



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Οχημάτων

Διπλωματική εργασία

Λουκά Μπαφατάκη

**Ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πεδήσεως σε
επιβατικά οχήματα**

Επιβλέπων: Δ. Κουλοχέρης, Λέκτορας

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή	4
1.1 Περίληψη.....	4
1.2 Abstract	5
1.3 Εισαγωγή.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Αρχή λειτουργίας της αναγεννητικής πεδήσεως	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα κατά την πέδηση	8
2.3 Αντίσταση κυλίσεως (R_f, R_r)	9
2.4 Αεροδυναμική αντίσταση (F_a)	10
2.5 Δύναμη λόγω βαρύτητας	12
2.6 Δύναμη πέδησης (F_f, F_r).....	12
2.7 Εξισώσεις δυνάμεων πέδησης	13
2.8 Ισχύς πεδήσεως.....	15
2.9 Κατανάλωση ενέργειας κατά την πέδηση	17
2.10 Κύκλος Πέδησης-Ανάκτησης ενέργειας-Φόρτισης συσσωρευτών.....	17
2.10.1 Κύκλος πέδησης	17
2.10.2 Κύκλος Ανάκτησης ενέργειας-Φόρτισης συσσωρευτών	19
2.11 Μέθοδοι αναγεννητικής πεδήσεως.....	20
2.11.1 Σειριακή αναγεννητική πέδηση	21
2.11.2 Αναγεννητική πέδηση για μέγιστη αίσθηση.....	22
2.11.3 Σειριακή πέδηση για μέγιστη ανάκτηση ενέργειας.....	23
2.12 Παράλληλη πέδηση.....	25
2.13 Συνεργασία της αναγεννητικής πέδησης με το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών (ABS).	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Η αναγεννητική πέδηση στους διαφόρους τύπους οχημάτων.....	30
3.1 Η αναγεννητική πέδηση σε αμιγώς θερμικά οχήματα	30
3.2 Η αναγεννητική πέδηση σε υβριδικά οχήματα	32
3.3 Διαχωρισμός υβριδικών οχημάτων με βάση τον χρησιμοποιούμενο θερμικό κινητήρα	32
3.3.1 Υβριδικά με θερμικό κινητήρα βενζίνης	32
3.3.2 Υβριδικά με θερμικό κινητήρα πετρελαίου	33
3.4 Διαχωρισμός υβριδικών οχημάτων με βάση την διάταξη των μονάδων προώθησης.....	34
3.4.1 Σειριακά υβριδικά	34

3.4.2 Παράλληλα υβριδικά	35
3.4.3 Υβριδικά διαχωρισμού ισχύος	37
3.5 Καταστάσεις λειτουργίας σε ένα σειριακό υβριδικό όχημα	38
3.5.1 Αμιγής θερμική ηλεκτροπαραγωγή	38
3.5.2 Υβριδική ηλεκτροπαραγωγή	38
3.5.3 Αμιγής τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα από τους συσσωρευτές	38
3.5.4 Ταυτόχρονη φόρτιση συσσωρευτών και προώθηση μέσω γεννήτριας από τον θερμικό κινητήρα	38
3.5.5 Κατάσταση αναγεννητικής πεδήσεως	39
3.5.6 Λειτουργία μηδενικής προώθησης	39
3.5.7 Από κοινού συμμετοχή των μονάδων προώθησης για την φόρτιση των συσσωρευτών.....	39
3.6 Καταστάσεις λειτουργίας σε ένα παράλληλο υβριδικό όχημα	39
3.6.1 Αμιγής θερμική προώθηση	39
3.6.2 Υβριδική προώθηση	40
3.6.3 Αμιγής ηλεκτρική προώθηση	40
3.6.4 Κατάσταση αναγεννητικής πεδήσεως	40
3.7 Καταστάσεις λειτουργίας σε υβριδικό όχημα διαχωρισμού ισχύος	40
3.7.1 Λειτουργία κυρίως βασιζόμενη στον θερμικό κινητήρα	41
3.7.2 Λειτουργία κυρίως βασιζόμενη στον ηλεκτρικό κινητήρα	43
3.8 Διαχωρισμός υβριδικών οχημάτων με βάση τον βαθμό υβριδικής προωθήσεως	44
3.8.1 Μικροϋβριδικά οχήματα.....	45
3.8.2 Ήπια υβριδικά οχήματα	46
3.8.3 Πλήρη υβριδικά οχήματα.....	47
3.8.4 Υβριδικά με δυνατότητα φόρτισης από πρίζα (Plug-in)	48
3.9 Η αναγεννητική πέδηση σε αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα	49
3.10 Διαχωρισμός αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων με βάση τον τύπο του κινητήρα	51
3.10.1 Ηλεκτρικά οχήματα με σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη	51
3.10.2 Ηλεκτροκίνητα οχήματα με επαγωγικούς κινητήρες	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Μέθοδοι αποθήκευσης της ανακτηθείσας ενέργειας	57
4.1 Γενικά	57
4.2 Μπαταρίες.....	57
4.2.1 Μπαταρίες Ni-MH (Νικελίου μετάλλου υδριδίου).....	58
4.2.2 Μπαταρίες ιόντων λιθίου	60
4.3 Υπερπυκνωτές	62
4.4 Σφόνδυλοι	65

4.5 Πνευματικοί συσσωρευτές	66
4.6 Σύγκριση των μεθόδων συσσώρευσης ενέργειας	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Ποσοτική επίδραση της αναγεννητικής πέδησης στα οχήματα.	70
5.1 Γενικά	70
5.2 Τυποποιημένοι κύκλοι οδήγησης EPA και NEDC.....	71
5.2.1 Κύκλος EPA	71
5.2.2 Κύκλος NEDC	73
5.3 Προσδιορισμός εκπομπών ρύπων CO2 σε βενζινοκίνητα, πετρελαιοκίνητα και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα.....	75
5.3.1 Βενζινοκίνητα οχήματα	75
5.3.2 Πετρελαιοκίνητα οχήματα	76
5.3.3 Ηλεκτροκίνητα οχήματα	76
5.4 Ποσοτική επίδραση της αναγεννητικής πέδησης στην κατανάλωση, τις εκπομπές ρύπων και την αυτονομία διαφόρων τύπων οχημάτων.....	78
5.4.1 Θερμικό όχημα με χρήση σφονδύλου	78
5.4.2 Θερμικό όχημα με υπερπυκνωτή	81
5.4.3 Υβριδικό όχημα με πνευματικούς συσσωρευτές.....	84
5.4.4 Υβριδικό όχημα με μπαταρίες ιόντων λιθίου	87
5.4.5 Αμιγώς ηλεκτρικό όχημα με μπαταρίες ιόντων λιθίου.....	91
5.5 Σύγκριση της ποσοτικής επίδρασης της αναγεννητικής πέδησης σε διάφορους τύπους οχημάτων	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Συμπεράσματα	96
Βιβλιογραφία και πηγές.....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

1.1 Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το ζήτημα της αναγεννητικής πεδήσεως στα οχήματα. Στο κεφάλαιο 2 μελετάται η εφαρμογή της αναγεννητικής πεδήσεως στους διαφόρους τύπους οχημάτων και ειδικότερα στα αμιγώς θερμικά, στα υβριδικά και στα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα. Εξετάζονται οι τύποι των υβριδικών οχημάτων που υφίστανται και πως υλοποιείται η αναγεννητική πέδηση στον καθέναν από αυτούς, ενώ επίσης παρουσιάζονται και οι τύποι των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων με διάκριση στην μονάδα προώθησης. Στο κεφάλαιο 3 εξετάζεται η γενική αρχή λειτουργίας της αναγεννητικής πεδήσεως και οι νόμοι που την διέπουν. Αρχικά μελετώνται με χρήση νόμων κλασικής μηχανικής, οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα κατά την πέδηση και αναφέρονται τα είδη της αναγεννητικής πέδησης και πως αυτά επηρεάζουν την ανάκτηση ενέργειας, ενώ μελετάται και η δυνατότητα των ηλεκτροκινητήρων στην εξομοίωση του συστήματος αντιμπλοκαρίσματος των τροχών. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι μέθοδοι αποθήκευσης της ανακτηθείσας ενέργειας μέσω αναγεννητικής πεδήσεως για κάθε τύπο οχήματος, μελετώνται οι εγγενείς τους ιδιότητες και επιχειρείται μια σύγκριση μεταξύ τους. Το κεφάλαιο 5 πραγματεύεται την επίδραση της εφαρμογής συστήματος αναγεννητικής πεδήσεως στην κατανάλωση, τις εκπομπές ρύπων και αυτονομία των οχημάτων, ανάλογα με τον τύπο τους και το μέσο αποθήκευσης που χρησιμοποιείται, ενώ στο κεφάλαιο 6 εκτίθενται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές από την εφαρμογή της αναγεννητικής πεδήσεως στα οχήματα.

1.2 Abstract

In this thesis, implementation of kinetic energy recovery through regenerative braking in passenger vehicles is studied. In the first chapter, the forces acting on a vehicle during braking are studied and the effect each of them has on it. In chapter 3, regenerative braking implementation is examined in each vehicle type from purely thermal propelled cars to fully electric, covering the entire spectrum. In chapter 4 the energy accumulators that are currently used in cars, are presented, studied and compared. In chapter 5, the effect of kinetic energy recovery on fuel or energy consumption, co2 emissions, and range of the vehicles are examined. In chapter 6, conclusion and prospects of implementation of regenerative braking are discussed and the advantages this technology offers in current vehicles.

1.3 Εισαγωγή

Η αυτοκίνηση βρίσκεται σε ένα κομβικό σημείο. Ενώ στο όχι πολύ μακρινό παρελθόν, η επιλογή για την προώθηση ενός οχήματος ήταν αποκλειστικά ένας θερμικός κινητήρας, πλέον διατίθενται επιλογές υβριδικής προώθησης καθώς και αμιγώς ηλεκτρικής. Οι βαίνουσες προς εξάντληση ορυκτές, πετροχημικές μορφές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα στην αυτοκίνηση, είναι βαριά ρυπογόνες και επηρεάζουν την βιοποικιλότητα ολόκληρου του πλανήτη. Τα καινούργια οχήματα σχεδιάζονται με πρώτιστο μέλημα την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, καθώς η μείωσή τους είναι καθοριστική πλέον για την βιωσιμότητα του ίδιου του πλανήτη, μείωση των ρύπων ωστόσο, η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατανάλωση καυσίμου. Οι τρέχουσες στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης και των εκπομπών ρύπων είναι η σχεδίαση καθαρότερων θερμικών μηχανών με χαμηλότερες χωρητικότητες (downsizing) και ευρεία χρήση υπερπληρώσεως, ελαφρύτερα πλαίσια στα οχήματα με χρήση ελαφρών ορυκτών μετάλλων και κατά περιπτώσεις χρήση συνθετικών υλικών και η ολοένα αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικών μηχανών που λόγω πολύ υψηλού βαθμού απόδοσης και μηδενικής παραγωγής τοπικών εκπομπών ρύπων. Στις στρατηγικές μείωσης της κατανάλωσης, εντάσσεται και η χρήση της αναγεννητικής πεδήσεως, η οποία αφορά την ανάκτηση μέρους της κινητικής ενέργειας που έχει ήδη αποκτηθεί όταν το όχημα κινείται με μια ορισμένη ταχύτητα, κατά την διαδικασία της πέδησης. Η ανακτηθείσα ενέργεια κατόπιν αποθηκεύεται με διάφορους τρόπους προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τις πάγιες ανάγκες του οχήματος, είτε αυτές αφορούν την τροφοδότηση των επιμέρους ηλεκτρικών συστημάτων στα θερμικά οχήματα, ή/και για την φόρτιση των συσσωρευτών ηλεκτρικής ενέργειας στα υβριδικά και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την τροφοδοσία με ηλεκτρικό ρεύμα των ηλεκτροκινητήρων και τελικά, αυτήν καθαυτήν την προώθηση του οχήματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την επίδραση και την υλοποίηση της ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πεδήσεως στους διάφορους τύπους οχημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Αρχή λειτουργίας της αναγεννητικής πεδήσεως

2.1 Εισαγωγή

Ένα από τα εγγενή χαρακτηριστικά των αμιγώς ηλεκτρικών, υβριδικών και εσχάτως και πολλών αμιγώς θερμικών οχημάτων, είναι η δυνατότητα να ανακτούν σημαντικά ποσά ενέργειας κατά την πέδησή τους. Ο τρόπος που υλοποιείται αυτή η δυνατότητα στα αμιγώς ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα, έγκειται στην δυνατότητα των ηλεκτρικών μηχανών, να λειτουργούν κατά περιπτώσεις και ως γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος, ούτως ώστε να μετατρέπουν ένα μέρος της κινητικής ή δυναμικής ενέργειας ενός οχήματος σε ηλεκτρική η οποία κατόπιν μπορεί να αποθηκευτεί στους συσσωρευτές του οχήματος. Οι επιδόσεις πέδησης ενός οχήματος είναι ένας καθοριστικός παράγοντας με άμεση σχέση με την προσφερόμενη ενεργητική ασφάλεια αυτού. Ένα επιτυχώς σχεδιασμένο σύστημα πέδησης ενός οχήματος πρέπει να πληροί πάντα δυο διαφορετικές απαιτήσεις. Πρώτον σε φρενάρισμα πανικού πρέπει να έχει την δυνατότητα να ακινητοποιήσει το όχημα στην μικρότερη δυνατή απόσταση και δεύτερον, κατά την διάρκεια μιας τέτοιας κατάστασης πεδήσεως, να διατηρείται ο έλεγχος στην κατεύθυνση του οχήματος. Η πρώτη απαίτηση προϋποθέτει ότι το σύστημα πέδησης πρέπει να παρέχει επαρκή ροπή πέδησης σε όλους τους τροχούς.

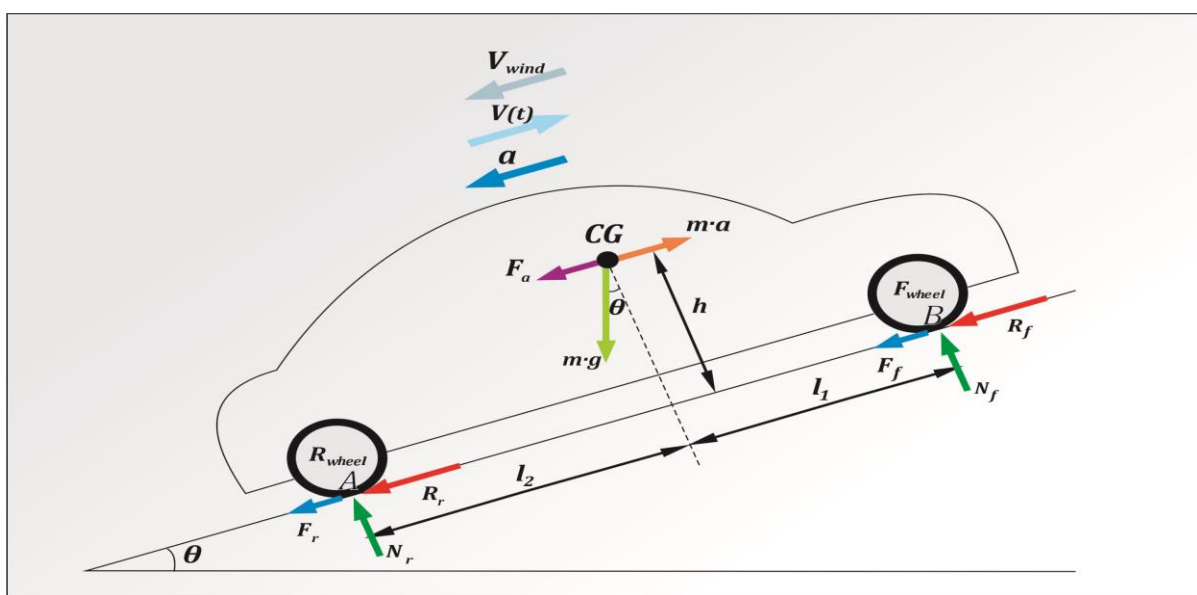
Η δεύτερη απαίτηση συνεπάγεται την ομοιόμορφη κατανομή της πέδησης σε όλους τους τροχούς. Σε ότι αφορά την ροπή πέδησης, υπάρχει μια ιδιαίτερη πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής του οχήματος. Αυτή η πρόκληση έχει να κάνει με το γεγονός ότι ενώ οι ανάγκες ισχύος για την παραγωγή της ζητούμενης πρόωσης από τον ηλεκτρικό κινητήρα σε ότι αφορά την επιθυμητή επιτάχυνσή του ή την τελική ταχύτητα που μπορεί να προσδώσει στο όχημα, είναι σχετικά ευχερές να προβλεφθούν, εντούτοις είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν οι αντίστοιχες ανάγκες ισχύος για την πέδηση του οχήματος, αφού εξαρτώνται από την συμπεριφορά του οδηγού κατά την οδήγηση αλλά και από μια έκτακτη ανάγκη πεδήσεως η οποία δυνητικά μπορεί να συμβεί. Αυτό το γεγονός έχει σαν τελικό αποτέλεσμα, η πέδηση που μπορεί να προσφέρει η ηλεκτρική μηχανή να μην επαρκεί, αλλά να απαιτείται και συμβατικό μηχανικό σύστημα πέδησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η κινητική ενέργεια από την πέδηση θα ανακτηθεί σε ένα ποσοστό, ενώ η υπόλοιπη θα γίνει θερμική η οποία θα πρέπει να απαχθεί προκειμένου να αποφευχθεί η κόπωση στα φρένα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. Αν και γενικά, είναι τεχνικά εφικτό να υπάρχει ένας επαρκώς ισχυρός ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος θα έχει την δυνατότητα να παράξει την απαιτούμενη δύναμη πέδησης αλλά ταυτόχρονα και να ανακτήσει το σύνολο της κινητικής ενέργειας κατά την πέδηση, εντούτοις κάτι τέτοιο θα συνεπαγόταν ηυξημένη μάζα και όγκο του οχήματος λόγω των ακόμα μεγαλύτερων συσσωρευτών που θα απαιτούντο με αποτέλεσμα τις ηυξημένες ενεργειακές ανάγκες του οχήματος,

