και άλλες Ευρωπαϊκές χώρες άρχισαν να κατασκευάζουν τα δικά του τρένα υψηλής ταχύτητας, όπως η Ιταλία, το Βέλγιο, Η Γερμανία και η Ισπανία. Στην τεχνολογία του TGV, στηρίχθηκαν τα περισσότερα τρένα των άλλων χωρών, αφού αποτελούσε ένα από τα πιο διαδεδομένα σχέδια στην Ευρώπη.



Εικόνα 55. Τρένα TGV στον σταθμό της Λυών

Η εξέλιξη του TGV είναι το AGV, που παρουσιάζει μία σημαντική διαφορά με το προηγούμενο μοντέλο. Αντί τα βαγόνια να σέρνονται από μία γρήγορη εμπρόσθια μηχανή, η ισχύς που παράγεται από τις μηχανές, διανέμεται ισάξια κάτω από το έδαφος των επιβατικών βαγονιών. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλότερη ταχύτητα και μεγαλύτερος βαθμός σταθερότητας. Επίσης, εξοικονομείται χώρος από την κατάργηση των βαγονιών της μηχανής, αφού δημιουργούνται θέσεις για περισσότερους επιβάτες, ενώ λόγω του ότι είναι ελαφρύτερο, καταναλώνει τουλάχιστον 30% λιγότερη ενέργεια, σε σχέση με το τωρινό TGV.



**Εικόνα 56. Το βελτιωμένο τρένο AGV**

Ένα από τα πιο εντυπωσιακά τρένα υψηλής ταχύτητας είναι το Γερμανικό ICE 3, που δεν έχει να παρουσιάσει βαγόνια κινητήριας δύναμης, ώστε να επιτρέπει σε περισσότερους επιβάτες να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες του. Ο χειριστής του συγκεκριμένου τρένου, χωρίζεται από τους επιβάτες μόνο από έναν υαλοπίνακα, ώστε να δίνεται στο κοινό η δυνατότητα να παρακολουθεί τα όργανα και την διαδρομή. Η ταχύτητά του είναι κατά μέσο όρο στα 330 χιλιόμετρα την ώρα, ενώ ως σχέδιο θυμίζει αεροσκάφος, εξαιτίας του μοναδικού του αεροδυναμικού σχήματος.



**Εικόνα 57. Το εξωτερικό το ICE 3 έχει βασιστεί στα επιβατικά αεροσκάφη**





**Εικόνα 58. Το εσωτερικό του τρένου ICE 3**

Το εσωτερικό του είναι προσαρμοσμένο στις ανάγκες του σύγχρονου ταξιδιώτη, αφού προσφέρει υποδοχές ρεύματος, μηχανήμα FAX, δημόσια τηλέφωνα και ταχυδρομική θυρίδα. Επίσης, διατίθενται δωμάτια συσκευέων με τέσσερα ή πέντε καθίσματα, που χωρίζονται από το υπόλοιπο τρένο με υαλοπίνακες, ενώ είναι εξοπλισμένα με όλες τις απαραίτητες ηλεκτρονικές συσκευές. Εξαιτίας της μεγάλης επιτυχίας του συγκεκριμένου μοντέλου, αναμένεται αναβάθμιση με την ονομασία ICE 4.

Η Ιταλία παρουσίασε το 1996 το ETR 500 και αποτελεί εξέλιξη του ETR 500 που κάλυπτε την διαδρομή Ρώμη – Φλωρεντία από το 1990 έως το 1992. Εξαιτίας του εξωτερικού χρώματος και σχεδιασμού, γίνονται πιο έντονες οι καμπύλες του αμαξώματος, καλύπτονται οι περιοχές που μαζεύουν ρύπους, με αποτέλεσμα να μην γίνεται ορατοί από το κοινό και κρύβονται οπτικά οι σχισμές από τους εξερισμούς. Είναι ένα από τα πιο φινετσάτα τρένα υψηλής ταχύτητας που έχει να επιδείξει η Ευρωπαϊκή τεχνολογία. Το εσωτερικό του θυμίζει σε πολλές περιπτώσεις επιβατικό αεροσκάφος, εξαιτίας των υλικών που χρησιμοποιούνται και των ντουλαπιών που είναι υπερυψωμένα σε σχέση με τις θέσεις των επιβατών. Το ETR 500 μπορεί να μεταφέρει σε κάθε δρομολόγιο σε όλη την Ιταλία μέχρι και 700 επιβάτες, με την μέση του ταχύτητα να αγγίζει τα 300 χιλιόμετρα την ώρα.



**Εικόνα 59. Το ETR 500, που έρχεται από την Ιταλία**

Το Ισπανικό Talgo 350, σχεδιάστηκε ώστε να είναι το ταχύτερο τρένο της Ευρώπης και να ξεπεράσει σε ταχύτητα ακόμη και το Γαλλικό TGV. Δημιουργήθηκε ώστε να καλύπτει την διαδρομή Βαρκελώνη – Μαδρίτη σε μόλις δύομιση ώρες, με μία ταχύτητα που κατά μέσο όρο θα άγγιζε τα 350 χιλιόμετρα την ώρα.

Δυστυχώς, εξαιτίας τεχνικών προβλημάτων μπόρεσε να φτάσει την ταχύτητα των 200 χιλιομέτρων την ώρα, αν και σταδιακά με την επίλυση κάποιων ζητημάτων μπόρεσε το 2007 να κινείται με την ταχύτητα των 300 χιλιομέτρων την ώρα. Λόγω αυτών των προβλημάτων, περιορίστηκε στην διαδρομή Lleida – Σαραγόσα – Μαδρίτη, αν και γίνονται προσπάθειες ώστε να φτάσει σε ταχύτητα τα 330 χιλιόμετρα την ώρα και να συνδέσει την γραμμή για την οποία κατασκευάστηκε (Μαδρίτη – Βαρκελώνη).



**Εικόνα 60. Το Ισπανικό Talgo 350, που κατασκευάστηκε για να καλύπτει ταχύτατα την διαδρομή Βαρκελώνη - Μαδρίτη**

Οι Ιάπωνες όμως, φαίνεται πως έδωσαν την απαιτούμενη προσοχή ώστε να αναπτυχθούν τα πιο γρήγορα τρένα, χάρη στο σιδηροδρομικό δίκτυο και τα τρένα υψηλών ταχυτήτων Σινκανσέν. Οι γραμμές εκτείνονται από το Τόκυο μέχρι την Οσάκα, ενώ οι συρμοί μπορούν να ταξιδεύουν με πάνω από 300 χιλιόμετρα την ώρα.

Στην συγκεκριμένη χώρα, τα τρένα έχουν να αντιμετωπίσουν διαφορετικές καταστάσεις, λόγω της υψηλής συμφόρησης και της πληθυσμιακής πυκνότητας της Ιαπωνίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι σιδηρόδρομοι να μπορούν να ανταγωνιστούν με μεγάλη επιτυχία τους άλλους τρόπους χερσαίας μεταφοράς. Η κυριαρχία τους οφείλεται στην ταχύτητα, την ακρίβεια και την συχνότητα. Αυτό τους οδηγεί να έχουν την πλειοψηφία του μεριδίου της αγοράς, σε σχέση με τα αεροπλάνα, αφού πολλές φορές έχει υπολογιστεί πως αγγίζουν το 88%.

Τα συγκεκριμένα τρένα χρησιμοποιούν ένα ειδικό δίκτυο διαδρομών, ώστε να αποφεύγουν την αργή κυκλοφορία των συμβατικών τρένων της Ιαπωνίας. Την διαδρομή Τόκυο – Οσάκα, την ακολουθούν περίπου 400.000 επιβάτες την μέρα, με την μέση απόκλιση κάθε δρομολογίου να είναι μόλις τα 36 δευτερόλεπτα.

Ο κύριος ανταγωνιστής των τρένων Σινκανσέν, είναι οι αεροπορικές εταιρείες, παρόλο που τα τρένα φαίνεται να παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα εξαιτίας της πολυτέλειας, της ταχύτητας και των φτηνότερων εισιτηρίων.





**Εικόνα 61. Τρένα του δικτύου Σινκανσέν**

Για να μεγιστοποιηθεί ο ωφέλιμος εσωτερικός χώρος για τους επιβάτες, τα τρένα έχουν κυρτά πλάγια τοιχώματα, κάτι που τα βοηθάει επίσης στο να έχουν μικρότερη αλληλεπίδραση με τα επικείμενα τρένα που έρχονται από πλαϊνές γραμμές, δίνοντας την αίσθηση στο κοινό πως ταξιδεύουν με επιβατικό αεροσκάφος. Ανάμεσα στο εξωτερικό και το εσωτερικό περίβλημα χρησιμοποιείται άργιλος, που προσφέρει εξοικονόμηση στο βάρος και αύξηση της σταθερότητας επάνω στις γραμμές.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως οι Ιάπωνες σχεδιάζουν τα τρένα τους με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνεται συνεχώς η λειτουργία τους και ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται η μεταφορά περισσότερων επιβατών και η μεγιστοποίηση της ταχύτητας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ – Η ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΠΟΜΠΟΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ MAGLEV

### 6.1 Είδη ηλεκτροκίνητων συρμών

Ο όρος «Locomotive» (κινητήρια μονάδα), χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε αυτοκινούμενο όχημα, που μπορεί να σύρει ή να κινήσει βαγόνια συρμού επάνω σε σιδηροδρομικές γραμμές. Φυσικά, η δύναμη της κίνησης μπορεί να ενσωματωθεί σε οχήματα που μεταφέρουν επιβάτες και εμπορεύματα, αν και σε αυτές τις περιπτώσεις παρέχεται η μονάδα Locomotive. Η κινητήρια αυτή μονάδα, περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τους μηχανισμούς που δημιουργούν ισχύ και τους μηχανισμούς που μεταδίδουν την ισχύ στους κινητήριους τροχούς. Στην περίπτωση της ηλεκτράμαξας, περιλαμβάνεται μηχανισμός μετατροπής της ισχύος, που προέρχεται από το ρεύμα, αντί για τον μηχανισμό δημιουργίας ισχύος.

Στην εποχή μας, οι κινητήριες μονάδες έχουν δύο κύριες πηγές ισχύος:

- Το ηλεκτρικό ρεύμα
- Το πετρέλαιο (Diesel).

Ένας ηλεκτροκίνητος συρμός ολοκληρώνεται με την παρουσία τεσσάρων ειδών βαγονιών ακόμη, και πιο συγκεκριμένα:

- Το βαγόνι κινητήρα
- Το βαγόνι ενέργειας
- Το βαγόνι ελέγχου και χειρισμού
- Και ένα απλό επιπλέον βαγόνι.

Το παραπάνω είναι μία τυπική διάταξη, αφού σύμφωνα με την παγκόσμια βιβλιογραφία έχουμε και διαφορετικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα το να χρησιμοποιείται ένα βαγόνι για κινητήρα και ενέργεια ταυτόχρονα.

Στο βαγόνι κινητήρα, υπάρχουν κινητήρες έλξης που παρουσιάζουν κοινή τεχνολογία με αυτήν της ενέργειας, για να αποφεύγονται οι συνδέσεις μεταξύ των βαγονιών που μεταφέρουν την υψηλή τάση.

Στο βαγόνι ενέργειας, εμπεριέχεται όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για την συλλογή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ο παντογράφος που σχετίζεται με τους μετασχηματιστές και τα εναέρια συστήματα και ο αγωγός επαφής που αφορά την τρίτη σιδηροτροχιά.

Τέλος, στο βαγόνι ελέγχου και χειρισμού, συμπεριλαμβάνεται ο θάλαμος από τον οποίο ελέγχεται πλήρως ο συρμός. Στις αμαξοστοιχίες ηλεκτρισμού, υπάρχουν δύο τέτοιοι θάλαμοι, δηλαδή ένας σε κάθε άκρη.

## **6.2. Τα στοιχεία της ηλεκτροκίνησης**

Από την πρώτη στιγμή της δημιουργίας της μέχρι και στις μέρες μας, η ηλεκτροκίνηση έχει να παρουσιάσει ένα μεγάλο σύνολο διαφορετικών χαρακτηριστικών. Η διεθνής σκηνή έχει να επιδείξει μία μεγάλη ποικιλία συστημάτων έλξης που βασίζονται στην ηλεκτροκίνηση και που έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με την διαθέσιμη τεχνολογία της κάθε εποχής. Είναι άλλωστε χαρακτηριστικό πως πολλές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις έχουν κατασκευαστεί εδώ και εκατό χρόνια, ενώ η αλματώδης ανάπτυξη της σιδηροδρομικής ηλεκτροκίνησης παρατηρείται ιδιαίτερα κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια. Σε αυτήν την ανάπτυξη συντέλεσε σε μεγάλο βαθμό η παρουσία των μικροεπεξεργαστών και η αναβάθμιση της ηλεκτρονικής ισχύος.

Φυσικά, ότι ήταν αποδεκτό κατά τα πρώτα χρόνια παρουσίας του σιδηροδρόμου, αντικαταστάθηκε από θεμελιώδης αλλαγές στον σχεδιασμό, την διαχείριση, την κατασκευή και την λειτουργία του κλάδου.