κάτι που συνιστά τελικά φαύλο κύκλο. Οι λόγοι που απαιτείται τελικά η ύπαρξη υβριδικού συστήματος πεδήσεως το οποίο αποτελείται από το αναγεννητικό και το αμιγώς μηχανικό είναι οι ακόλουθοι:

1. Τα αποθέματα ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής είναι χαμηλότερα από την απαιτούμενη ροπή πέδησης.
2. Λόγω της ύπαρξης χαμηλής αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης κυρίως σε επαγωγικούς κινητήρες, η ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πεδήσεως είναι πολύ χαμηλή σε πεδησεις από χαμηλές ταχύτητες.
3. Το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών του οχήματος έχει καθοριστική σημασία στην ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πεδήσεως. Όταν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, τότε αυτοί δεν μπορούν να δεχθούν περαιτέρω ηλεκτρική ενέργεια.
4. Στα περισσότερα οχήματα, η ισχύς παραλαμβάνεται είτε από τους εμπρόσθιους, είτε από τους οπίσθιους τροχούς, όμως υπάρχουν σχήματα πέδησης που απαιτούν την χρήση εμπρόσθιου και οπίσθιου συστήματος πέδησης ταυτόχρονα.

Με δεδομένη την ύπαρξη υβριδικού συστήματος πεδήσεως, καθίσταται καθοριστικής σημασίας η συνεργασία των δυο συστημάτων κάτι που αποτελεί μείζονα πρόκληση για τους σχεδιαστές των οχημάτων.

2.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα κατά την πέδηση



Σχήμα 2.1: Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα κατά την πέδηση

Κατά την πέδηση ενός οχήματος, υπάρχει πληθώρα δυνάμεων που ασκούνται πάνω του, οι οποίες όμως ταξινομούνται σε 4 διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι οι αντιστάσεις κυλίσεως, η δεύτερη είναι η αεροδυναμική τριβή, η τρίτη είναι η βαρυτική δύναμη και η τέταρτη είναι η δύναμη της πέδησης.

Η συνολική δύναμη πέδησης που ενεργεί σε ένα όχημα το οποίο κινείται παράλληλα στο οδόστρωμα εκφρασμένη σε σύνθεση δυνάμεων είναι η ακόλουθη:

$$F_{ολ} = (F_f + F_r + R_f + R_r + F_a + m \times g \times \sin \theta) = m \times a \quad (2.1)$$

Όπου στην ανωτέρω εξίσωση:

$F_{ολ}$ = Συνολική δύναμη πέδησης,

F_f = Η δύναμη πέδησης που ασκείται στους εμπρόσθιους τροχούς,

F_r = Δύναμη πέδησης που ασκείται στους οπίσθιους τροχούς,

R_f = Αντίσταση κυλίσεως εμπροσθίων τροχών,

R_r = Αντίσταση κυλίσεως οπισθίων τροχών,

F_a = Αεροδυναμική δύναμη οπισθέλκουσας στο όχημα,

m = Μάζα του οχήματος,

g = Επιτάχυνση βαρύτητας,

θ = Κλίση του δρόμου,

a = Ρυθμός επιβράδυνσης του οχήματος

2.3 Αντίσταση κυλίσεως (R_f, R_r)

Καθώς οι τροχοί περιστρέφονται, λόγω της ενδοτικότητας το υλικού των ελαστικών, το ελαστικό υφίσταται μια παραμόρφωση η οποία εμφανίζεται σαν επιμήκυνσή του επί του οδοστρώματος. Αυτή η επίδραση πάνω στα ελαστικά, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αντίστασης κυλίσεως η οποία αντιτίθεται στην κίνηση του οχήματος.

Η αντίσταση κυλίσεως του ελαστικού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$R_f + R_r = v \times m \times g \times \cos \theta \quad (2.2)$$

Όπου $R_f + R_r$ = Το άθροισμα των αντιστάσεων κυλίσεως για εμπρόσθιο και οπίσθιο άξονα

v = Συντελεστής αντιστάσεως κυλίσεως

Ο συντελεστής αντιστάσεως κυλίσεως επηρεάζεται από το υλικό κατασκευής, την δομή, την πίεση και την θερμοκρασία των ελαστικών, την γεωμετρία του πέλματος και το εγκάρσιο πάχος του. Επίσης επηρεάζεται από την επιφανειακή τραχύτητα του οδοστρώματος, το υλικό κατασκευής του και από το αν είναι βρεγμένο, χιονισμένο ή στεγνό. Ο Συντελεστής αντιστάσεως κυλίσεως κυμαίνεται σε σύγχρονα ελαστικά από 0.00615 για ειδικά ελαστικά ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης καυσίμου ως 0.013 για ελαστικά σπορ προδιαγραφών.

Συνθήκες	Συντελεστής αντίστασης κύλισης
Ελαστικά αυτοκινήτων σε τσιμέντο ή ασφάλτο	0.00615-0.013
Ελαστικά αυτοκινήτων σε σφαιροειδές χαλίκι	0.02
Tar macadam	0.025
Χωματόδρομος	0.05
Αγρός	0.1-0.35
Ελαστικά φορτηγών σε τσιμέντο ή ασφάλτο	0.006-0.01
Τροχοί σε ράγα	0.001-0.002

Πίνακας 2.1 Συντελεστές αντιστάσεως κυλίσεως για διάφορες συνθήκες

Γενικά ο συντελεστής αντιστάσεως κυλίσεως μπορεί να προσεγγιστεί επίσης μέσω του ακόλουθου εμπειρικού τύπου ο οποίος παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια για ταχύτητες μέχρι 128 km/h, θεωρώντας ότι αυτός αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα.

$$v = 0,01 \times \left(1 + \frac{V}{100}\right) \quad (2.3)$$

Όπου V η ταχύτητα σε Km/h

2.4 Αεροδυναμική αντίσταση (F_a)

Ένα οποιοδήποτε όχημα κατά την κίνησή του συναντά μια δύναμη που αντιτίθεται σε αυτήν. Η δύναμη αυτή ονομάζεται αεροδυναμική αντίσταση και οφείλεται σε δύο λόγους. Την αντίσταση του γεωμετρικού σχήματός του και την τριβή της επιφάνειάς του. Σε ότι αφορά την αντίσταση λόγω σχήματος, η εμπρόσθια κίνηση του οχήματος ωθεί τον αέρα εμπρός του. Ωστόσο ο αέρας δεν μπορεί

να κινηθεί αμέσως έξω από τον δρόμο και έτσι η πίεσή του αυξάνεται, με αποτέλεσμα την υψηλή πίεση στο εμπρόσθιο μέρος του οχήματος. Επιπλέον, ο αέρας πίσω από το όχημα δεν μπορεί να καλύψει αμέσως τον χώρο που απέμεινε από την κίνηση προς τα εμπρός του. Αυτό δημιουργεί μια περιοχή χαμηλής πίεσης πίσω από το όχημα. Η κίνηση συνεπώς του οχήματος, έχει δημιουργήσει δυο ζώνες διαφορετικής πίεσης, μιας χαμηλής και μιας υψηλής, που αντιτίθενται στην κίνησή του, πιέζοντας προς τα εμπρός και τραβώντας το προς τα πίσω. Η συνισταμένη δύναμη στο όχημα είναι η αντίσταση λόγω σχήματος. Σε ότι αφορά την τριβή της επιφάνειας, ο αέρας κοντά στην επιφάνεια του οχήματος κινείται σχεδόν με την ταχύτητα του οχήματος, ενώ ο αέρας μακριά από το όχημα παραμένει ακίνητος. Στο ενδιάμεσο, τα μόρια του αέρα κινούνται σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων μεταξύ ακινησίας και ταχύτητας οχήματος. Η διαφορά στην ταχύτητα μεταξύ δυο μορίων ατμοσφαιρικού αέρα, παράγει μια τριβή που αποτελεί την δεύτερη συνιστώσα της αεροδυναμικής αντίστασης. Ωστόσο η συνιστώσα που οφείλεται στην τριβή της επιφάνειας είναι αρκετές φορές μικρότερη από την αντίστοιχη συνιστώσα που οφείλεται στην αντίσταση λόγω σχήματος, οπότε η αεροδυναμική αντίσταση είναι συνάρτηση της πυκνότητας του αέρα, της μέγιστης μετωπικής επιφάνειας του οχήματος, του συντελεστή οπισθέλκουσας του οχήματος που οφείλεται στην γεωμετρία του σχήματός του, την ταχύτητα του οχήματος και την ταχύτητα του αέρα. Η εξίσωση που μας δίνει ποσοτικά την αεροδυναμική αντίσταση είναι η ακόλουθη:

$$F_d = 0,5 \times \rho \times A \times C_d \times (V \pm V_{wind})^2 \quad (2.4)$$

Όπου:

ρ = Πυκνότητα του αέρα

A = Μετωπική επιφάνεια του οχήματος

C_d = Συντελεστής οπισθέλκουσας του οχήματος

V = Ταχύτητα οχήματος

V_{wind} = Ταχύτητα ανέμου

Γενικά, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια από τους σχεδιαστές των οχημάτων για την ελαχιστοποίηση της αεροδυναμικής αντίστασης των οχημάτων μέσω μελετών σε ειδικά διαμορφωμένες αεροδυναμικές σήραγγες και αυτό διότι η αεροδυναμική αντίσταση επηρεάζει τον όχημα σε πολλούς τομείς, όπως την

ποιότητα όχησης, τον εισερχόμενο θόρυβο, τον έλεγχο του οχήματος, αλλά και την κατανάλωση και τους εκπεμπόμενους ρύπους.

Ακολουθεί πίνακας με ενδεικτικές τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας σύγχρονων οχημάτων

Τύπος Οχήματος	Συντελεστής οπισθέλκουσας (C_d)
Supermini	0.29 - 0.34
Μικρομεσαία	0.22 - 0.34
Sedans	0.24 - 0.34
Υπεραυτοκίνητα	0.26 - 0.38
Ηλεκτρικά	0,29 - 0,31
SUV	0.29 - 0.39
Convertible	0.30 - 0.33
Φορτηγά, τροχοτρένα	0.80 - 1.50
Λεωφορεία	0.60 - 0.70
Μοτοσυκλέτες	0.60 - 0.70

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές συντελεστού οπισθέλκουσας για διάφορους τύπους αμαξωμάτων

2.5 Δύναμη λόγω βαρύτητας

Η βαρυτική δύναμη θεωρείται μια στατική δύναμη που ασκείται στο όχημα λόγω της κλίσης του οδοστρώματος. Η πέδηση σε μια ανωφέρεια έχει ως αποτέλεσμα θετική δύναμη πέδησης, ενώ η πέδηση σε μια κατωφέρεια έχει αρνητική δύναμη πέδησης. Η βαρυτική δύναμη είναι ανάλογη του βάρους του οχήματος και της κλίσης του οδοστρώματος.

$$m \times g \times \sin \theta \quad (2.5)$$

2.6 Δύναμη πέδησης (F_f, F_r)

Εφαρμόζοντας μια αρνητική ροπή πεδήσεως στους τροχούς του οχήματος, η δύναμη πέδησης που δημιουργείται, χρησιμοποιείται για να μειώσει την ταχύτητα του οχήματος. Αντίθετα με την αεροδυναμική αντίσταση, την αντίσταση κυλίσεως και την βαρυτική δύναμη, η δύναμη πεδήσεως μπορεί να ελεγχθεί με άμεσο τρόπο από τον οδηγό ανάλογα με την πίεση που ασκεί εκείνος στο πεντάλ του φρένου. Η μέγιστη δύναμη πέδησης που ασκείται στους τροχούς του οχήματος σχετίζεται άμεσα με τον συντελεστή τριβής του οδοστρώματος.

$$F_f + F_r = \mu \times m \times g \times \cos \theta \quad (2.6)$$

Όπου μ , ο συντελεστής τριβής του οδοστρώματος, η F_f είναι η μέγιστη εφαρμόσιμη δύναμη πέδησης στους εμπρόσθιους τροχούς, ενώ η F_r η αντίστοιχη για τους οπίσθιους. Σε συμβατικά οχήματα άνευ αναγεννητικής πεδήσεως, αυτή η δύναμη πέδησης ασκείται μέσω ενός υδρομηχανικού συστήματος που αποτελείται από έναν δίσκο στις πλείστες των περιπτώσεων σε συνεργασία με ειδικά υλικά τριβής και μια υδραυλική σιαγόνα. Κατά την διάρκεια της πέδησης, η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε θερμική και απάγεται μέσω του τακακιού και του δίσκου. Σε ένα υβριδικό ή αμιγώς ηλεκτρικό όχημα κατά κανόνα αλλά και σε λίγα αμιγώς θερμικά οχήματα, υπάρχει επιπρόσθετα και ένα ηλεκτρικό σύστημα πεδήσεως το οποίο συνεργάζεται με το υδρομηχανικό. Το ηλεκτρικό σύστημα πέδησης και κατά συνέπεια η αναγεννητική πέδηση αφορά τους παραλαμβάνοντες την ισχύ τροχούς, ενώ οι ελευθέρως κυλιόμενοι τροχοί μειώνουν την ταχύτητά τους μέσω του υδρομηχανικού συστήματος πεδήσεως.

2.7 Εξισώσεις δυνάμεων πέδησης

Η δυναμική της πέδησης υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον δεύτερο νόμο της κίνησης του Νεύτωνα μεταξύ των σημείων A,B στο σχήμα 2.1. Η εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα συνδέει τον ρυθμό επιβράδυνσης με την μάζα του οχήματος και την συνολική δύναμη της πέδησης ως εξής:

$$F_{ολ} = m \times \frac{dv}{dt} = m \times a \quad (2.7)$$

Όπου a , ο ρυθμός επιβράδυνσης του οχήματος και $V(t)$, η ταχύτητα του οχήματος.

Αναλύοντας τις δυνάμεις στους τροχούς των 2 αξόνων, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στον εμπρόσθιο και τον οπίσθιο άξονα ως εξής:

$$N_f = \frac{m \times g \times \cos \theta \times l_2 + h \times (m \times a - F_a - m \times g \times \sin \theta)}{L} \quad (2.8)$$

$$N_r = \frac{m \times g \times \cos \theta \times l_1 + h \times (m \times a - F_a - m \times g \times \sin \theta)}{L} \quad (2.9)$$

Όπου $L=l_1+l_2$, ενώ η μέγιστη εφαρμόσιμη δύναμη πεδήσεως στον εμπρόσθιο άξονα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_f = \mu \times \frac{m \times g \times \cos \theta \times l_2 + h \times (m \times a - F_\alpha - m \times g \times \sin \theta)}{L} \quad (2.10)$$

Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ πως η δύναμη πεδήσεως των εμπροσθίων τροχών αυξάνεται κατά την πέδηση από χαμηλές ταχύτητες λόγω της μείωσης του F_α . Συνεπώς αν αμελήσουμε την αεροδυναμική συνιστώσα της δυνάμεως και υπολογίσουμε την μέγιστη δύναμη πέδησης στον εμπρόσθιο άξονα, θα έχουμε

$$F_f = \mu \times \frac{m \times g \times \cos \theta \times l_2 + h \times (m \times a - m \times g \times \sin \theta)}{L} \quad (2.11)$$

Όμως $(F_f + F_r + R_f + R_r) = (m \times a - m \times g \times \sin \theta)$ οπότε θα έχουμε:

$$\frac{F_f}{m \times g} = \frac{\mu \times \cos \theta \times (l_2 + v \times h)}{L - \mu \times h} + \left(\frac{\mu \times h}{L - \mu \times h} \right) \times \frac{F_r}{m \times g} \quad (2.12)$$

Παρομοίως η αντίστοιχη δύναμη για τον οπίσθιο άξονα θα είναι:

$$\frac{F_r}{m \times g} = \frac{\mu \times \cos \theta \times (l_1 + v \times h)}{L - \mu \times h} + \left(\frac{\mu \times h}{L - \mu \times h} \right) \times \frac{F_f}{m \times g} \quad (2.13)$$

Στην ιδανική κατάσταση πεδήσεως, οι εμπρόσθιοι και οι οπίσθιοι τροχοί πρέπει να χρησιμοποιούνται πλήρως και σε αυτήν την περίπτωση οι κανονικοποιημένες εμπρόσθιες και οπίσθιες δυνάμεις πεδήσεως εκφράζονται ως ακολούθως:

$$\frac{F_f}{m \times g} = \mu \times \cos \theta \times \frac{l_2 + h \times (\mu + v)}{L} \quad (2.14)$$

$$\frac{F_r}{m \times g} = \mu \times \cos \theta \times \frac{l_1 + h \times (\mu + v)}{L} \quad (2.15)$$

Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ πως όταν ασκείται η μέγιστη δύναμη πεδήσεως, τα ελαστικά θα ολισθήσουν επί του οδοστρώματος. Συνεπώς το να αυξηθεί η δύναμη πεδήσεως πέραν αυτού του σημείου, θα οδηγήσει σε κλείδωμα των τροχών και απώλεια της κατευθυντικότητας του οχήματος. Λόγω αυτού του γεγονότος, η εφαρμοζόμενη δύναμη πέδησης θα πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη από αυτήν που επιτρέπουν οι συνθήκες για δεδομένη πέδηση. Η κατανομή του φόρτου πέδησης μεταξύ του εμπρόσθιου και του οπίσθιου άξονα χωρίς το κλείδωμα των τροχών προσδιορίζεται από τα ανωτέρω αναφερθέντα κριτήρια.

2.8 Ισχύς πεδήσεως

Η ισχύς πεδήσεως συναρτήσει του χρόνου σε ένα συμβάν πέδησης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_b(t) = (F_f + F_r) \times V(t) \quad (2.16)$$

Όπου $P_b(t)$ η ισχύς της πεδήσεως συναρτήσει του χρόνου, $V(t)$ η ταχύτητα του οχήματος συναρτήσει του χρόνου. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα ο φόρτος της δύναμης πέδησης μεταξύ των δυο αξόνων δεν είναι σταθερός και μεταβάλλεται συνέχεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατανομή της ισχύος πεδήσεως μεταξύ των αξόνων. Έτσι η ισχύς της πέδησης που παραλαμβάνουν ο εμπρόσθιος και ο οπίσθιος άξονας είναι η ακόλουθη:

$$P_f(t) = F_f \times V(t) \quad (2.17)$$

$$P_r(t) = F_r \times V(t) \quad (2.18)$$

Όπου $P_f(t)$ η ισχύς πεδήσεως που παραλαμβάνει ο εμπρόσθιος άξονας και $P_r(t)$ η ισχύς πεδήσεως που παραλαμβάνει ο οπίσθιος, συναρτήσει του χρόνου.

Συνεπώς η απώλεια ισχύος σε ένα όχημα με εμπρόσθια παραλαβή ισχύος κατά την πέδηση, θεωρώντας ότι όλη η ισχύς πεδήσεως μπορεί να ανακτηθεί είναι:

$$P_{Lost} = \frac{F_r}{F_f + F_r} \times 100\% \quad (2.19)$$

Ωστόσο λόγω εγγενών περιορισμών στην διαχείριση ροπής/ισχύος του ηλεκτροκινητήρα, κάποιες περιπτώσεις πεδήσεως απαιτούν την συνδρομή και του μηχανικού συστήματος πεδήσεως στον εμπρόσθιο άξονα. Έτσι η F_f μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_f = F_{f-regen} + F_{f-mech} \quad (2.20)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς, η αναγεννητική ισχύς πεδήσεως σε ένα όχημα με εμπρόσθια κίνηση είναι:

$$P_R(t) = (m \times a - m \times g \times \sin \theta - F_r - F_{f-mech} - v \times m \times g \times \cos \theta - -F_a) \times V(t) \quad (2.21)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ πως η αναγεννητική ισχύς πεδήσεως μεταβάλλεται με την επίδραση του ρυθμού επιβράδυνσης, την ταχύτητα του οχήματος και την εμπλοκή του μηχανικού συστήματος πεδήσεως στον εμπρόσθιο και τον οπίσθιο άξονα. Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε την μεταβολή της κινητικής ενέργειας σε ένα όχημα το οποίο επιβραδύνει από μια αρχική ταχύτητα u σε μια τελική v , αμελώντας την ενέργεια που ενδεχομένως συγκεντρώνεται στις περιστρεφόμενες αδράνειες. Θα έχουμε:

$$\Delta E = E_u - E_v = 0.5 \times m \times (u^2 - v^2) \quad (2.22)$$

Όπου ΔE είναι η μείωση της κινητικής ενέργειας του οχήματος, ενώ E_u και E_v είναι οι αντίστοιχες κινητικές ενέργειες του οχήματος για ταχύτητα u, v .

Ο βαθμός απόδοσης της αναγεννητικής πεδήσεως ορίζεται ως εξής:

$$n_R = \frac{\int_{t_u}^{t_v} P_R(t) \times dt}{\Delta E} \times 100\% \quad (2.23)$$

Όπου t_u η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκινά η πέδηση και το όχημα έχει ταχύτητα u , ενώ t_v είναι ο χρόνος κατά τον οποίο λήγει η πέδηση και το όχημα έχει ταχύτητα v . Ο ανωτέρω βαθμός απόδοσης είναι ωστόσο θεωρητικός και δεν αντιπροσωπεύει το πραγματικό ποσό ενέργειας που συγκεντρώνεται στους συσσωρευτές του οχήματος. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί υπάρχουν απώλειες ενέργειας που συνδέονται με τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα, του μετατροπέα ισχύος, του συστήματος μετάδοσης, αλλά και τον ρυθμό με τον οποίο μπορούν να φορτιστούν οι συσσωρευτές.

2.9 Κατανάλωση ενέργειας κατά την πέδηση

Σε ένα όχημα κατά την διάρκεια της πέδησης καταναλώνεται ένα ποσό ενέργειας. Ειδικά σε αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα η ανάκτησή της είναι κεφαλιώδους σημασίας, η όσο το δυνατόν αποδοτικότερη ανάκτησή της, γιατί η επαναφόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος με τις τρέχουσες τεχνολογίες συσσωρευτών δεν είναι ούτε γρήγορη, αλλά ούτε και ευχερής. Σε ένα όχημα για παράδειγμα με μάζα 1500 κιλών, το οποίο υφίσταται πέδηση από τα 100 km/h μέχρι την πλήρη ακινησία, η κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$\frac{1}{2} \times 1500 \times 27.78^2 = 578796.3 \text{ joules}$$

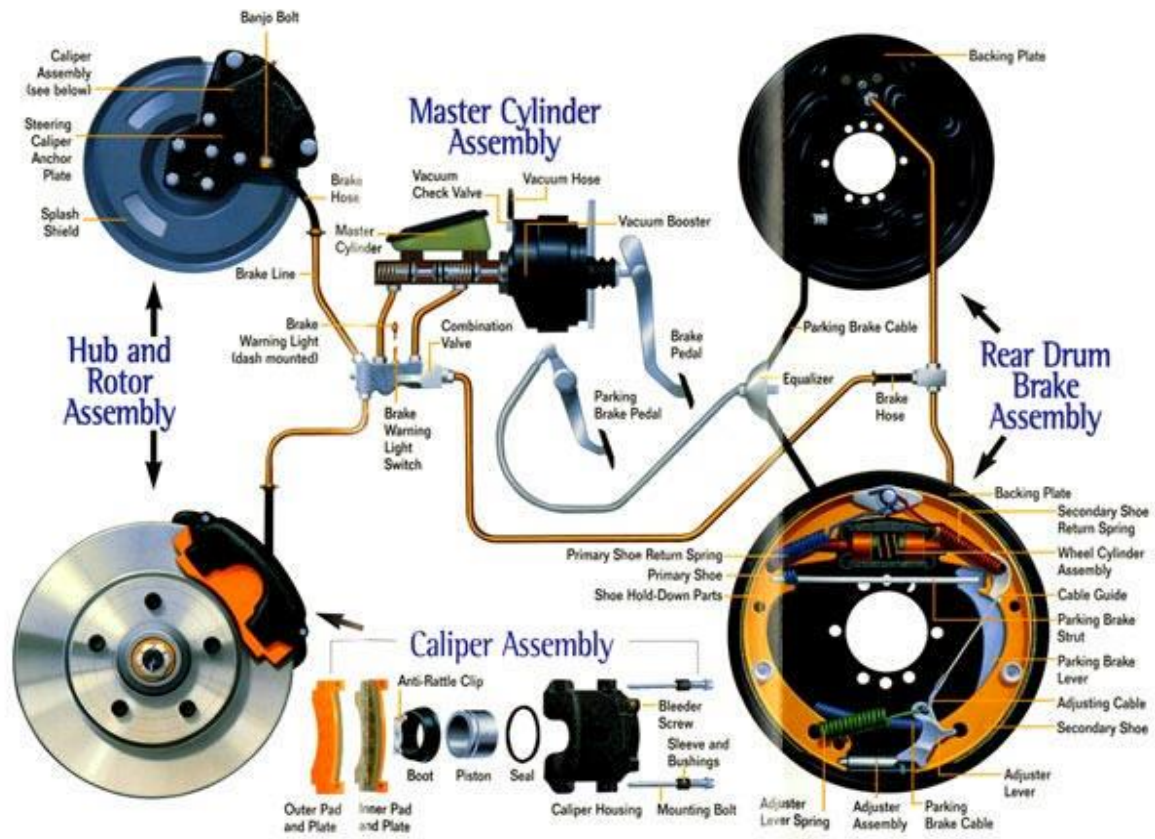
Μετατρέποντάς σε W θα έχουμε $578796.3/3600 \approx 161 \text{ W}$

Η ανωτέρω ευρεθείσα ενέργεια που καταναλώνεται, μπορεί να ανακτηθεί σε ένα ποσοστό μέσω της αναγεννητικής πεδήσεως μέχρι περίπου 69% σε υβριδικό όχημα με ρυθμό επιβράδυνσης 0.315 g, συνεπώς σε αυτό το σχήμα, μπορούν να ανακτηθούν $161 \times 0,69 = 111 \text{ W}$.

2.10 Κύκλος Πέδησης-Ανάκτησης ενέργειας-Φόρτισης συσσωρευτών

2.10.1 Κύκλος πέδησης

Αρχικά μελετάται ένα τυπικό, συμβατικό σύστημα πέδησης, με τα επιμέρους εξαρτήματά του. Στο σχήμα 2.2 εκτίθεται ένα σύστημα πέδησης με δίσκους στον εμπρόσθιο άξονα και ταμπούρα στον οπίσθιο.



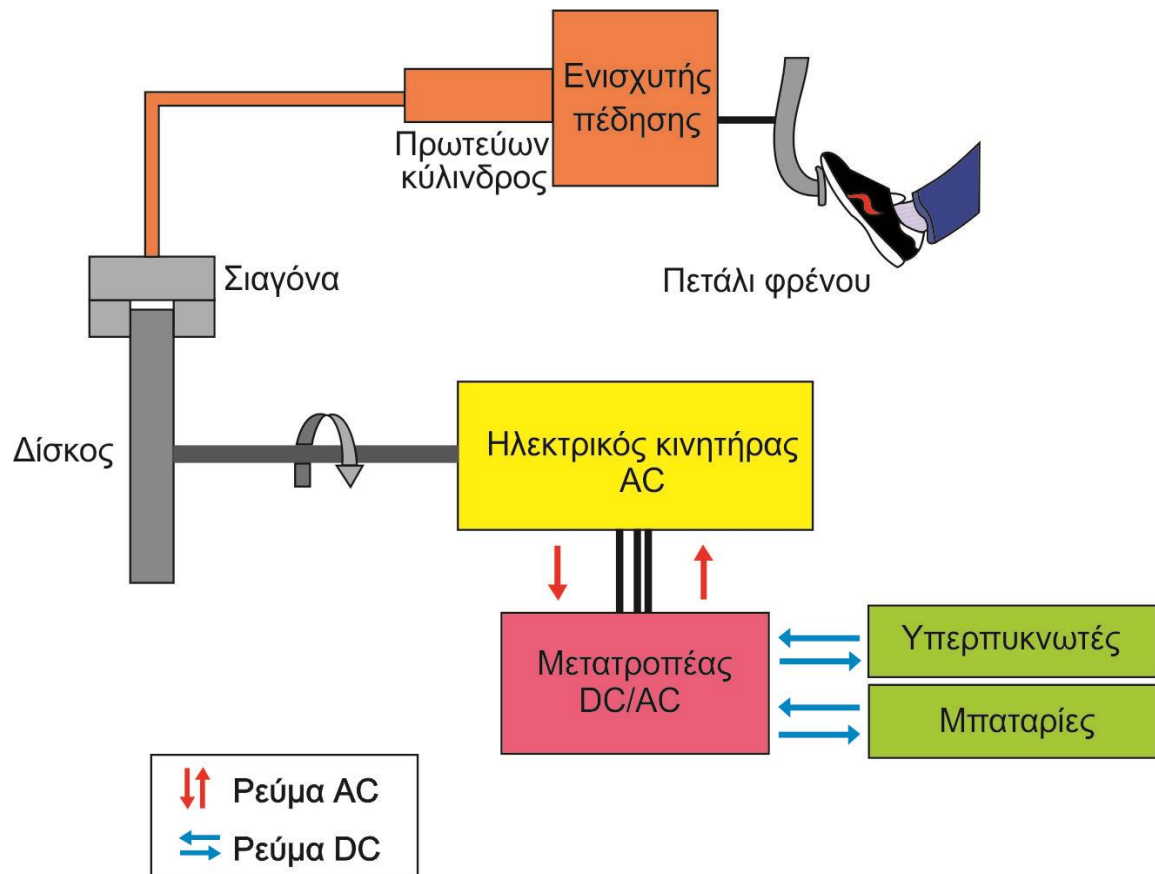
Σχήμα 2.2 Απεικόνιση τυπικού συστήματος πέδησης

Αρχικά ο οδηγός μέσω της πίεσης του πεντάλ του φρένου, καθορίζει την απαιτούμενη δύναμη πέδησης. Επειδή η απαιτούμενη δύναμη πέδησης είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την δύναμη που ασκεί ο οδηγός, υφίσταται υποβοήθηση αυτής μέσω πολλαπλασιαστική δύναμης κενού (vacuum booster), ο οποίος βρίσκεται εντός του πρωτεύοντος κύλινδρου. Αφού έχει ασκηθεί η πίεση στο πεντάλ από τον οδηγό, ενεργοποιείται το οπίσθιο φως πέδησης του οχήματος μέσω ενός διακόπτη, κατόπιν μέσω του υδραυλικού αγωγού πέδησης το έμβολο ή τα έμβολα της σιαγόνας πιέζουν το τακάκι εντός της, το οποίο τρίβεται επί της επιφάνειας του δίσκου, μειώνοντας την ταχύτητα του οχήματος μέσω δίεπαφής τριβής. Το ποσοστό της κατανομής της δύναμης πέδησης μεταξύ εμπροσθίου και οπισθίου άξονος, είναι είτε μεταβαλλόμενο σε σύγχρονα συστήματα πέδησης που ελέγχονται ηλεκτρονικά, είτε προκαθορισμένο από το εργοστάσιο σε συστήματα πέδησης παλαιότερων οχημάτων, με το μεγαλύτερο έργο πέδησης να αναλαμβάνει ο εμπρόσθιος άξονας κατά κανόνα. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, είθισται οι δίσκοι των εμπροσθίων συστημάτων πέδησης, να διαθέτουν μεγαλύτερη διάμετρο, οι οποίοι επιπρόσθετα, κατά κανόνα είναι αεριζόμενοι μέσω ενός διακένου που υπάρχει μεταξύ των δυο επιφανειών τριβής για αποτελεσματικότερη απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται λόγω τριβής. Στους οπίσθιους άξονες, απαντώνται δίσκοι συμπαγείς, χωρίς διακένο μεταξύ τους και μικρότερης διαμέτρου, ενώ σε ότι αφορά τις σιαγόνες, στην περίπτωση που είναι πολυέμβολες στον εμπρόσθιο άξονα, για αριθμό εμβόλων 2, υφίσταται ένα έμβολο στην σιαγόνα του οπίσθιου δισκόφρενου, ενώ για

την περίπτωση από 4 έμβολα και πάνω, συνήθως ο οπίσθιος άξονας διαθέτει 2 λιγότερα. Σε περιπτώσεις υπεραυτοκινήτων απαντώνται δίσκοι από συνθετικά υλικά, κατασκευασμένοι από κεραμικά υλικά και ίνες άνθρακα, ενώ επιπρόσθετα είναι διάτρητοι ή/και χαραγμένοι και οι σιαγόνες είναι από αλουμίνιο ή από μαγνήσιο. Η επιλογή αυτών των υλικών εξασφαλίζει μειωμένο μη ανηρτημένο βάρος κατά κανόνα περίπου στο 50% και πολύ χαμηλή κόπωση στο σύστημα πέδησης, λόγω κεραμικών υλικών. Σε αυτοκίνητα πόλης, τα οποία κατά κανόνα είναι ελαφριά και ασθενή, για λόγους ελαχιστοποίησης του κόστους, χρησιμοποιούνται ταμπούρα στους οπίσθιους άξονες, τα οποία όμως έχουν δυο βασικά μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι η υψηλή κόπωση που παρουσιάζουν λόγω χαμηλής δυνατότητας απαγωγής της θερμότητας και το δεύτερο, είναι το υψηλό μη ανηρτημένο βάρος, το οποίο είναι σαφώς μεγαλύτερο σε σχέση με την χρήση δίσκου για την πέδηση. Τα ταμπούρα επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως ως φρένο στάθμευσης ενός οχήματος, ακόμα και στις περιπτώσεις που το όχημα διαθέτει δίσκους σε όλους τους τροχούς.