### **6.2.1. Τροφοδοσία**

Στον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο ισχύουν κάποιοι κατασκευαστικοί κανόνες, που θα πρέπει να ακολουθούνται ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη λειτουργία του. Ένας από αυτούς τους κανόνες αφορά την συνεχόμενη τροφοδοσία του με ρεύμα, ενώ είναι

λογικό πως και η κάθε ηλεκτροκίνητη αμαξοστοιχία θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε αυτήν την τάση οποιαδήποτε στιγμή. Το ρεύμα θα πρέπει να είναι οικονομικό, φιλικό και ασφαλές προς τους χρήστες.

Κατά την διάρκεια της εγκατάστασης, υπάρχουν δύο επιλογές και πιο συγκεκριμένα, το συνεχές ρεύμα - DC και το εναλλασσόμενο - AC. Έχει παρατηρηθεί πως με την χρήση ρεύματος DC επιτυγχάνεται η απλούστευση της χρήσης σε σχέση με την έλξη, ενώ στην περίπτωση του ρεύματος AC, παρατηρείται υψηλότερη απόδοση σε μεγάλες αποστάσεις και πιο μικρό κόστος εγκατάστασης. Το αρνητικό του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος έγκειται στο γεγονός ότι είναι πιο περίπλοκο στον έλεγχό του.

Η διανομή και η μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται πάντα σε όλο το μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής με δύο μεθόδους, δηλαδή είτε μέσω μίας ειδικής σιδηροδρομικής δοκού που βρίσκεται κοντά στις ήδη υπάρχουσες γραμμές, είτε μέσω καλωδίων που βρίσκονται ψηλά στον αέρα. Στην περίπτωση της τρίτης γραμμής έχουμε αποκλειστική χρησιμοποίηση συνεχούς ρεύματος, ενώ στην περίπτωση της εναέριας καλωδίωσης, έχουμε την χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος. Είναι γεγονός όμως πως και στις δύο μεθόδους είναι απαραίτητη η παρουσία ενός συλλέκτη συνδεδεμένου με την αμαξοστοιχία, που θα έχει συνεχή επαφή με την πηγή της ηλεκτρικής τάσης.

Στην περίπτωση της τρίτης γραμμής, χρησιμοποιείται μία μικρή συσκευή που βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με αυτήν και το τρένο, που λειτουργεί ως συλλέκτης (το λεγόμενο «παπούτσι»), ενώ στην περίπτωση του συστήματος της εναέριας καλωδίωσης χρησιμοποιείται ο παντογράφος, που έχει μόνιμη επαφή με την πηγή ενέργειας. Η επιστροφή του ρεύματος πίσω στον υποσταθμό, πραγματοποιείται μέσω της ράγας.

### **6.2.2. Η τροφοδότηση μέσω τρίτης γραμμής**

Όταν μιλάμε για την χρησιμοποίηση τρίτης σιδηροτροχιάς, γραμμής ή ράγας, τότε αναφερόμαστε στο μέσο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έλξης, μέσω μίας πρόσθετης

σιδηροδρομικής γραμμής. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η επιπλέον γραμμή τοποθετείται έξω από τις κύριες σιδηροτροχιές, προς την άκρη των στρωτήρων, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί να τοποθετείται στο κέντρο και πιο συγκεκριμένα ανάμεσα στις κύριες ράγες. Αυτή η τρίτη γραμμή, βρίσκεται πάνω σε μονωμένα στηρίγματα ή κεραμικούς μονωτήρες, που έχουν μεταξύ τους τυπική απόσταση τα 3 μέτρα.

Το σύστημα που βασίζεται στην τρίτη γραμμή για τροφοδοσία, προσφέρει συνεχές ρεύμα στον σιδηρόδρομο. Όπως είπαμε και σε προηγούμενη ενότητα, ένα «παπούτσι» που είναι τοποθετημένο στο τρένο, λειτουργεί ως συλλέκτης του ρεύματος, κατά το γλίστημά του πάνω στην επιπλέον γραμμή του συστήματος. Αξίζει να αναφερθεί πως το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται κυρίως στους αστικούς σιδηρόδρομους, ενώ στην χώρα μας, τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα ύπαρξης αυτής της τεχνολογίας είναι οι ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι Αθήνας – Πειραιά και το μετρό.



Εικόνα 62. Σύστημα ηλεκτροκίνησης με την χρησιμοποίηση τρίτης γραμμής

Ως «άνω επαφή» ορίζεται το μέρος της γραμμής του σιδηροδρόμου που βρίσκεται σε επαφή με το λεγόμενο «παπούτσι» του τρένου, που έχει ως αποτέλεσμα την συλλογή

ηλεκτρικού ρεύματος. Το συγκεκριμένο σύστημα χαρακτηρίζεται από την απλότητά του, αλλά παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα.

Το μεγαλύτερο θέμα του κάθε συστήματος και της κάθε χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας είναι το κόστος. Σε σχέση με το εναέριο σύστημα τροφοδοσίας, η τρίτη τροχιά αποτελεί πιο φτηνή λύση, ενώ και είναι και σημαντικά μικρότερη η οπτική όχληση προς το περιβάλλον.

Το σύστημα της τρίτης γραμμής όμως, εμφανίζει υψηλό κίνδυνο ηλεκτρικού σοκ, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτά τα συστήματα υψηλών τάσεων άνω των 1.500 V. Το ρεύμα υψηλής τάσης που χρησιμοποιείται εν τέλει, παρουσιάζει σημαντικότερες απώλειες ισχύος, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ανά τακτά σημεία διαφόρων υποσταθμών τροφοδοσίας ρεύματος.

Με το σύστημα τροφοδότησης που προέρχεται από την τρίτη γραμμή, επιτυγχάνεται η απομόνωση από ανισόπεδες διαβάσεις, με αποτέλεσμα να έχουμε ασφάλεια για τους πεζούς. Αν τυχόν υπάρχουν όμως τέτοιου είδους διαβάσεις, τότε τοποθετούνται ειδικοί μηχανισμοί που αποτρέπουν το κοινό να περάσει τις ράγες.

Εάν διακοπεί η ηλεκτροδότηση της τρίτης γραμμής, τότε έχουμε σταδιακό φρενάρισμα του τρένου, ενώ λόγω της μηχανικής ανάγκης συνεχούς επαφής του «παπουτσιού» με την ράγα, ο συρμός δεν μπορεί να ξεπερνάει σε ταχύτητα τα 160 χιλιόμετρα την ώρα.

Γενικά, τα συστήματα που βασίζονται στην τρίτη ράγα, παρουσιάζουν δυσλειτουργία όταν επικρατούν άσχημες καιρικές συνθήκες όπως η χιονόπτωση και ο παγετός. Γι αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται ειδικά τρένα, που καθαρίζουν τις σιδηροτροχιές και την τρίτη ράγα, περνώντας την επιφάνειά της με ένα ελαιώδες υγρό, που επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία των ηλεκτροκίνητων συρμών.

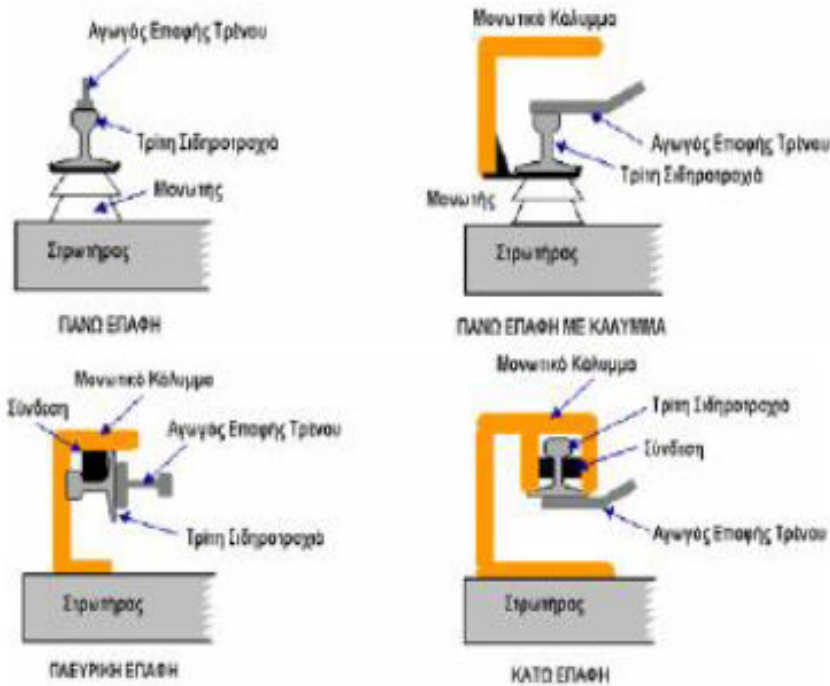
Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε με χαρακτηριστικό κίτρινο χρώμα την τρίτη ράγα, ενώ κάτω από τις μπροστινές πόρτες του συρμού διακρίνεται το «παπούτσι», που εξέρχει λίγο από το τρένο και φαίνεται πως εφάπτεται με την γραμμή.



**Εικόνα 63. Χαρακτηριστική εικόνα από τον συρμό του Μετρό της Αθήνας. Κυκλωμένο διακρίνεται το «παπούτσι» - συλλέκτης ρεύματος**

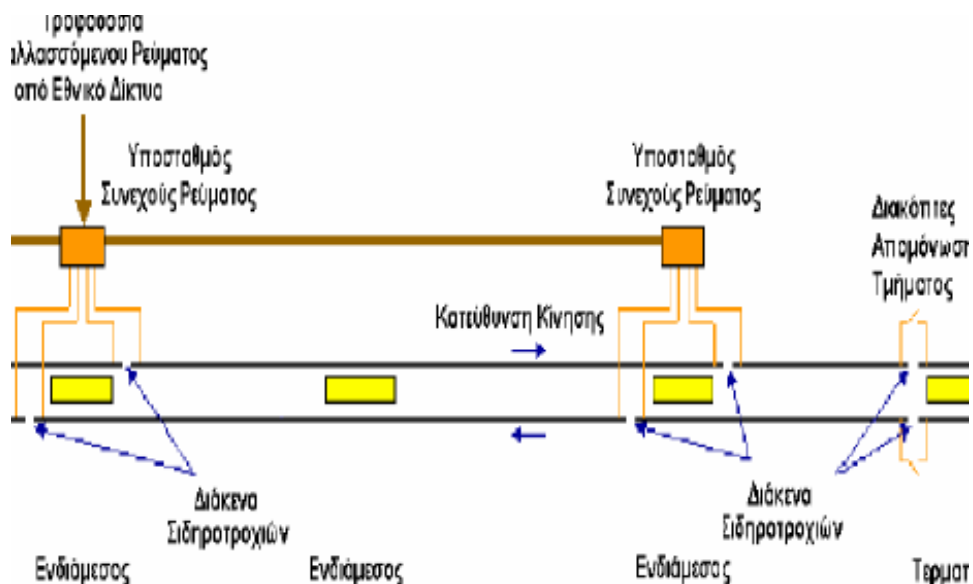
Το «παπούτσι» DC, χαρακτηρίζεται ως «συλλέκτης άνω επαφής» και μπορεί να ανυψώνεται από απομακρυσμένες εγκαταστάσεις ανύψωσης. Αυτό συμβαίνει διότι, πολλές φορές το «παπούτσι» πρέπει να μετακινηθεί και να μην έρχεται σε επαφή με την τρίτη ράγα, εάν παραστεί ανάγκη ή κάποια βλάβη. Ο συλλέκτης θα πρέπει να μπορεί να διακόψει την επαφή του, ώστε να αποκαθίσταται η τάση στην γραμμή ή στο ίδιο το τρένο. Φυσικά, όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο, τα υπόλοιπα «παπούτσια» του ίδιου κυκλώματος θα πρέπει να απομονώνονται, εκτός εάν υπάρχει μελέτη ώστε σε περίπτωση βλάβης να διακόπτεται η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από ολόκληρο το τμήμα. Στην περίπτωση αυτή όμως, είναι λογικό πως μπορεί να επηρεαστούν και οι άλλες αμαξοστοιχίες που διέρχονται.

Τα «παπούτσια», που έρχονται σε επαφή με την τρίτη ράγα από την κάτω της πλευρά ή από τα πλάγια, πιέζονται για να την ακουμπήσουν με την χρησιμοποίηση ειδικών ελατηρίων.



Εικόνα 64. Παπούτσι επαφής τρίτης ράγας

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το απλοποιημένο διάγραμμα τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος με τρίτη ράγα.



Εικόνα 65. Απλοποιημένο διάγραμμα υποσταθμού συνεχούς τάσης τροφοδοσίας συστήματος ηλεκτροκίνησης με τρίτη ράγα



### 6.2.3. Η τροφοδότηση μέσω εναέριων γραμμών

Η εναέρια γραμμή αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή τροφοδοσίας του ηλεκτρικού ρεύματος σε σιδηροδρομικό δίκτυο. Τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος είναι οι αγκυρώσεις, τα άκαμπτα πλαίσια και οι στύλοι που είναι κατασκευασμένοι από σκυρόδεμα ή μέταλλα. Η γραμμή επαφής από την άλλη, τοποθετείται έπειτα από εξονυχιστική μελέτη, αφού θα πρέπει να υπολογιστούν διάφοροι παράγοντες όπως η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της σιδηροδρομικής ράγας, τα σημεία τοποθέτησης της τροφοδοσίας και το ονομαστικό ρεύμα.