2.10.2 Κύκλος Ανάκτησης ενέργειας-Φόρτισης συσσωρευτών

Μελετάται ο κύκλος της ανάκτησης ενέργειας- Φόρτισης συσσωρευτών. Κατά την πέδηση του οχήματος, ο ηλεκτρικός κινητήρας ανακτά μέρος της κινητικής ενέργειας. Επειδή ο ηλεκτροκινητήρας είναι εναλλασσομένου ρεύματος και οι συσσωρευτές ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνεχούς ρεύματος, υφίσταται ένας μετατροπέας DC/AC μεταξύ ηλεκτροκινητήρα και συσσωρευτών. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταλήγει στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές εξαρτάται από τον ίδιο τον ηλεκτροκινητήρα και τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα DC/AC. Στην συνέχεια, αφού έχει ολοκληρωθεί η πέδηση και ο οδηγός επιθυμεί να επιταχύνει το όχημα ξανά, η ενέργεια που έχει ανακτηθεί στους συσσωρευτές μετατρέπεται πάλι σε συνεχές ρεύμα προκειμένου να τροφοδοτηθεί ο ηλεκτροκινητήρας. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται ο κύκλος ανάκτησης ενέργειας-φόρτισης συσσωρευτών ενός αμιγώς ηλεκτροκίνητου οχήματος.

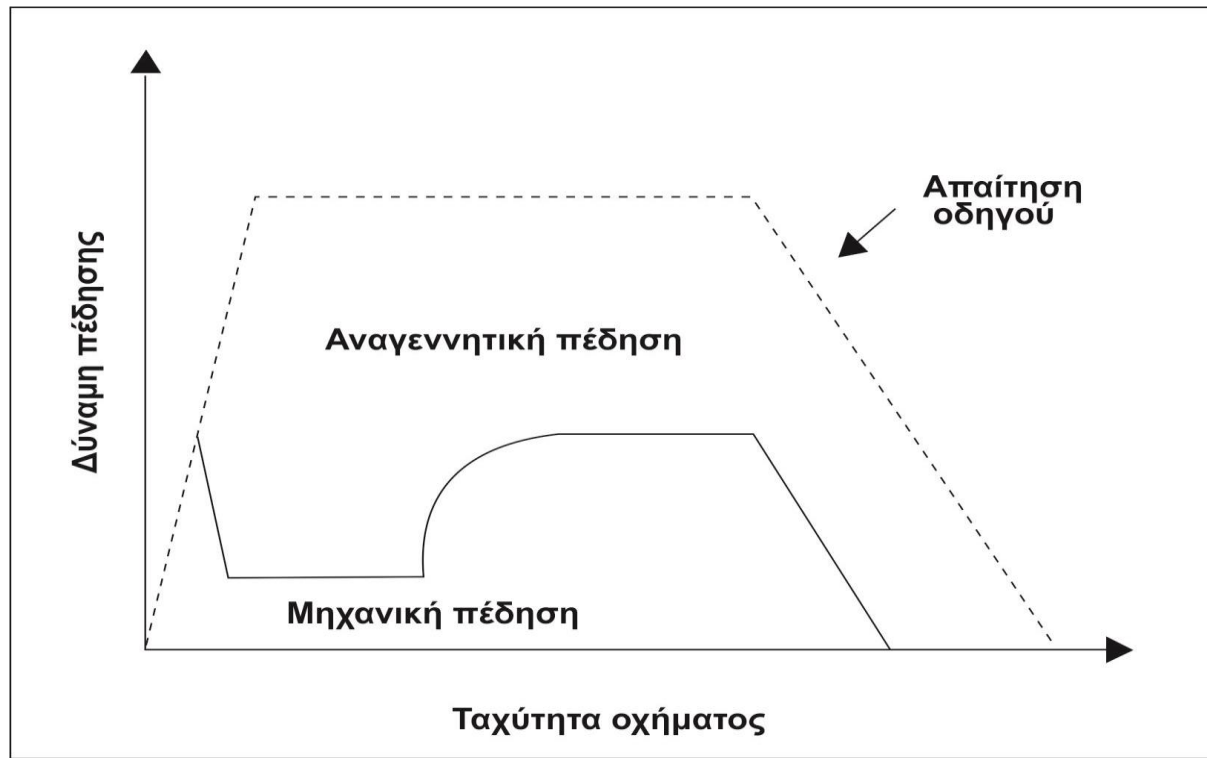


Σχήμα 2.3 Απεικόνιση κύκλου ανάκτηση ενέργειας - Φόρτισης συσσωρευτών

2.11 Μέθοδοι αναγεννητικής πεδήσεως

Η αναγεννητική πέδηση υλοποιείται με δυο διαφορετικές τεχνικές προσεγγίσεις στα οχήματα. Αυτές οι δυο διαφορετικές προσεγγίσεις αναφέρονται ως σειριακή αναγεννητική πέδηση και παράλληλη αναγεννητική πέδηση, των οποίων οι ιδιότητες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους μελετώνται ακολούθως.

2.11.1 Σειριακή αναγεννητική πέδηση



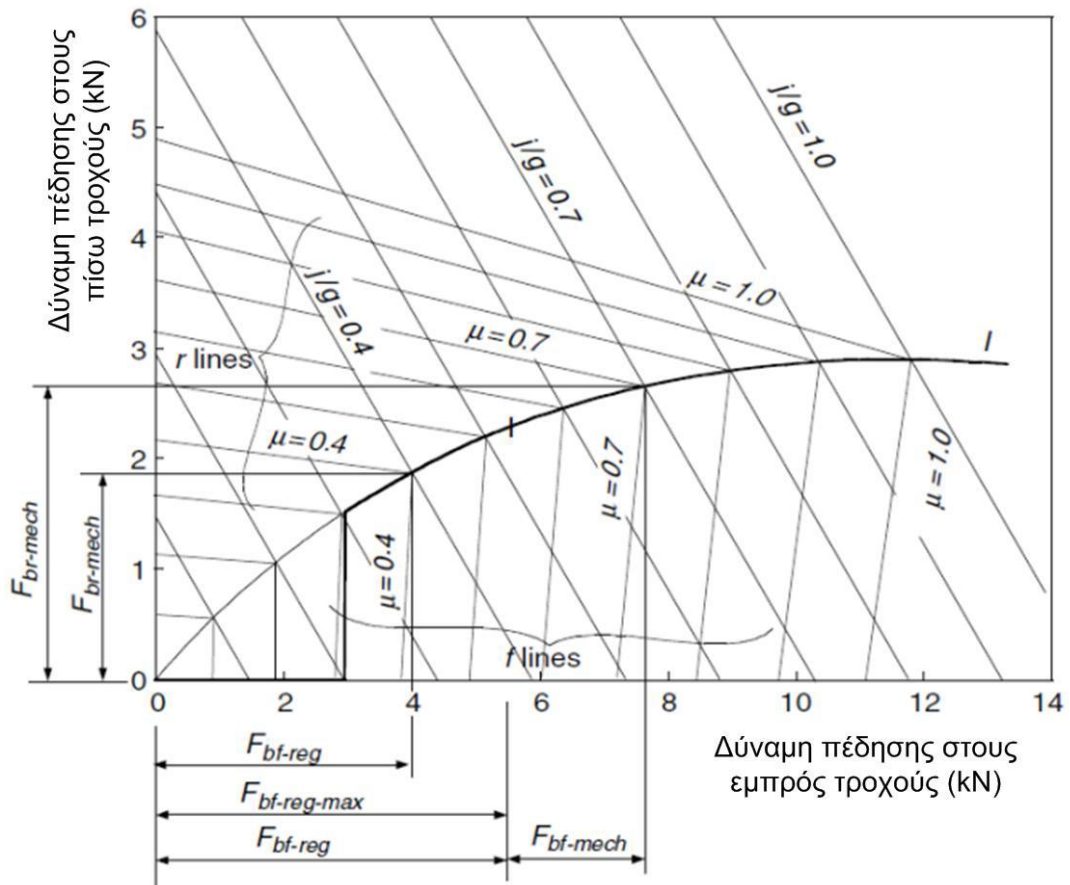
Διάγραμμα 2.1 Διάγραμμα δύναμης πέδησης-ταχύτητας οχήματος για σειριακή πέδηση

Γενικά στην σειριακή αναγεννητική πέδηση, προωθείται ο ηλεκτρικός κινητήρας για την πέδηση του οχήματος. Μόνο όταν ο ηλεκτροκινητήρας ή το σύστημα συσσώρευσης ενέργειας του οχήματος δεν μπορούν να δεχθούν περαιτέρω ενέργεια, χρησιμοποιούνται τα μηχανικά φρένα. Αυτή η μέθοδος απαιτεί η ροπή πέδησης από το μηχανικό σύστημα φρένων να ελέγχεται ανεξάρτητα από την πίεση στο πεντάλ του φρένου και έχει το πλεονέκτημα, στο ότι είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος πέδησης σε ότι αφορά την ανάκτηση ενέργειας. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι, το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος, ενώ ο τρόπος που ενεργοποιούνται τα φρένα είναι μέσω ηλεκτρικών σημάτων (brake by wire), τα οποία συνεργάζονται είτε με ηλεκτροϋδραυλικά φρένα είτε με ηλεκτρομηχανικά. Και οι δυο αυτοί τύποι φρένων απαιτούν εξομοιωτές του πεντάλ της πέδησης και σχεδόν πλήρη ανασχεδιασμό του συστήματος πέδησης, ενώ τα συστήματα brake by wire επίσης απαιτούν αισθητήρες, επεξεργαστές και καλωδιώσεις που αυξάνουν και αυτά με την σειρά τους την πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος. Τέλος, η σειριακή αναγεννητική πέδηση, χωρίζεται σε δυο κατηγορίες με την πρώτη να ευνοεί την αίσθηση και η δεύτερη την ανάκτηση ενέργειας.

2.11.2 Αναγεννητική πέδηση για μέγιστη αίσθηση

Η σειριακή αναγεννητική πέδηση αυτού του είδους χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή πέδησης προκειμένου να ελέγξει τις δυνάμεις πέδησης στους εμπρόσθιους και οπίσθιους τροχούς. Όταν η απαιτούμενη επιβράδυνση από την μεριά του οδηγού είναι χαμηλή, η οποία ενημερώνεται από την θέση του πεντάλ του φρένου, χρησιμοποιείται μόνο η αναγεννητική πέδηση. Κατά κανόνα το οριακό σημείο για αμιγή αναγεννητική πέδηση είναι για ζητούμενη επιβράδυνση μέχρι 0.2g. Για ζητούμενη επιβράδυνση άνω των 0.2g, ο ελεγκτής ρυθμίζει την δύναμη πέδησης, έτσι ώστε η κατανομή της πέδησης μεταξύ εμπροσθίων και οπισθίων τροχών να ακολουθεί την ιδανική καμπύλη. Σε αυτήν την περίπτωση, θα χρησιμοποιηθεί η αναγεννητική πέδηση στο έπακρο, με το μηχανικό σύστημα φρένων να συμπληρώνει την απαιτούμενη δύναμη για την δεδομένη επιθυμητή επιβράδυνση. Ωστόσο σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα, η μέγιστη ροπή του σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό περιστροφής του, έτσι στους χαμηλούς ρυθμούς περιστροφής, η ροπή είναι συνεχής και στην μέγιστη τιμή της, ενώ από ένα σημείο περιστροφής και μετά η ροπή μειώνεται υπερβολικά. Επομένως η εφαρμοζόμενη μηχανική ισχύς πέδησης μεταβάλλεται με την ταχύτητα για δεδομένη επιβράδυνση, συνεπώς ένας ενεργός έλεγχος των συμβατικών μηχανικών φρένων είναι απαραίτητος και αυτός είναι ένας τομέας που αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Απαιτείται λοιπόν, να υπάρχει ένα ηλεκτρικό σύστημα το οποίο να έχει την δυνατότητα να ενεργοποιεί ταυτόχρονα το μηχανικό και το αναγεννητικό σύστημα πέδησης.

Σε αντίθεση με συμβατικά συστήματα πέδησης που χρησιμοποιούνται σε αμιγώς θερμικά οχήματα ευρύτατα, τα οποία ενεργοποιούνται από την υδραυλική πίεση που προσφέρει ο οδηγός με το πάτημα του πεντάλ του φρένου, στα αναγεννητικά συστήματα πέδησης δεν υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ της δύναμης πέδησης που ασκεί ο οδηγός με το σύστημα πέδησης. Ο οδηγός να μην προσδιορίζει τον απαιτούμενο ρυθμό επιβράδυνσης μέσω της θέσης του πεντάλ του φρένου, ωστόσο ο ηλεκτρονικός ελεγκτής και σερβομηχανισμοί πέδησης είναι υπεύθυνοι για να κατανεύμουν την απαιτούμενη ισχύ πεδήσεως με τον ιδανικό τρόπο μεταξύ των δυο αξόνων του οχήματος, αλλά και να αποφασίσουν το ποσοστό αναγεννητικής και μηχανικής πέδησης.