Ο αγωγός επαφής, παρουσιάζει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι κατασκευασμένος από σκληρό ηλεκτρολυτικό χαλκό και χαρακτηρίζεται από την υψηλή μηχανική του αντοχή στην διάβρωση και την φθορά. Για να ολοκληρωθεί το σύστημα, τοποθετούνται μεταξύ του φέροντα αγωγού και του αγωγού επαφής, εγκάρσιες συνδέσεις με ευλύγιστο χάλκινο καλώδιο, ανά 300 μέτρα περίπου, ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή συμμετοχή του φέροντα αγωγού στην αγωγιμότητα.

Οι εναέριοι αγωγοί ή αλλιώς εναέριες γραμμές, μεταφέρουν την ενέργεια του ρεύματος σε τρόλεϊ, τρένα και τραμ από τους υποσταθμούς παροχής της τάσης. Τα γνωστότερα συστήματα αυτού του είδους της τεχνολογίας είναι τα παρακάτω:

- Το εναέριο σύστημα επαφής ή αλλιώς ο εξοπλισμός εναέριας γραμμής (Overheadlineequipment – OLEorOHLE)
- Η εναέρια καλωδίωση (Overhead Wiring – OHW)
- Το Overhead Contact System – (OCS)
- Η αλυσοειδής καλωδίωση – Catenary που χρησιμοποιείται όμως μόνο στον Καναδά, τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και την Σιγκαπούρη.

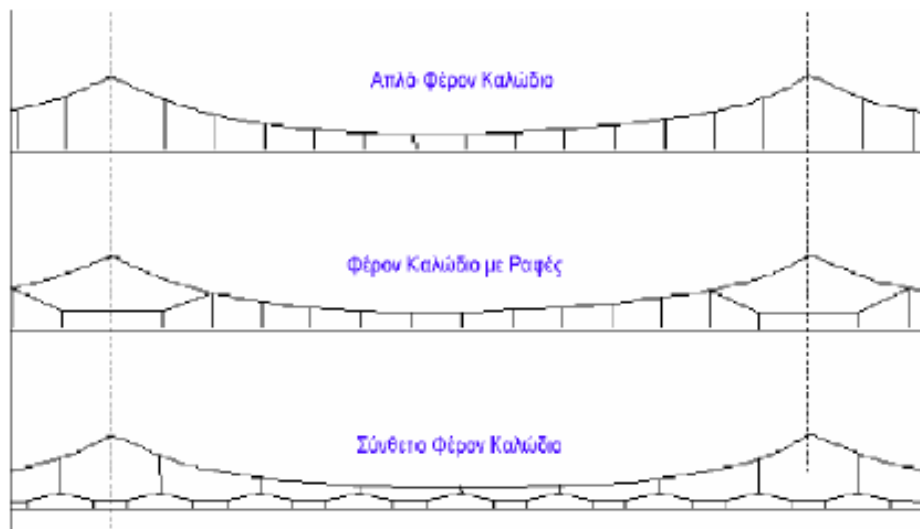
Το σύστημα της εναέριας γραμμής τροφοδοσίας, σχεδιάστηκε ώστε ένα ή περισσότερα καλώδια να καλύπτουν από ψηλά τις μηχανολογικές και ηλεκτρικές ανάγκες των τρένων, ενώ ταυτόχρονα θα παρέχουν συνεχόμενη σύνδεση με τους σταθμούς και τους υποσταθμούς τροφοδοσίας.

Παρακάτω θα μπορούσαμε να αναφέρουμε αναλυτικά, τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται μία εγκατάσταση που τροφοδοτείται μέσω ΕΓΕ ή αλλιώς μέσω της Εναέριας Γραμμής Επαφής. Πιο συγκεκριμένα:

- **Η αλυσοειδή.** Είναι το σύστημα ανάρτησης της ΕΓΕ, πάνω στο οποίο ο φέρον αγωγός στηρίζει τον αγωγό επαφής, μέσω κάποιων αναγκαίων αναρτήρων. Οι αναρτήρες είναι εύκαμπτα καλώδια που παρεμβάλλονται μεταξύ του φέροντος αγωγού και του αγωγού επαφής, ώστε να επιτευχθεί, μαζί με την χρησιμοποίηση αρπάγων, η μεταξύ τους στερέωση. Η αλυσοειδής είναι σύστημα που τρέχει κατά μήκος της σιδηροδρομικής τροχιάς σε ένα καθορισμένο ύψος, ενώ στηρίζεται από ειδικά χαλύβδινα στηρίγματα στην περίπτωση τεχνικών έργων, όπως οι σήραγγες, και από στύλους στην περίπτωση της ανοιχτής γραμμής.
- **Ο φέρον αγωγός ή αλλιώς αγωγός τροφοδοσίας.** Είναι ο αγωγός που βρίσκεται στερεωμένος πάνω στην αλυσοειδή κατασκευή και λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να τροφοδοτεί τα διαδοχικά σημεία τροφοδοσίας, που βρίσκονται κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής.
- **Ο αγωγός επαφής.** Είναι ο αγωγός όπου μέσω αυτού πραγματοποιείται η λήψη του ρεύματος από το τρένο, χάρη στην συνεχή επαφή με τον παντογράφο.
- **Ο αγωγός ενίσχυσης ή αλλιώς παράλληλος τροφοδότης.** Είναι ο αγωγός που «γειτονεύει» με τον αγωγό επαφής. Οι δύο τους συνδέονται μεταξύ τους ανά διαστήματα, ώστε να επιτυγχάνεται η αύξηση της ενεργής διατομής του τροφοδότη.
- **Το κύκλωμα επιστροφής.** Περιλαμβάνει όλους τους αγωγούς εκείνους που αφορούν την επιστροφή του ρεύματος έλξης, δηλαδή τον συλλεκτικό αγωγό ή αγωγό επιστροφής ρεύματος, τον αγωγό γειώσεως, τις σιδηροτροχιές, τον παντογράφο κ.α.
- **Το διακοπτικό υλικό.** Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνεται πέραν του διακοπτικού υλικού και ο εξοπλισμός για την επιτήρηση, την προστασία και

την συντήρηση του συστήματος, ενώ είναι τοποθετημένος σε κατασκευές αντίστοιχες με αυτές που υπάρχουν στην ΕΓΕ.

- **Εγκαταστάσεις.** Εδώ συμπεριλαμβάνονται οι στύλοι, η θεμελίωση και οι κατασκευές ανάρτησης, που χρησιμοποιούνται για να εξυπηρετήσουν την ανάρτηση, την στήριξη, την ευθυγράμμιση, την μόνωση και την τάνιση τόσο του αγωγού επαφής, όσο και των υπολοίπων αγωγών.



Εικόνα 66. Αλυσοειδής ανάρτηση καλωδίων

Λόγω της καμπύλης που δημιουργείται από το υποστηρικτικό καλώδιο, οι εναέριοι αγωγοί ονομάζονται αλυσοειδής, ενώ αξίζει να αναφερθεί πως σχηματίζουν μία σύνθετη γεωμετρία. Ο συγκεκριμένος αγωγός, στηρίζεται με οριζόντιο προσανατολισμό, ενώ τεντώνεται και τραβιέται από τα πλάγια, ώστε να επιτυγχάνεται το να ακολουθεί τις σιδηροδρομικές γραμμές. Το μήκος του ορίζεται συνήθως στα 1.000 με 1.500 μέτρα, αναλόγως τους εύρους των θερμοκρασιών που επικρατούν στην κάθε περιοχή. Για να εξασφαλιστεί η σίγουρη επαφή του με τον παντογράφο, ο αγωγός τοποθετείται στο κέντρο της σιδηροδρομικής ράγας.

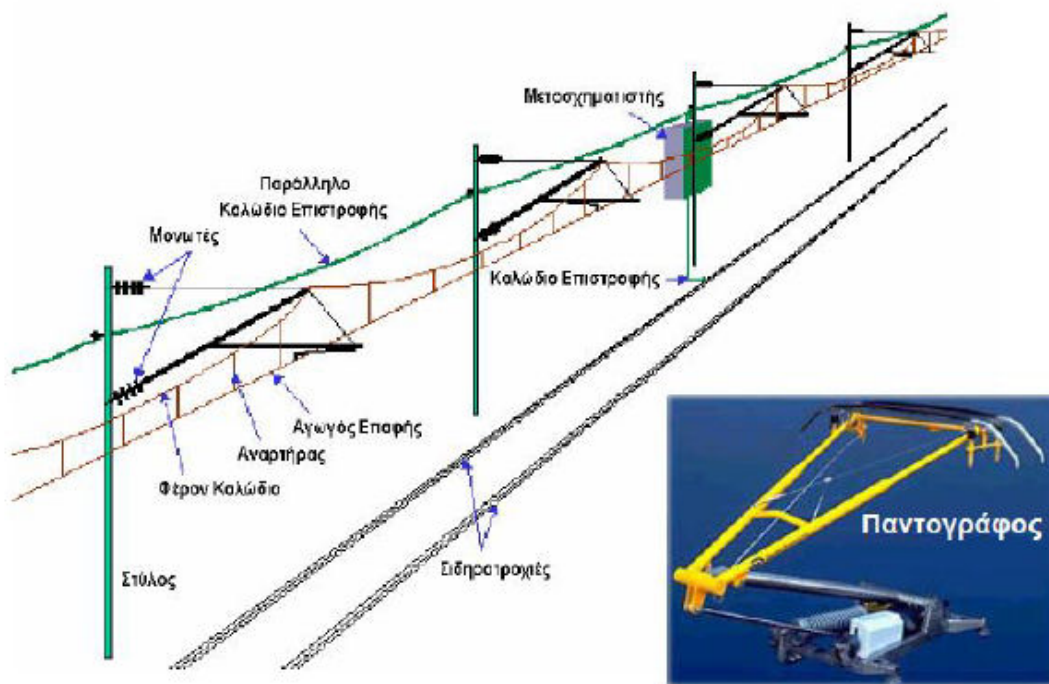
Ο μηχανικός Stanescu κατέγραψε στα γραπτά του πως, ο αγωγός επαφής οφείλει να παρουσιάζει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή μηχανική αντοχή απέναντι στην διάβρωση και την φθορά και να είναι κατασκευασμένος από σκληρό ηλεκτρολυτικό χαλκό. Επίσης θα πρέπει να εγκαθίστανται εγκάρσιες συνδέσεις με ευλύγιστο

καλώδιο χαλκού, μεταξύ του φέροντα αγωγού και του αγωγού επαφής, ανά 300 μέτρα περίπου, για να εξασφαλίζεται η ορθή συμμετοχή στην αγωγιμότητα του φέροντα αγωγού.

Το βασικότερο πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί σε ένα σύστημα εναέριας ηλεκτροδότησης είναι το να δημιουργηθεί κύμα στο σύρμα από την επαφή του πρώτου παντογράφου του οχήματος. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα, οι παντογράφοι που ακολουθούν να μην κάνουν επαφή και να μην ηλεκτροδοτούνται. Αυτό το ζήτημα είναι ακόμη πιο μεγάλο, στην περίπτωση των συρμών υψηλής ταχύτητας. Οι Γάλλοι έλυσαν αυτό το πρόβλημα στα τρένα TGV με την ύπαρξη ενός μονάχα παντογράφου στα μοντέλα τους.

Γενικά, οι εναέρια γραμμές μεταφοράς ηλεκτροδοτούνται τμηματικά. Τα τμήματα αυτά όμως στην περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με τα τμήματα που ηλεκτροδοτούνται με συνεχές ρεύμα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος με τρίτη γραμμή.

Μέσω των μονωτών, όλα τα τμήματα τροφοδοσίας είναι απομονωμένα το ένα από το άλλο. Η παρακάτω εικόνα του συστήματος είναι ενδεικτική:



Εικόνα 67. Εναέριο σύστημα ηλεκτροδότησης

Για να μπορούν τα ηλεκτροκίνητα τρένα να συλλέγουν την ενέργεια που προέρχεται από τις εναέριες γραμμές, χρησιμοποιούν μία συσκευή που ονομάζεται παντογράφος. Αυτός ο μηχανισμός, πιέζει τον αγωγό επαφής προς το κάτω μέρος του χαμηλότερου καλωδίου του συστήματος. Οι συλλέκτες τάσης, χάρη στην ηλεκτρική τους αγωγιμότητα επιτρέπουν στο ρεύμα να περνά στο όχημα και κατόπιν να επιστρέφει στους σταθμούς τροφοδοσίας μέσω των σιδηροδρομικών γραμμών.