Διάγραμμα 2.2 Δυνάμεις πέδησης στους 2 άξονες για σειριακή πέδηση με μέγιστη αίσθηση

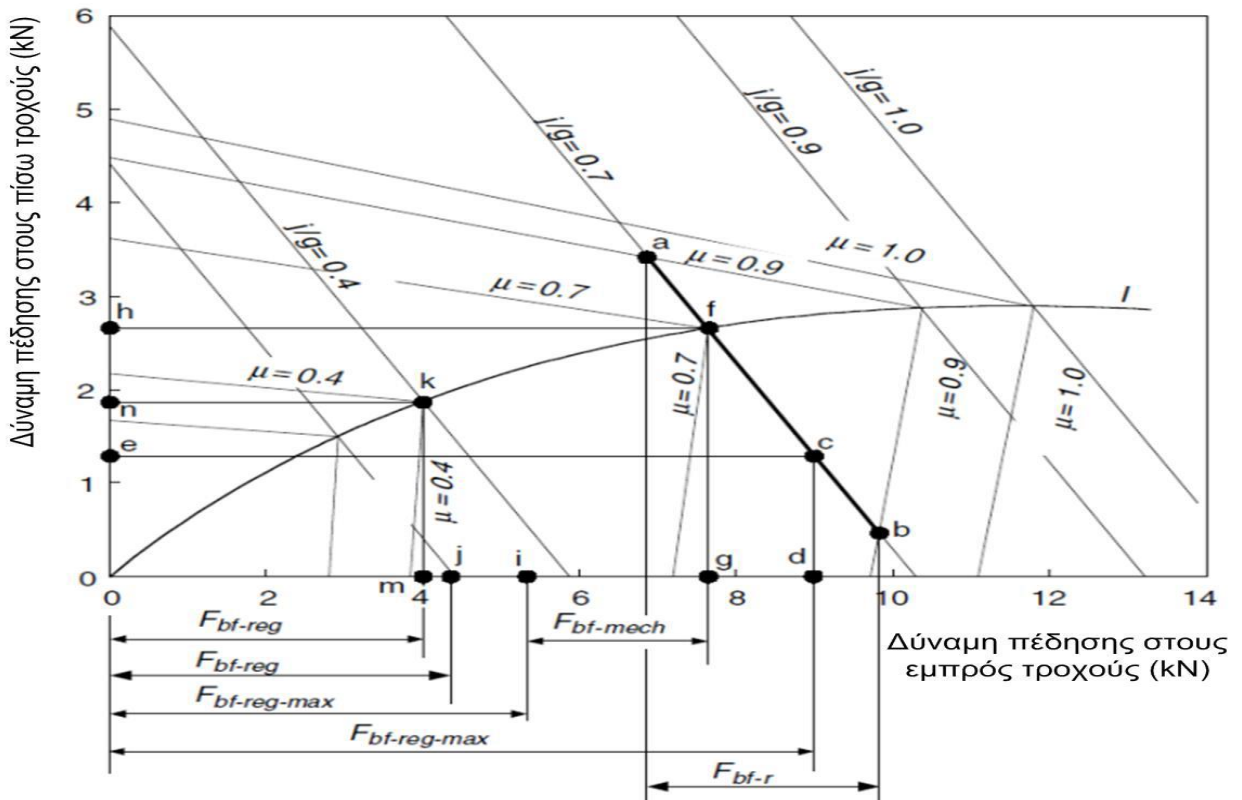
2.11.3 Σειριακή πέδηση για μέγιστη ανάκτηση ενέργειας

Όταν το όχημα βρίσκεται σε καθεστώς πέδησης με λόγο επιβράδυνσης/επιτάχυνση βαρύτητας $<$ από τον συντελεστή τριβής του οδοστρώματος, οι δυνάμεις μεταξύ των εμπροσθίων και των οπισθίων τροχών, μπορούν να μεταβληθούν εντός ενός συγκεκριμένου εύρους. Αυτό το εύρος φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 3.3 όπου, από την γραμμή a,b, όπου $\mu=0.9$ και $j/g=0.7$.

Στην περίπτωση αυτή η αναγεννητική πέδηση πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά προτεραιότητα. Έαν η διαθέσιμη ισχύς πεδήσεως που παράγεται από τον ηλεκτροκινητήρα είναι εντός αυτής της περιοχής, τότε η δύναμη πέδησης στους εμπρός τροχούς θα πρέπει να λάβει χώρα μόνο μέσω αναγεννητικής πεδήσεως. Η δύναμη πέδησης στους πίσω τροχούς, σημείο e, αναπτύσσεται όταν υπάρχει απαίτηση για ρυθμό επιβράδυνσης μεγαλύτερο από αυτόν που μπορεί να παράσχει ο ηλεκτροκινητήρας.

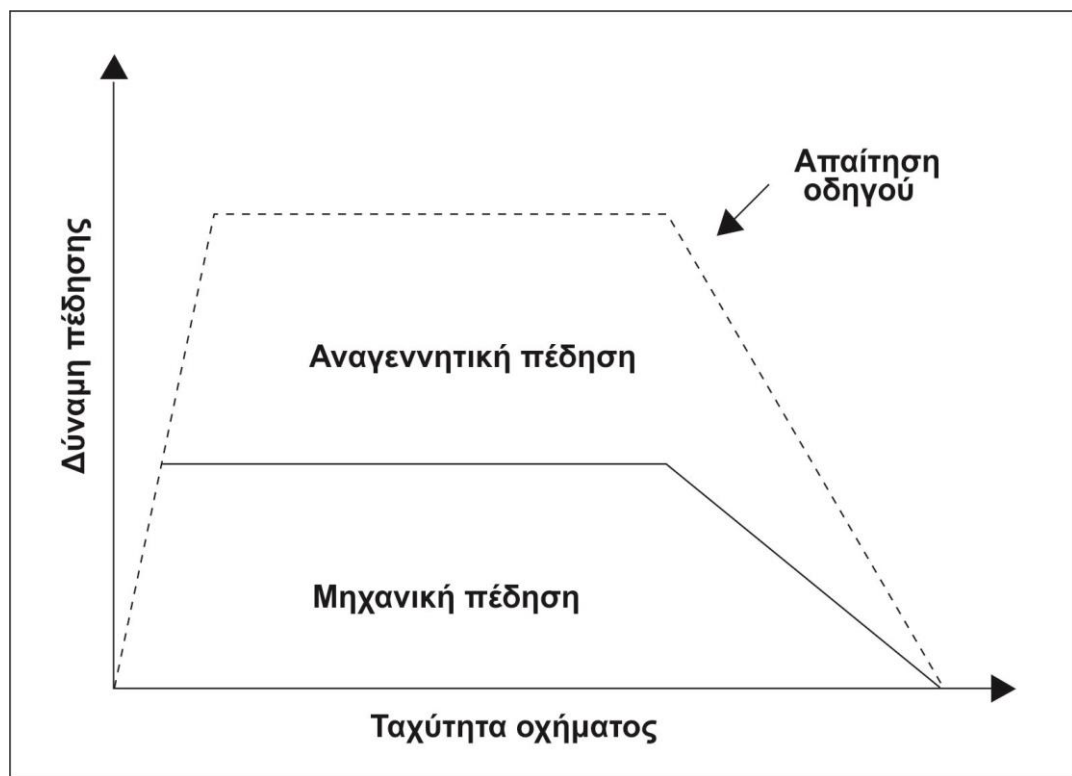
Εάν η διαθέσιμη δύναμη πέδησης είναι μικρότερη από την τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο a (π.χ σημείο i στο διάγραμμα 2.3), ο ηλεκτροκινητήρας θα πρέπει να ελέγχεται ώστε να παράγει την μέγιστη ισχύ αναγεννητικής πέδησης. Οι εμπρόσθιες και οπίσθιες δυνάμεις πέδησης, πρέπει να ελέγχονται στο σημείο f, ώστε να βελτιστοποιείται η αίσθηση για τον οδηγό και να μειωθεί η απόσταση ακινητοποίησης ή απαιτούμενης ταχύτητας. Στην περίπτωση αυτή, η πρόσθετη δύναμη πέδησης στους

εμπρόσθιους τροχούς πρέπει να αναπτυχθεί με μηχανική πέδηση, κατά το ποσό $F_{bf-mech}$ και η δύναμη πέδησης στον οπίσθιο άξονα αντιπροσωπεύεται από το σημείο h. Όταν ο ρυθμός επιβράδυνσης είναι πολύ μικρότερος από τον συντελεστή πρόσφυσης ελαστικού-δρόμου ($j/g=0.3$) και η αναγεννητική πέδηση μπορεί να καλύψει την συνολική ζήτηση της δύναμης πέδησης, τότε χρησιμοποιείται μόνο η αναγεννητική πέδηση και για τους τέσσερις τροχούς (σημείο i). Όταν ο ρυθμός επιβράδυνσης $j/g=\mu$, τότε το σημείο λειτουργίας των εμπρόσθιων και οπίσθιων δυνάμεων πέδησης είναι, πρέπει να είναι πάνω στην καμπύλη I. Σε δρόμο με υψηλό συντελεστή πρόσφυσης ($\mu=0.7$, σημείο f), εφαρμόζεται η μέγιστη δύναμη πέδησης με ανάκτηση και το υπόλοιπο ποσό καλύπτεται από το μηχανικό σύστημα πέδησης. Για δρόμο με χαμηλό συντελεστή πρόσφυσης ($\mu=0.4$, σημείο k), η αναγεννητική πέδηση και μόνο, επαρκεί για την πέδηση των εμπροσθίων τροχών. Όταν ο λόγος j/g που αντιπροσωπεύει τον ρυθμό επιβράδυνσης, είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή πρόσφυσης μ , αυτός ο ρυθμός επιβράδυνσης δεν θα επιτευχθεί ποτέ, λόγω του περιορισμού της πρόσφυσης του οδοστρώματος. Η μέγιστη επιβράδυνση που μπορεί να εφαρμοστεί στο όχημα είναι $(\frac{a}{g_{max}}) = \mu$. Τα σημεία λειτουργίας των εμπρόσθιων και οπίσθιων δυνάμεων πέδησης είναι πάνω στην καμπύλη I ($\mu=0.5$ και $j/g>0.4$) και το σημείο λειτουργίας είναι το σημείο k, ενώ ο μέγιστος ρυθμός επιβράδυνσης είναι $j/g=0.4$.



Διάγραμμα 2.3 Δυνάμεις πέδησης στους 2 άξονες για σειριακή πέδηση με μέγιστη ανάκτηση ενέργειας

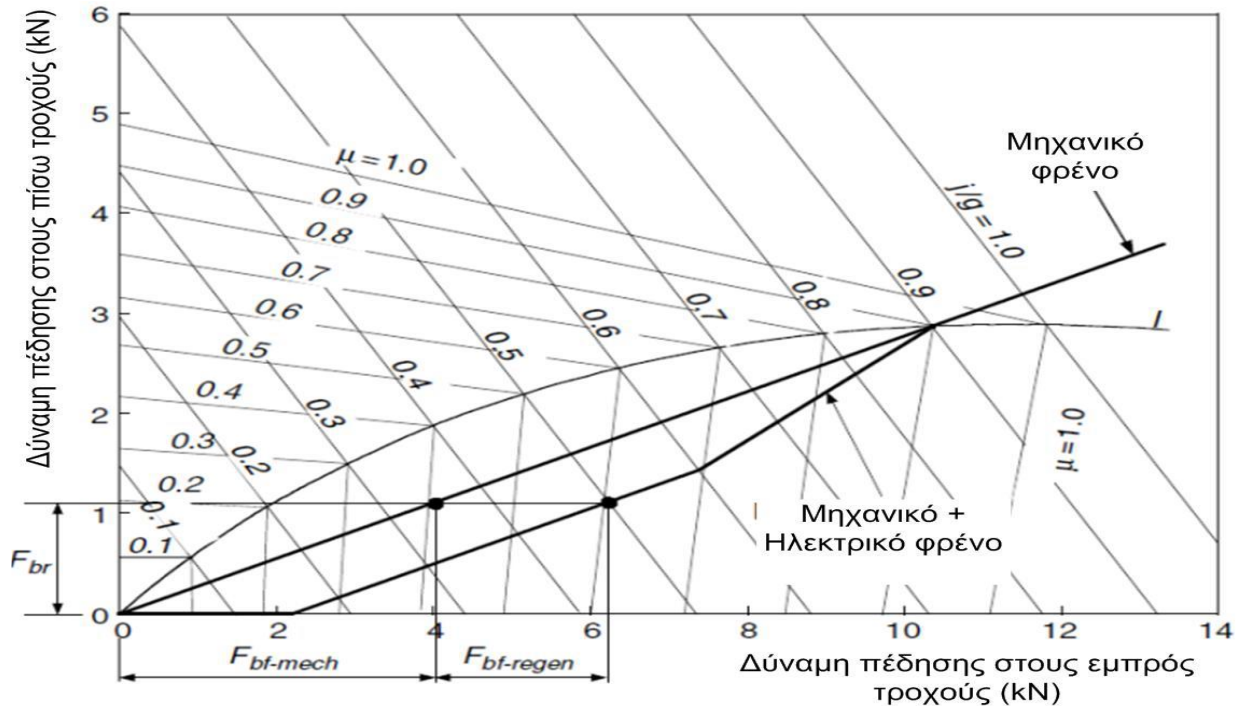
2.12 Παράλληλη πέδηση



Διάγραμμα 2.4 Διάγραμμα ταχύτητας οχήματος-δύναμης πέδησης για παράλληλη πέδηση

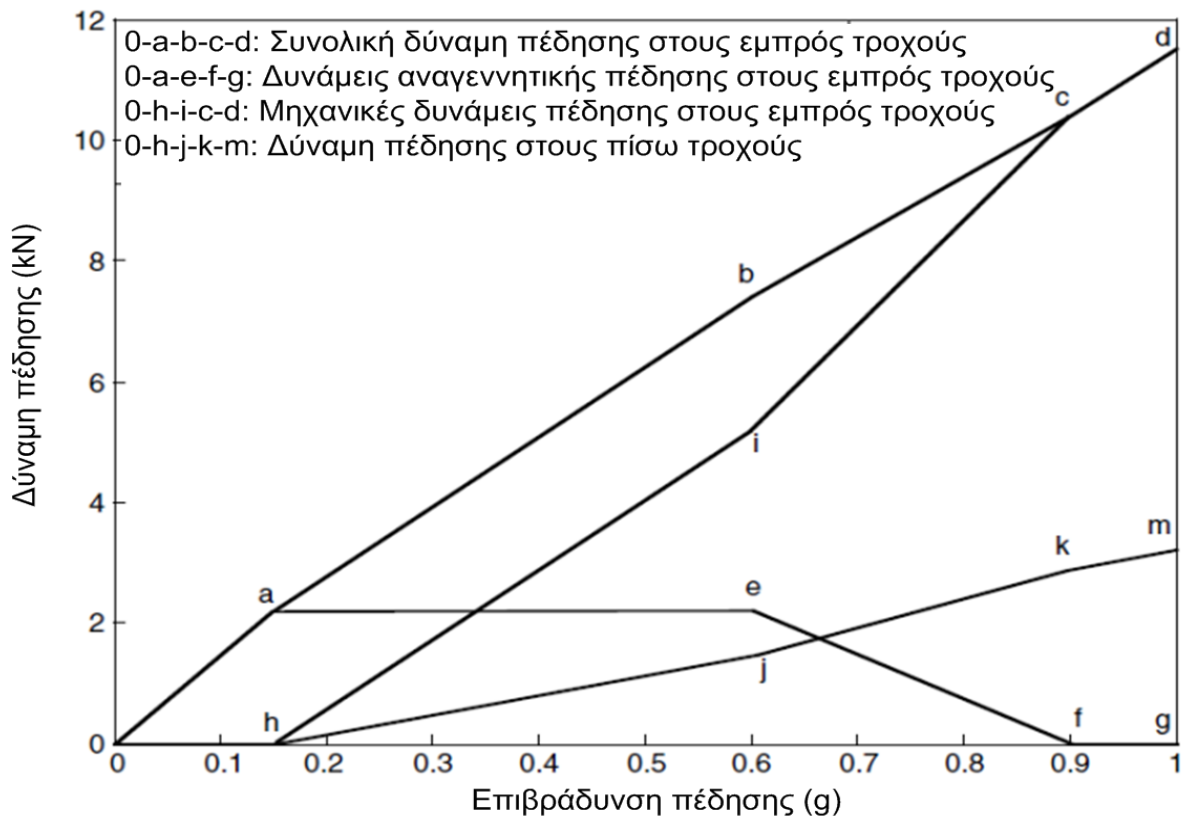
Κατά την παράλληλη πέδηση, από κοινού η ηλεκτρική μηχανή μαζί με το μηχανικό σύστημα πέδησης συμμετέχουν στην επιβράδυνση του οχήματος. Εφόσον το μηχανικό σύστημα πέδησης δεν μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα από την δύναμη που ασκείται στο πεντάλ του φρένου από τον οδηγό, αναγκαστικά μετατρέπει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος σε θερμική αντί για ηλεκτρική. Συνεπώς η παράλληλη πέδηση από πλευράς ανάκτησης ενέργειας είναι μια επιλογή χειρότερη από την σειριακή. Ωστόσο το βασικό πλεονέκτημα της παράλληλης αναγεννητικής πεδήσεως είναι το γεγονός, είναι ότι παρουσιάζει χαμηλή πολυπλοκότητα και κόστος υλοποίησης. Για την περίπτωση της παράλληλης πέδησης, το μηχανικό σύστημα πέδησης απαιτεί μικρής έκτασης μετατροπές και αλγορίθμους ελέγχου για τον ηλεκτρικό κινητήρα και έτσι μπορεί να εφαρμοστεί ευχερώς σε ένα όχημα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει επιπρόσθετα το πλεονέκτημα, του ότι πάντα είναι εμπλεγμένη η μηχανική πέδηση στο όχημα σε περίπτωση αστοχίας της αναγεννητικής. Σε ότι αφορά την αρχή λειτουργίας της παράλληλης πέδησης, το μηχανικό σύστημα φρένων παρέχει μια προκαθορισμένη δύναμη πέδησης στους εμπρόσθιους και οπίσθιους τροχούς ανάλογα με την υδραυλική πίεση του κυλίνδρου, ενώ και η αναγεννητική πέδηση που προσφέρει ο ηλεκτροκινητήρας εξαρτάται από αυτήν την υδραυλική πίεση. Λόγω του ότι η διαθέσιμη αναγεννητική δύναμη πέδησης είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ηλεκτρικού κινητήρα και με δεδομένο ότι δεν μπορεί να ανακτηθεί σχεδόν καθόλου κινητική ενέργεια σε χαμηλή ταχύτητα, η αναγεννητική πέδηση σε περίπτωση υψηλού

ρυθμού επιβράδυνσης (π.χ. $a/g=0.9$) έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι μηδενική για να διατηρηθεί η ισορροπία της πέδησης. Όταν η απαιτούμενη επιβράδυνσης είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή έστω $0.15g$, εφαρμόζεται μόνο η αναγεννητική πέδηση. Στο διάγραμμα 2.5 απεικονίζονται η δύναμη της αναγεννητικής πέδησης και οι δυνάμεις της μηχανικής πέδησης στους εμπρόσθιους και οπίσθιους τροχούς.