Αξίζει να αναφερθεί πως, στα δίκτυα που χρησιμοποιούν τέτοια συστήματα τροφοδότησης, μπορούν να κινηθούν κανονικά και οι αμαξοστοιχίες Diesel, χωρίς να παρουσιάζονται προβλήματα στην λειτουργία και την αποτελεσματικότητα του ηλεκτρικού συστήματος έλξης. Φυσικά, μπορεί το συγκεκριμένο σύστημα να είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο, αλλά έχει ως βασικό του αντίπαλο και άλλα παρόμοια συστήματα ηλεκτρικής έλξης, όπως είναι για παράδειγμα το σύστημα με την τρίτη γραμμή, που αναλύσαμε παραπάνω.

Στις νεότερες εγκαταστάσεις εναέριων συστημάτων τροφοδοσίας, χρησιμοποιείται η απλή ανάρτηση των καλωδίων, που τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η καλή επαφή με τον παντογράφο, ειδικά σε περιπτώσεις ταχείας κίνησης των συρμών. Με τον τρόπο αυτόν, μπορούν να ηλεκτροδοτηθούν τρένα που κινούνται ακόμη και με ταχύτητες της τάξεως των 200 χιλιομέτρων την ώρα.

Στα συστήματα που φιλοξενούν εναέριους αγωγούς εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι αναγκαίο να μειώνονται οι όποιες παρεμβολές στα καλώδια επικοινωνίας, κάτι που οδηγεί στο να πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις. Υπάρχει η περίπτωση να παρουσιαστεί πτώση τάσης, εάν ο αγωγός επικοινωνίας τοποθετηθεί παράλληλα με τις γραμμές που επιστρέφουν την τάση της εναέριας γραμμής. Εάν πάρουμε σαν δεδομένο και την απόσταση, τότε ο κίνδυνος για την ασφάλεια γίνεται μεγαλύτερος. Για να ξεπεραστούν τέτοιου είδους προβλήματα, εγκαθίστανται ενισχυτές της τάσης, που ονομάζονται μετασχηματιστές. Αυτοί τοποθετούνται σε ιστούς, σε τακτά διαστήματα κατά μήκος της ράγας και είναι συνδεδεμένοι με τους σταθμούς και υποσταθμούς τροφοδοσίας, σε ανάλογες φυσικά αποστάσεις. Χάρη στην λύση αυτή, επιτυγχάνεται η συνεχής απόδοση της τάσης που χάνεται.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάσει των όσων είδαμε στην παρούσα εργασία, μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ηλεκτροκίνηση και την αναβάθμισή της σε κίνηση με μαγνητική αιώρηση ή αλλιώς σε κίνηση με τεχνολογία Maglev.

Τα τρένα που βασίζονται στην τεχνολογία της αιώρησης, υπερέχουν ξεκάθαρα έναντι των συμβατικών ηλεκτροκίνητων τρένων καθώς και των ντιζελοκίνητων, αφού μπορούν να ξεπεράσουν σε ταχύτητα τα 500 χιλιόμετρα την ώρα, με αποτέλεσμα να μπορούν να πραγματοποιήσουν πολύ περισσότερα δρομολόγια. Ένα άλλο σημαντικό τους χαρακτηριστικό, είναι το ότι δεν μολύνουν το περιβάλλον, αφού δεν εκλύουν ρύπους προς την ατμόσφαιρα, σε κανένα σημείο της λειτουργίας τους.

Τα θετικά τους χαρακτηριστικά δεν τελειώνουν εδώ, αφού μπορούν να αντιμετωπίσουν πιο ικανοποιητικά τις άσχημες καιρικές συνθήκες που θα συναντήσουν, ενώ ακόμα και σε περιπτώσεις όπως είναι οι έντονες ανωφέρειες, δεν φαίνεται να χάνουν σημαντικό μέρος της ισχύς τους και της απόδοσής τους.

Ένας από τους Ευρωπαϊκούς στόχους που αφορούν τον σιδηροδρομικό κλάδο, αφορά την συγκοινωνιακή διασύνδεση των μεγαλύτερων Ευρωπαϊκών πόλεων με αμαξοστοιχίες υψηλών ταχυτήτων, όπως συμβαίνει στην Ιαπωνία. Οι Ιάπωνες αναγκάστηκαν να πραγματοποιήσουν ριζικές αλλαγές στο δίκτυό τους, ώστε να μπορέσουν να το μετατρέψουν σε ένα δίκτυο υψηλών ταχυτήτων, με την ονομασία Σινκανσέν. Εάν η Ευρωπαϊκή Ένωση καταφέρει να πραγματοποιήσει ένα παρόμοιο έργο, θα έχει καταφέρει να προσφέρει την δυνατότητα σε ένα ευρύ επιβατικό κοινό να ταξιδέψει γρηγορότερα εντός των συνόρων της Ευρώπης.

Επίσης βασικός στόχος είναι η προσπάθεια αναβάθμισης των δικτύων, ώστε οι ταξιδευτές να μεταβαίνουν στους προορισμούς τους σε μικρό χρονικό διάστημα και χωρίς να υπάρχουν ενδιάμεσες ανταποκρίσεις. Για να γίνει αυτό πραγματικότητα θα πρέπει όλες οι χώρες να αναλάβουν να δημιουργήσουν γραμμές υψηλών ταχυτήτων με μία κοινή τεχνολογία, που θα επιτρέπει από την μία την σύνδεση μεταξύ των μεγαλουπόλεων και από την άλλη το να μπορούν να κινηθούν όλα τα τρένα υψηλών

ταχυτήτων στις γραμμές, ανεξαρτήτου της εταιρείας που τα κατασκεύασε ή που τα χρησιμοποιεί.

Τα ζητήματα που προκύπτουν από μία τέτοια μελλοντική κίνηση είναι ποικίλα, όπως η έλλειψη κονδυλίων εξαιτίας της οικονομικής κρίσης που μαστίζει την Ευρώπη, η διαφορετική υποδομή των σιδηροδρομικών δικτύων από χώρα σε χώρα, ο διαφορετικός τρόπος τροφοδότησης των τρένων και τα διαφορετικά συστήματα σηματοδότησης.