Διάγραμμα 2.5 Δυνάμεις πέδησης στους 2 άξονες για παράλληλη πέδηση

Στο διάγραμμα 2.6 φαίνεται η συνολική δύναμη πέδησης, η αναγεννητική δύναμη πέδησης, η μηχανική δύναμη πέδησης στους εμπρόσθιους τροχούς, καθώς και η δύναμη πέδησης στους οπίσθιους τροχούς σε ένα παράλληλο σύστημα πέδησης ενός οχήματος .

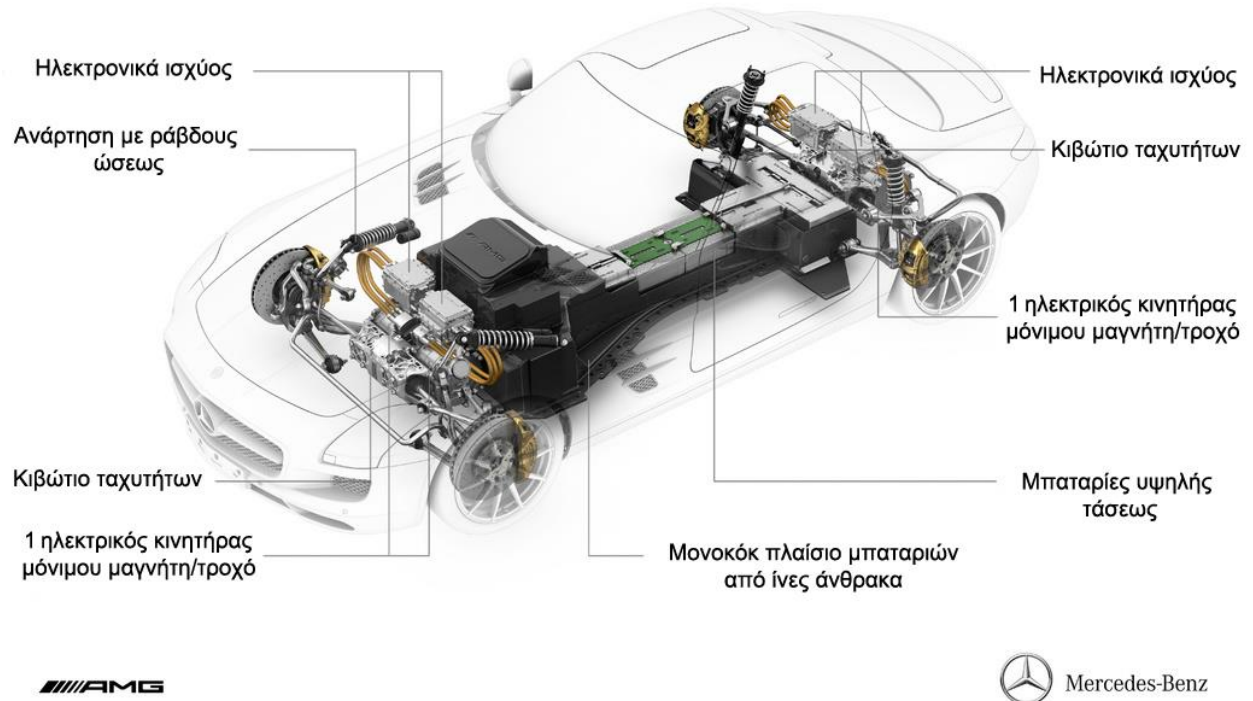


Διάγραμμα 2.6. Δύναμη πέδησης ανάλογα με τον ρυθμό επιβράδυνσης

2.13 Συνεργασία της αναγεννητικής πέδησης με το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών (ABS).

Όλα τα σύγχρονα οχήματα είτε είναι αμιγώς θερμικά, είτε είναι υβριδικά, είτε είναι αμιγώς ηλεκτρικά εφοδιάζονται με σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών, το λεγόμενο ABS. Το εν λόγω σύστημα βοηθά τον οδηγό του οχήματος να διατηρήσει τον έλεγχο του κατά την διάρκεια μιας πέδησης πανικού ή/και σε περίπτωση που απαιτείται πέδηση σε ολισθηρό οδόστρωμα. Κατά συνέπεια αυξάνεται σημαντικά η προσφερόμενη ενεργητική ασφάλεια. Η συνεργασία του ABS με την αναγεννητική πέδηση λαμβάνει χώρα για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι γιατί η ροπή που μπορεί να προσφέρει η αναγεννητική πέδηση κατά μόνας δεν είναι επαρκώς μεγάλη για να καλύψει την ζητούμενη ροπή από τον οδηγό και ο δεύτερος είναι γιατί υπάρχουν στιγμές που η αναγεννητική πέδηση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε λόγω του ότι οι συσσωρευτές του οχήματος είναι πλήρως φορτισμένοι, είτε γιατί η θερμοκρασία αυτών είναι υψηλή. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ABS χρησιμοποιείται για να παράσχει την απαιτούμενη ροπή πέδησης. Συνεπώς ο έλεγχος ταυτόχρονα του ABS και της αναγεννητικής πέδησης είναι μεγάλης σημασίας. Γενικά ο έλεγχος της ροπής πέδησης σε επίπεδο ηλεκτροκινητήρα είναι πιο εύκολος σε σχέση με τον έλεγχο της μηχανικής πέδησης. Έτσι με αυτό τον τρόπο, σε ένα όχημα το οποίο διαθέτει έναν ηλεκτροκινητήρα/τροχό μπορεί να εφαρμοστεί η αναγεννητική πέδηση και ταυτόχρονα να εξομοιωθεί το ABS με μεγάλη ευχέρεια.

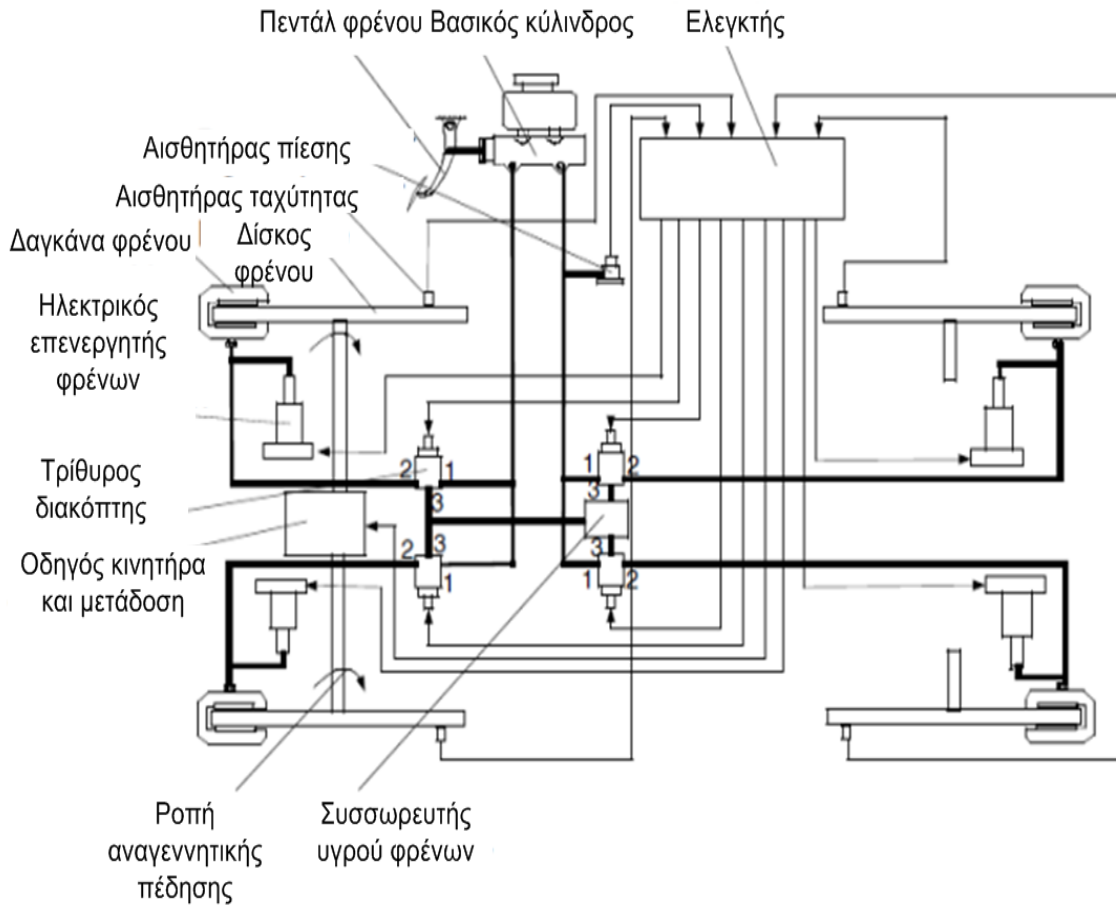
Mercedes-Benz SLS AMG ELECTRIC DRIVE



Εικόνα 2.2 Τομή ηλεκτροκίνητου οχήματος με 1 ηλεκτροκινητήρα/τροχό και εξομοίωση ABS σε επίπεδο ηλεκτροκινητήρα

Τα κύρια συστατικά ενός συστήματος πέδησης που μπορεί να εξομοιώσει την λειτουργία του ABS είναι το πεντάλ του φρένου, ο κεντρικός κύλινδρος, οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι ηλεκτρικοί επενεργητές πέδησης, οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι τρίθυροι διακόπτες, ο αισθητήρας πίεσης, ένα δοχείο εκτόνωσης του υδραυλικού υγρού και ένας κεντρικός ελεγκτής. Ο αισθητήρας πίεσης μετρά την πίεση του υγρού, το οποίο αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη δύναμη πέδησης. Το υγρό εκτονώνεται στο δοχείο εκτόνωσης, μέσω των ηλεκτρονικά ελεγχόμενων τρίθυρων διακοπών. Αυτό προσομοιώνει την αίσθηση της πέδησης σε ένα συμβατικό σύστημα. Μετά την λήψη του σήματος για την δύναμη της πέδησης, ο κεντρικός ελεγκτής καθορίζει τις ροπές πέδησης στους εμπρός και πίσω τροχούς, την ροπή της αναγεννητικής πέδησης και την μηχανική ροπή πέδησης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ηλεκτροκινητήρα. Ο ελεγκτής της ηλεκτρικής μηχανής, οδηγεί τον κινητήρα ώστε να παράγει την σωστή ροπή πέδησης και ο ελεγκτής της μηχανικής πέδησης ελέγχει τους ηλεκτρονικά ελεγχόμενους επενεργητές ώστε να παράξουν τις σωστές ροπές πέδησης για κάθε τροχό. Οι επενεργητές πέδησης επίσης ελέγχονται ώστε να λειτουργούν ως σύστημα αντιμπλοκαρίσματος και να αποτραπεί το

κλείδωμα των τροχών κατά την πέδηση. Αν ένας ηλεκτρικός επενεργητής αποτύχει, ο τρίθυρος διακόπτης κλείνει την θύρα 3 και ανοίγει την θύρα 2, με αποτέλεσμα το υγρό να εκτονωθεί απευθείας στον κύλινδρο του τροχού και να παραχθεί η απαιτούμενη ροπή πέδησης.



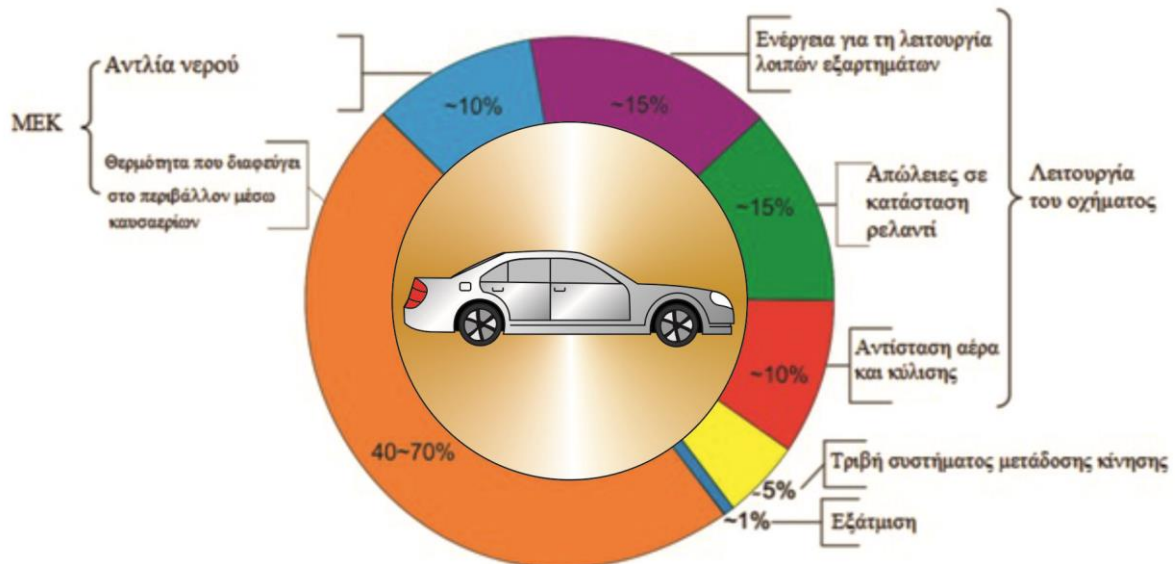
Σχήμα 2.4 Ηλεκτρονικά ελεγχόμενη αναγεννητική πέδηση με εξομοίωση ABS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Η αναγεννητική πέδηση στους διαφόρους τύπους οχημάτων

Αν και η αναγεννητική πέδηση, ως θεμελιώδη επιδίωξη, έχει την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε οποιονδήποτε τύπο οχήματος και αν εφαρμόζεται, ωστόσο η υλοποίησή της στους διαφόρους τύπους οχημάτων παρουσιάζει διαφοροποιήσεις στον βαθμό που αυτή χρησιμοποιείται και αυτό οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη ή μη θερμικού κινητήρα στο όχημα.