Για να εξυπηρετηθούν τέτοιου είδους προγραμματισμοί, θα πρέπει να ακολουθούνται ορισμένοι κατασκευαστικοί κανόνες, που προέρχονται και πάλι από την Ανατολή και συγκεκριμένα από τους πολύ πιο έτοιμους, όσον αφορά τα τρένα Maglev, Ιάπωνες. Δηλαδή:

- Τα τρένα να είναι συνολικού μήκους έως 400 μέτρα
- Το ύψος των βαγονιών να βρίσκεται μεταξύ 550 και 760 mm
- Οι συρμοί να μπορούν να κινούνται προς τις δύο κατευθύνσεις
- Τα τρένα να μπορούν να ξεπεράσουν τα 300 χιλιόμετρα την ώρα σε ταχύτητα
- Το μέγιστο βάρος του συστήματος που αφορά την μαγνητική αιώρηση να μην ξεπερνάει τους 17 τόνους
- Τα συστήματα επικοινωνίας και η ασφάλεια των συρμών να πληρούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις των δικτύων της Ευρώπης
- Να έχουν την δυνατότητα να κινούνται σε όλα τα Ευρωπαϊκά συστήματα τροφοδοσίας και πιο συγκεκριμένα στα 15kV – 16.7 Hz, 25kV – 50 Hz, 1.5kV και 3kV συνεχούς τάσης.

Από τα παραπάνω φυσικά κατανοούμε την ανάγκη εκσυγχρονισμού του Ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου, σε θέματα όπως τα σύστημα επικοινωνιών, η αντοχή καταπόνησης των γραμμών για υψηλές ταχύτητες, τα συστήματα σηματοδότησης και η εγκατάσταση γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη τρένων Maglev, θα συμβάλλει στο να αποσυμφορηθεί η κυκλοφορία στους αυτοκινητόδρομους, ενώ θα μειωθεί σημαντικά και η εναέρια επιβατική



κυκλοφορία. Βασικός αρνητικός παράγοντας όμως, που λειτουργεί εναντίον της διάδοσης της τεχνολογίας μαγνητικής αιώρησης, είναι το μεγάλο κοστολόγιο που απαιτείται για την δημιουργία ενός ολοκαίνουριου σιδηροδρομικού δικτύου.

Για να καταφέρει να εξισορροπήσει το μεγάλο κόστος κατασκευής ενός νέου δικτύου, προωθείται από τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής ένα νέας τεχνολογίας τρένο με την ονομασία Seraphim – Segmented Rail Phase Deduction Motor, που συνδυάζει την τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης και της τεχνολογίας των τροχών. Δηλαδή, μπορεί να κινείται στην υπάρχουσα σιδηροδρομική υποδομή, και ταυτόχρονα να φτάνει τις υψηλές ταχύτητες του τρένου Maglev, όταν συναντήσει γραμμές τεχνολογίας μαγνητικής αιώρησης.

Μελλοντικά, τρένα Maglev θα μπορούσαν να κάνουν την εμφάνισή τους και στην χώρα μας, αν πάρουμε κυριολεκτικά την πρόταση διερεύνησης αυτής της περίπτωσης που αφορά την ανάπτυξη συστήματος Monorail στο λιμάνι του Πειραιά, ή την ανάπτυξη του συστήματος που αφορά την ηλεκτροκίνηση του σιδηροδρομικού δικτύου της Πελοποννήσου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Andriollo, M., Martinelli, G., Morini, A., & Tortella, A. (1996). FEM calculation of the LSM propulsion force in EMS-MAGLEV trains. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(5), 5064-5066.
2. Foo, E., & Goodall, R. M. (2000). Active suspension control of flexible-bodied railway vehicles using electro-hydraulic and electro-magnetic actuators. *Control Engineering Practice*, 8(5), 507-518.
3. Fujimoto, H., Kamijo, H., Higuchi, T., Nakamura, Y., Nagashima, K., Murakami, M., & Yoo, S. I. (1999). Preliminary study of a superconducting bulk magnet for the Maglev train. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9(2), 301-304.
4. Givoni, M. (2006). Development and Impact of the Modern High - speed Train: A Review. *Transport reviews*, 26(5), 593-611.
5. Gottzein, E., & Rogg, D. (1984). Status of high speed maglev train development in the FRG. In *International Conference on Maglev Transport: Now and for the Future*, Institution of Mechanical Engineers Conference Publications 1984-12, held at St. John's Hotel, Solihull, 9-10 October 1984 and sponsored by the Railway Division of the Institution of M.
6. Hasirci, U., Balikci, A., Zabar, Z., & Birenbaum, L. (2011). A novel magnetic-levitation system: design, implementation, and nonlinear control. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(1), 492-497.
7. Holmer, P. (2003). Faster than a speeding bullet train. *IEEE Spectrum*, 40(8), 30-34.
8. Howell, J. P. (1986). Aerodynamic response of maglev train models to a crosswind gust. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 22(2-3), 205-213.
9. Lee, H. W., Kim, K. C., & Lee, J. (2006). Review of maglev train technologies. *IEEE transactions on magnetics*, 42(7), 1917-1925.
10. Luguang, Y. (2002). Progress of high-speed Maglev in China. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 12(1), 944-947.

11. Meins, J., Miller, L., & Mayer, W. J. (1988). The high speed Maglev transport system TRANSRAPID. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24(2), 808-811.
12. Ono, M., Koga, S., & Ohtsuki, H. (2002). Japan's superconducting maglev train. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 5(1), 9-15.
13. Post, R. F. (2000). Maglev: a new approach. *Scientific American*, 282(1), 82-87.
14. Post, R. F., & Ryutov, D. D. (2000). The inductrack: A simpler approach to magnetic levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 10(1), 901-904.
15. Raghunathan, R. S., Kim, H. D., & Setoguchi, T. (2002). Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace sciences*, 38(6), 469-514.
16. Rossing, T. D., & Hull, J. R. (1991). Magnetic levitation. *The Physics Teacher*, 29(9), 552-562.
17. Schetz, J. A. (2001). Aerodynamics of high-speed trains. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33(1), 371-414.
18. Tyll, J. S., Liu, D., Schetz, J. A., & Marchman, J. F. (1996). Experimental studies of magnetic levitation train aerodynamics. *AIAA journal*, 34(12), 2465-2470.
19. Yasuda, Y., Fujino, M., Tanaka, M., & Ishimoto, S. (2004). The first HSST maglev commercial train in Japan. In *Proceedings of the 18th international conference on magnetically levitated systems and linear drives (MAGLEV 2004)* (pp. 76-85).
20. Wu, X. M. (2003). *Maglev train*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai.
21. Yadav, N. M., Gupta, A., Chaudhary, A., & DV Mahindru, M. (2013). Review of magnetic levitation (MAGLEV): A technology to propel vehicles with magnets. *Global Journal of Research In Engineering*, 13(7).
22. Yan, L. (2008). Development and application of the maglev transportation system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18(2), 92-99.
23. Youwen, Z., Saohua, W., & Kunlun, Z. (1999). A Study of Vertical Coupling Dynamics of EMS Maglev Train and Guideway Systems [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2.

24. Zhao, C. F., & Zhai, W. M. (2002). Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality. *Vehicle system dynamics*, 38(3), 185-210