3.1 Η αναγεννητική πέδηση σε αμιγώς θερμικά οχήματα

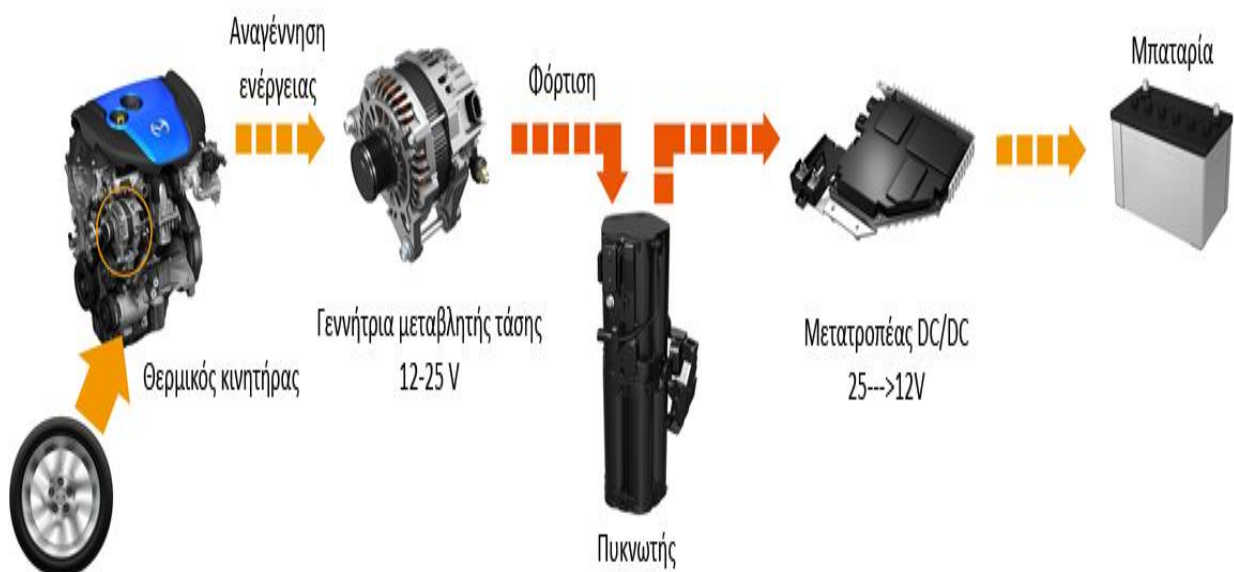
Τα αμιγώς θερμικά οχήματα παρουσιάζουν τυπικό βαθμό απόδοσης από 30%-50% με το 30% να αφορά θερμικούς κινητήρες με καιόμενο καύσιμο βενζίνη και το 50%, η ανώτερη τιμή βαθμού απόδοσης για ισχυρά υπερπληρωμένους κινητήρες πετρελαίου. Η μείζων πηγή απωλειών για τα θερμικά οχήματα είναι τα καυσαέρια τους που φέρουν ως θερμική ενέργεια το ποσοστό της χημικής ενέργειας που δεν κατέστη εφικτό να γίνει μηχανική από τον κινητήρα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την προώθηση του οχήματος.



Σχήμα 3.1 Ροή ενέργειας ενός τυπικού θερμικού οχήματος

Από την ανωτέρω εικόνα, διαπιστώνουμε ότι περίπου το 40% της ενέργειας που τελικά λαμβάνουμε από το καύσιμο, το 10% καταναλίσκεται από την αντλία νερού, το 15% για την λειτουργία των περιφερειακών εξαρτημάτων ολόκληρου του οχήματος, ενώ 15% είναι οι απώλειες για λειτουργία στις

900 Rpm (ρελαντί) όταν το αυτοκίνητο είναι ακινητοποιημένο. Πλέον ωστόσο όλο και περισσότεροι κατασκευαστές οχημάτων εφαρμόζουν συστήματα start-stop, τα οποία όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο (π.χ. σε ένα φανάρι), τότε ο κινητήρας σβήνει και επανενεργοποιείται αυτόματα με το που επιλέξει ο οδηγός την 1^η ταχύτητα στο κιβώτιο ταχυτήτων, συνεπώς ένα σημαντικό κομμάτι αυτών των απωλειών εξαλείφεται. Το υπόλοιπο 25% που αφορά την λειτουργία της αντλίας του νερού καθώς και τα περιφερειακά συστήματα που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, όπως τα ηλεκτρικά παράθυρα, οι καθρέπτες, ο κλιματισμός, η υποβοήθηση του τιμονιού, είναι απαιτήσεις ενέργειας οι οποίες μπορούν να ικανοποιηθούν από την ενσωμάτωση συστήματος αναγεννητικής πεδήσεως σε ένα αμιγώς θερμικό όχημα.



Εικόνα 3.1 Σύστημα αναγεννητικής πεδήσεως σε αμιγώς θερμικό όχημα

Να σημειωθεί εδώ, ότι στην γενική περίπτωση, η αντλία νερού καθώς και ο κλιματισμός ενός οχήματος, επί της ουσίας καταναλώνουν ισχύ μηχανική, η οποία παρέχεται απευθείας από την θερμική μηχανή του οχήματος μέσω μαντοκινήσεως, ωστόσο με την ευρύτερη διάχυση της αναγεννητικής πεδήσεως στα σύγχρονα οχήματα, τείνει να αντικατασταθεί η συμβατική αντλία νερού, με ηλεκτρική η οποία τροφοδοτείται από ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς και το σύστημα κλιματισμού σε κάποιες περιπτώσεις, με κάποιο αμιγώς ηλεκτρικό.

3.2 Η αναγεννητική πέδηση σε υβριδικά οχήματα

Υβριδικά οχήματα χαρακτηρίζονται εκείνα τα οχήματα, τα οποία διαθέτουν 2 μονάδες προώθησης. Η μία είναι αμιγώς θερμική, η οποία είναι συνηθέστερα κάποιος κινητήρας βενζίνης και σε μικρότερο βαθμό κινητήρας πετρελαίου, ενώ διαθέτουν και έναν ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος κατά περιπτώσεις συμμετέχει στην προώθηση του οχήματος.

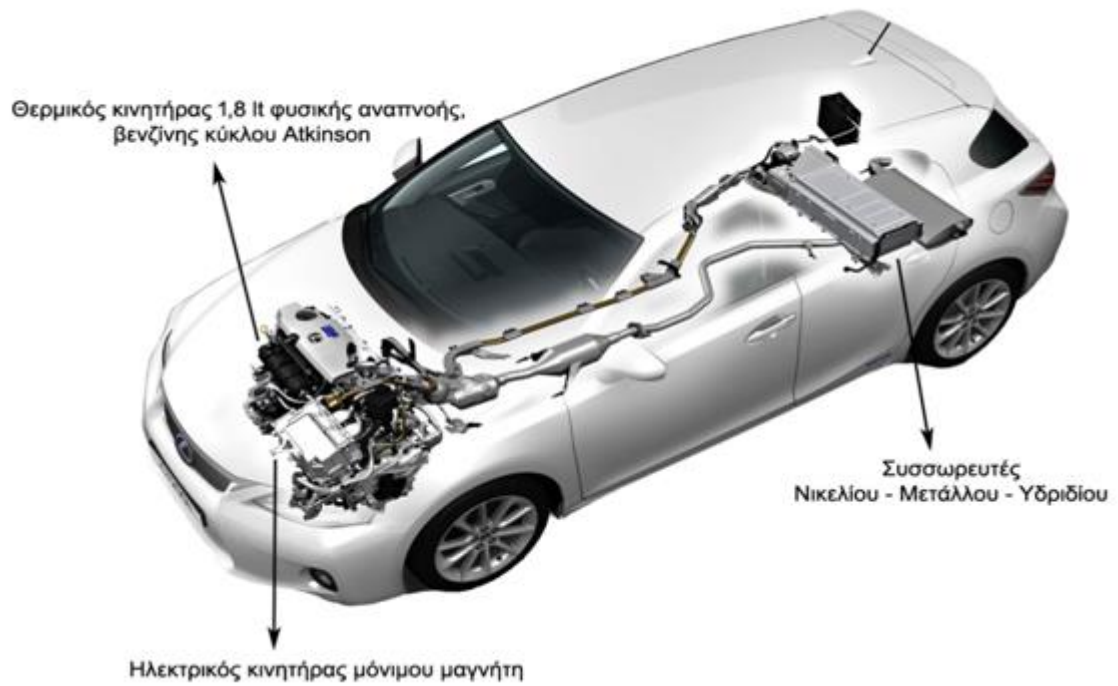
Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι εναλλασσομένου ρεύματος, σύγχρονος, μόνιμου μαγνήτη, ο οποίος ευνοεί ιδιαίτερα την αναγεννητική πέδηση σε σχέση με τον επαγωγικό.

Η αναγεννητική πέδηση βρίσκει καθολική εφαρμογή σε όλα τα υβριδικά οχήματα ανεξαρτήτως τύπου.

3.3 Διαχωρισμός υβριδικών οχημάτων με βάση τον χρησιμοποιούμενο θερμικό κινητήρα

3.3.1 Υβριδικά με θερμικό κινητήρα βενζίνης

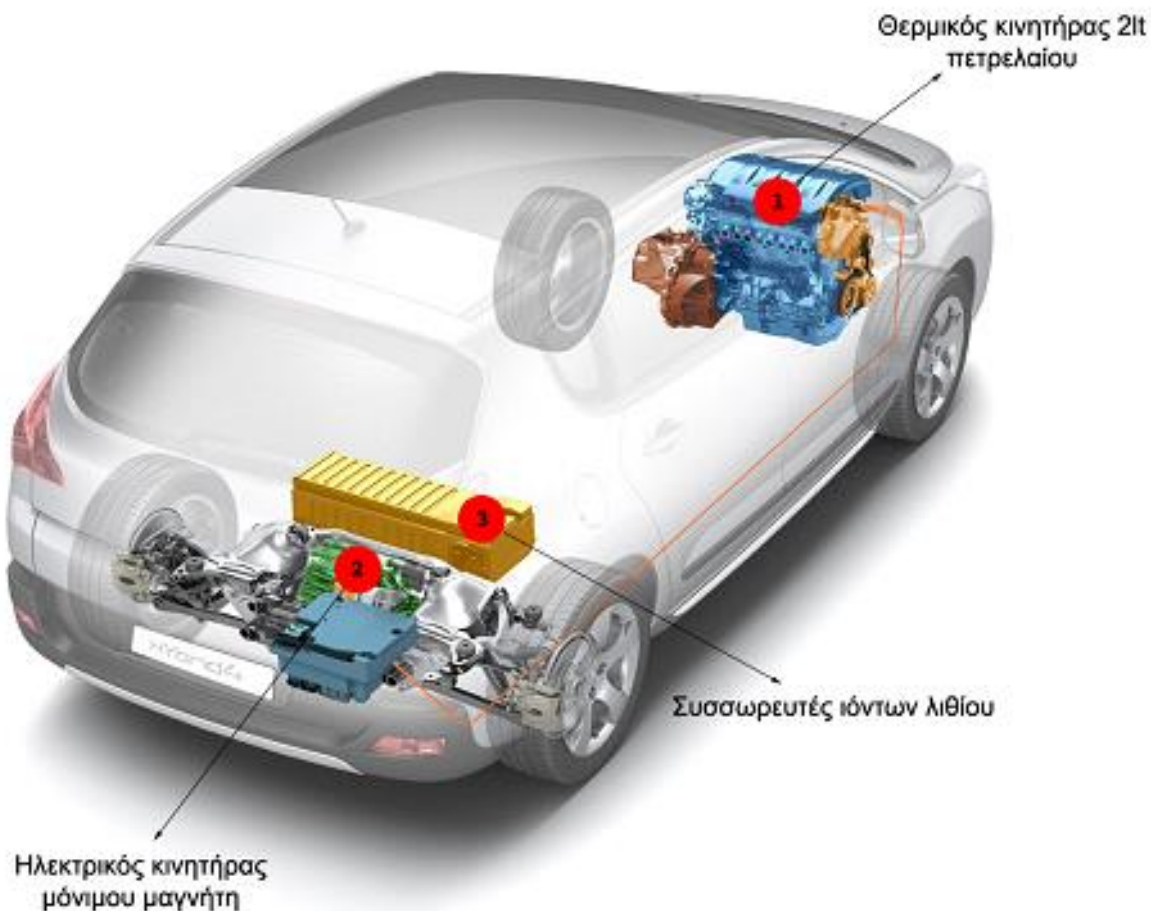
Τα υβριδικά οχήματα βενζίνης διαθέτουν έναν θερμικό κινητήρα βενζίνης, ο οποίος λειτουργεί είτε σε κύκλο Otto, είτε σε κύκλο Atkinson ο οποίος είναι αποδοτικότερος διότι επιτρέπει την χρήση υψηλότερης γεωμετρικής συμπίεσης, με κόστος ωστόσο σε παραγωγή στρεπτικής ροπής και ισχύος. Το εγγενές μειονέκτημα αυτό του κύκλου Atkinson αίρεται από την άμεση ροπή που προσφέρει ο ηλεκτρικός κινητήρας στο όχημα. Εν γένει προτιμάται η φυσική αναπνοή στους θερμικούς κινητήρες των υβριδικών οχημάτων, κυρίως για λόγους απλότητας αλλά και χωροταξικούς, γιατί η ύπαρξη ενός πρόσθετου κινητήρα ηλεκτρικού στα υβριδικά οχήματα συνεπάγεται και μια πρόκληση στο σχεδιασμό του οχήματος. Οι Ιάπωνες κατασκευαστές χρησιμοποιούν αποκλειστικά κινητήρες φυσικής αναπνοής στα υβριδικά τους οχήματα, ενώ μερικοί εξ'αυτών χρησιμοποιούν και τον κύκλο Atkinson, με τον όμιλο Toyota να τον χρησιμοποιεί καθολικά στα αντίστοιχης τεχνολογίας οχήματά του. Οι Ευρωπαίοι κατασκευαστές ωστόσο εξελίσσουν και υβριδικά τα οποία διαθέτουν υπερπληρωμένους κινητήρες, όπως για παράδειγμα η Porsche με το Panamera S E-Hybrid, το οποίο διαθέτει μηχανικά υπερπληρωμένο κινητήρα με χωρητικότητα 3lt με συμπιεστή κινούμενο εκ στροφαλοφόρου άξονος, τύπου Roots και ηλεκτρικό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη ή το Bmw ActiveHybrid3 που εφοδιάζεται με θερμικό κινητήρα χωρητικότητας 3lt, μονοβάθμια υπερπληρωμένο, με ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή και ηλεκτρικό κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.



Εικόνα 3.2. Τομή του υβριδικού Lexus CT 200H

3.3.2 Υβριδικά με θερμικό κινητήρα πετρελαίου

Τα υβριδικά οχήματα, τα οποία τον θερμικό εαυτό τους, εκφράζει ένας κινητήρας πετρελαίου, χαρακτηρίζονται ως τα πιο αποδοτικά υβριδικά, κυρίως λόγω του ότι ο θερμικός κινητήρας πετρελαίου εγγενώς, συμπιέζει ισχυρώς τον αέρα, μέσω ισχυρής υπερπληρώσεως με ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή συνδεδεμένου σε κοινή άτρακτο, αλλά και λόγω υψηλής γεωμετρικής συμπίεσης, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης του οχήματος συνολικά. Και σε αυτήν την περίπτωση υβριδικού οχήματος, ο ηλεκτρικός κινητήρας που χρησιμοποιείται είναι σύγχρονος, μόνιμου μαγνήτη. Εν γένει τα υβριδικά οχήματα με θερμικό κινητήρα πετρελαίου παρουσιάζουν τον καλύτερο βαθμό απόδοσης, λόγω του εγγενώς καλύτερου βαθμού απόδοσης του κινητήρα πετρελαίου σε σχέση με αντίστοιχης ισχύος κινητήρα βενζίνης.

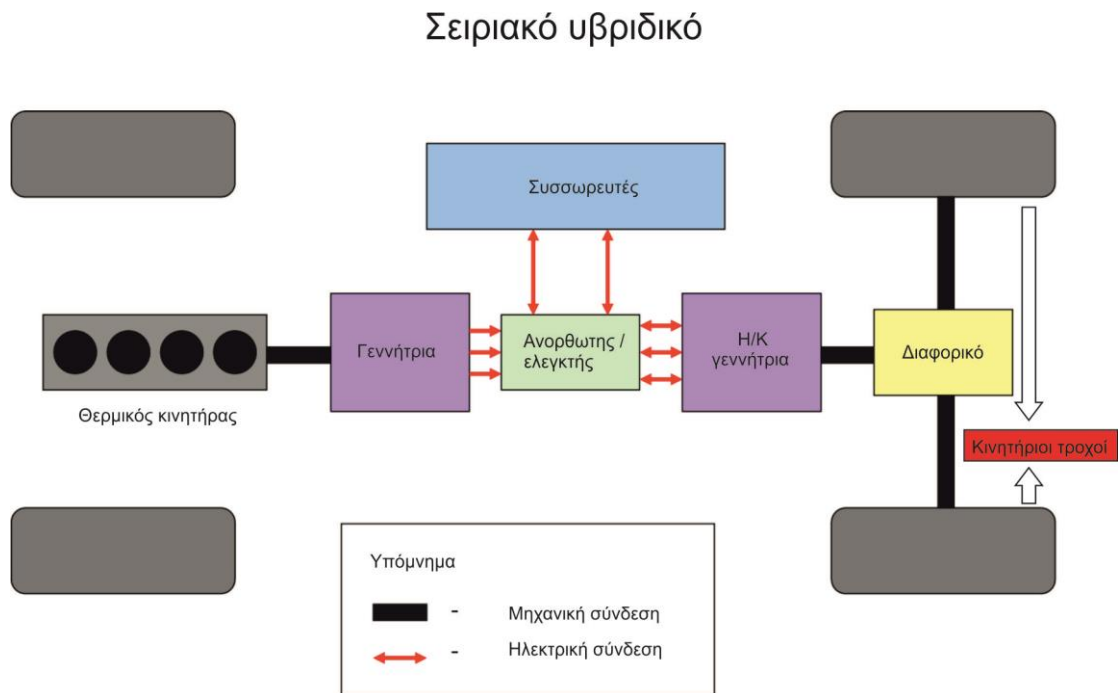


Εικόνα 3.3. Τομή του υβριδικού Peugeot 3008 Hybrid4

3.4 Διαχωρισμός υβριδικών οχημάτων με βάση την διάταξη των μονάδων προώθησης

3.4.1 Σειριακά υβριδικά

Στο σειριακό υβριδικό όχημα, ο θερμικός κινητήρας του οχήματος δεν έχει καμιά μηχανική σύνδεση με τους τροχούς και ουσιαστικά είναι αποκλειστικά επιφορτισμένος με καθήκοντα οδήγησης μιας ηλεκτρογεννήτριας, η οποία ακολούθως φορτίζει τους συσσωρευτές οι οποίοι τελικά τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος είναι αποκλειστικά επιφορτισμένος με την κίνηση του οχήματος.



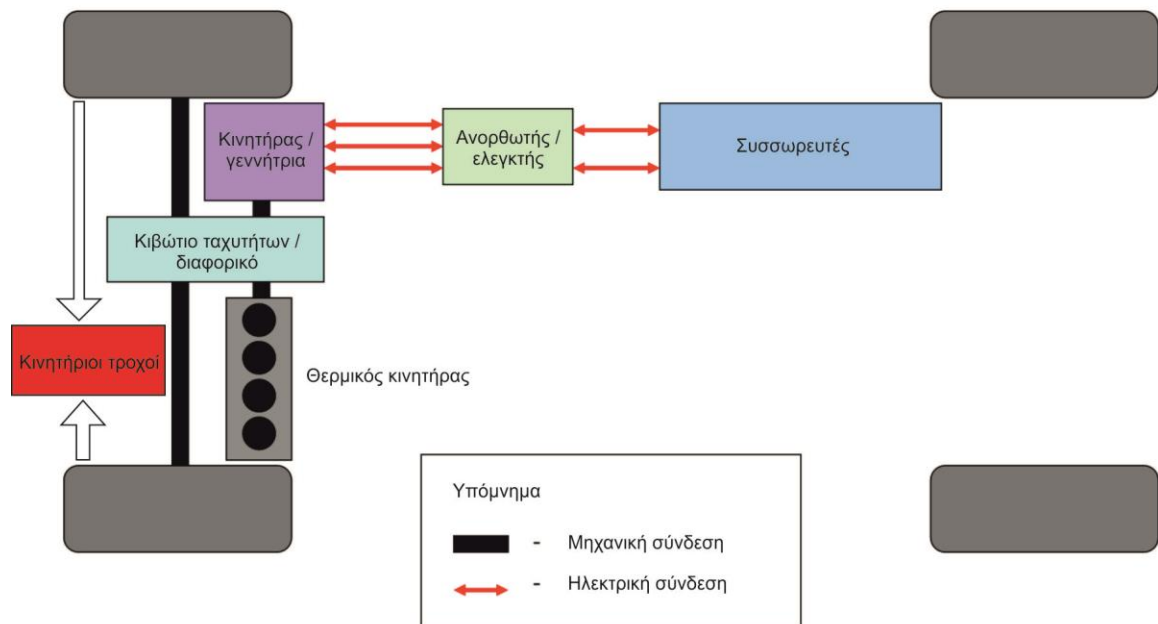
Σχήμα 3.2. Σχηματική απεικόνιση τοπολογίας σειριακού υβριδικού οχήματος

Οι συσσωρευτές επίσης φορτίζονται εν μέρει μέσω αναγεννητικής πεδήσεως, όπου σε αυτήν την περίπτωση ο ηλεκτρικός κινητήρας δρα ως γεννήτρια η οποία μετατρέπει την ανακτώμενη κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Σε αυτά τα οχήματα, κατά συντριπτική πλειοψηφία, η ενεργειακή πυκνότητα των συσσωρευτών που έχουν επιλεγεί, είναι επαρκώς υψηλή ώστε να υπάρχει και η δυνατότητα φόρτισής τους και μέσω πρίζας.

3.4.2 Παράλληλα υβριδικά

Η βασική ιδιότητα των παραλλήλων υβριδικών οχημάτων είναι ότι σε αντίθεση με τα σειριακά υβριδικά, ο θερμικός κινητήρας εδώ συμμετέχει με άμεσο τρόπο στην προώθηση του οχήματος, μέσω άμεσης συνδέσεως αυτού με τους παραλαμβάνοντες την ισχύ τροχούς. Σε αυτού του τύπου τα υβριδικά οχήματα, η συνεργασία θερμικού κινητήρα και ηλεκτρικής μηχανής, για την προώθηση του οχήματος, λαμβάνει χώρα όταν ο οδηγός βρίσκεται σε μια απαιτητική κατάσταση από πλευράς φορτίου, π.χ. μια προσπέραση, η οποία πρέπει να ολοκληρωθεί για λόγους ενεργητικής ασφάλειας εντός του συντομότερου δυνατού χρονικού διαστήματος. Λόγω του ότι στις ενδιάμεσες επιταχύνσεις ενός οχήματος, παίζει καθοριστικό ρόλο η στρεπτική ροπή, η συνδυασμένη ροπή θερμικού και ηλεκτρικού κινητήρα, σε τέτοιες συνθήκες το παράλληλο υβριδικό όχημα διαθέτει υπεροχή. Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται η τοπολογία ενός παράλληλου υβριδικού οχήματος.

Παράλληλο υβριδικό



Σχήμα 3.3. Σχηματική απεικόνιση τοπολογίας παράλληλου υβριδικού οχήματος

Η προώθηση του οχήματος περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, ανάλογα με τις τρέχουσες απαιτήσεις. Μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο θερμικός κινητήρας, αποκλειστικά ο ηλεκτρικός αλλά προβλέπεται και η από κοινού συνεργασία τους.

Καθοριστικής σημασίας εδώ, είναι η επιλογή του κατασκευαστή του οχήματος σε ότι αφορά την δυνατότητα φόρτισης των συσσωρευτών μέσω πρίζας. Σε περίπτωση που έχει επιλεγεί αυτή η ατραπός, αυτό συνεπάγεται ότι οι συσσωρευτές που έχουν χρησιμοποιηθεί έχουν σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της ακτίνας της αμιγούς ηλεκτρικής προωθήσεως και προφανώς την μείωση της κατανάλωσης και των εκπεμπόμενων ρύπων στους τυποποιημένους κύκλους οδήγησης.

3.5 Καταστάσεις λειτουργίας σε ένα σειριακό υβριδικό όχημα

3.5.1 Αμιγής θερμική ηλεκτροπαραγωγή

Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, αποκλειστικά υπεύθυνος για την προώθηση του οχήματος καθίσταται ο θερμικός κινητήρας μέσω της ενέργειας που παρέχει στην ηλεκτροπαραγωγό γεννήτρια. Σε αυτήν την κατάσταση οι συσσωρευτές δεν συμμετέχουν στην τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα.

3.5.2 Υβριδική ηλεκτροπαραγωγή

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται και οι 2 μονάδες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του οχήματος. Αυτή λαμβάνει χώρα όταν οι απαιτήσεις για ισχύ από την πλευρά του χειριστού, ξεπερνούν τις δυνατότητες τροφοδοσίας των συσσωρευτών ή του θερμικού κινητήρα κατά μόνας. Συνήθης εφαρμογή αυτής της καταστάσεως είναι κατά την διάρκεια μιας προσπέρασης.

3.5.3 Αμιγής τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα από τους συσσωρευτές

Εδώ, ο θερμικός κινητήρας είναι απενεργοποιημένος, ως εκ τούτου δεν έχει καμιά συμμετοχή στην προώθηση του οχήματος η ηλεκτροπαραγωγός γεννήτρια που οδηγείται από αυτόν. Σε αυτήν την περίπτωση, όλη η ισχύς που απαιτείται από τον ηλεκτροκινητήρα παρέχεται από τους συσσωρευτές. Η κατάσταση αυτή συνεπάγεται μηδενικούς εκπεμπόμενους τοπικούς ρύπους. Χρησιμοποιείται κατά κανόνα για την υπερνίκηση της αδράνειας κατά την αρχική εκκίνηση του οχήματος και όταν οι απαιτήσεις επιτάχυνσης ή διατήρησης ταχύτητας από την πλευρά του χειριστή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Η διάρκειά της και η ακτίνα δράσης της εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών την δεδομένη στιγμή.

3.5.4 Ταυτόχρονη φόρτιση συσσωρευτών και προώθηση μέσω γεννήτριας από τον θερμικό κινητήρα

Σε περιπτώσεις χαμηλής απαιτούμενης ισχύος και ταυτόχρονης εξάντλησης του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών, ο θερμικός κινητήρας τροφοδοτεί ταυτόχρονα την ηλεκτροπαραγωγό γεννήτρια, η οποία ακολούθως τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα για να προωθηθεί το όχημα και επιπρόσθετα

φορτίζει τους συσσωρευτές. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας αφορά χαμηλά φορτία, λόγω του μεγέθους του έργου που καλείται να αναλάβει ο θερμικός κινητήρας.

3.5.5 Κατάσταση αναγεννητικής πέδησεως

Κατά την πέδηση του οχήματος, ένα κομμάτι της κινητικής ενέργειας η οποία είχε αποκτηθεί κατά την επίτευξη της δεδομένης ταχύτητας πριν την στιγμή της πέδησης, ανακτάται από τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση λειτουργεί ως γεννήτρια προκειμένου να φορτίσει τους συσσωρευτές.

3.5.6 Λειτουργία μηδενικής προώθησης

Σε αυτήν την λειτουργία, δεν απαιτείται από τον ηλεκτροκινητήρα η προώθηση του οχήματος, ενώ η λειτουργία του θερμικού κινητήρα χρησιμοποιείται αποκλειστικά από την ηλεκτροπαραγωγό γεννήτρια προκειμένου να φορτιστούν οι συσσωρευτές.

3.5.7 Από κοινού συμμετοχή των μονάδων προώθησης για την φόρτιση των συσσωρευτών

Σε αυτήν την περίπτωση ο θερμικός και ηλεκτρικός κινητήρας συμμετέχουν από κοινού στην φόρτιση των συσσωρευτών του οχήματος οχήματος, συνήθως κατά την διάρκεια της πέδησεως.

3.6 Καταστάσεις λειτουργίας σε ένα παράλληλο υβριδικό όχημα

3.6.1 Αμιγής θερμική προώθηση

Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, ο θερμικός κινητήρας είναι αποκλειστικά υπεύθυνος για την προώθηση του οχήματος. Αυτή η κατάσταση λαμβάνει χώρα συνήθως κατά την κίνηση με υψηλές ταχύτητες και αφού παράλληλα οι συσσωρευτές του οχήματος έχουν εξαντληθεί.

3.6.2 Υβριδική προώθηση

Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, χρησιμοποιούνται η ηλεκτρική μηχανή και η θερμική για την προώθηση του οχήματος. Αυτή η κατάσταση λαμβάνει χώρα όταν η απαιτούμενη ισχύς από τον χειριστή υπερβαίνει την διαθέσιμη ισχύ από τον θερμικό κινητήρα. Είναι εφικτή μόνο όταν το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών που τροφοδοτούν τον ηλεκτρικό κινητήρα είναι επαρκές.

3.6.3 Αμιγής ηλεκτρική προώθηση

Εδώ αποκλειστικά υπεύθυνος για την προώθηση του οχήματος είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας. Χρησιμοποιείται κατά κανόνα για την υπερνίκηση της αδράνειας κατά την αρχική εκκίνηση του οχήματος και όταν οι απαιτήσεις επιτάχυνσης ή διατήρησης ταχύτητας από την πλευρά του χειριστή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Η διάρκειά της και η ακτίνα δράσης της εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών την δεδομένη στιγμή.

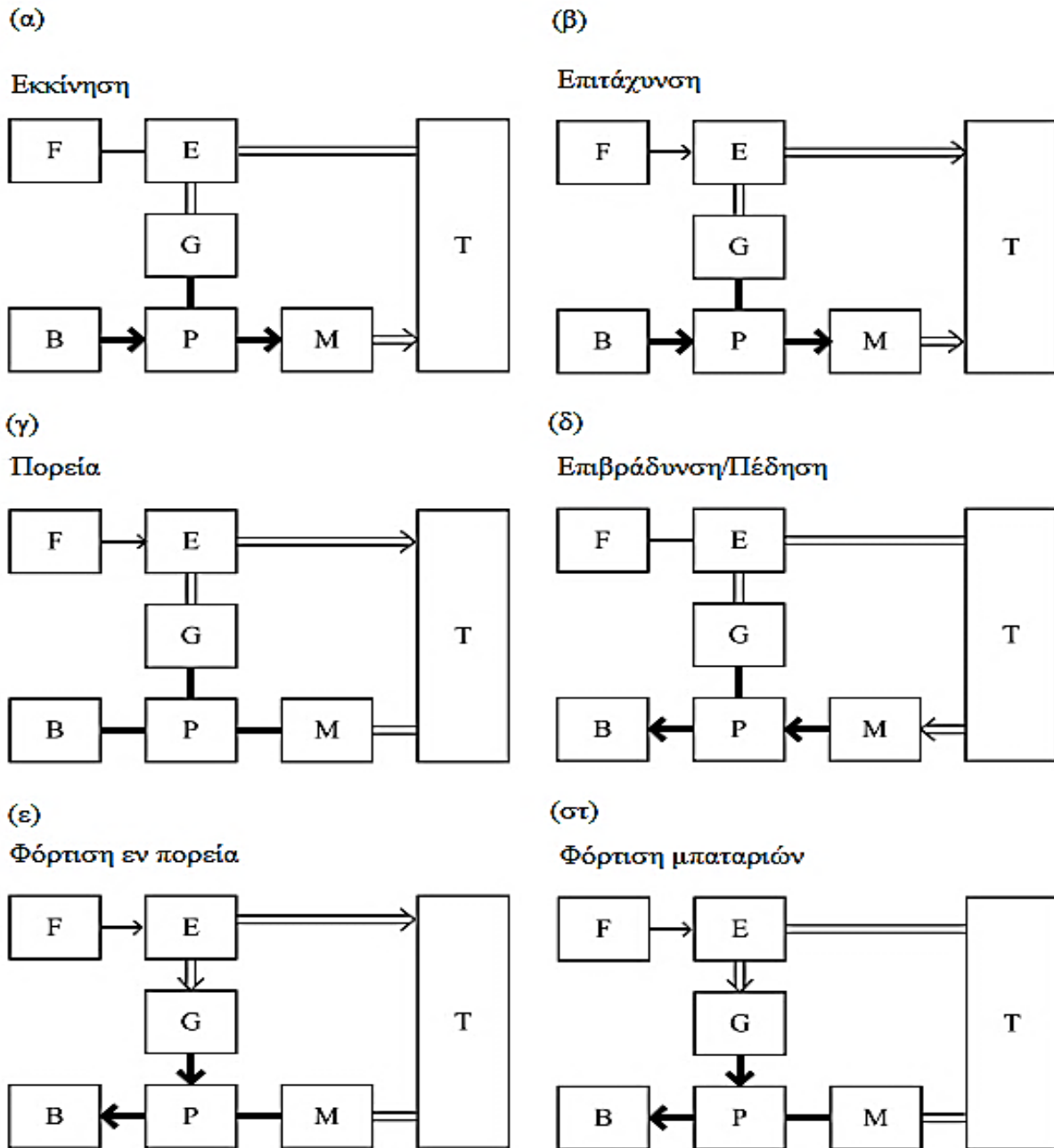
3.6.4 Κατάσταση αναγεννητικής πεδήσεως

Κατά την πέδηση του οχήματος, ένα κομμάτι της κινητικής ενέργειας η οποία είχε αποκτηθεί κατά την επίτευξη της δεδομένης ταχύτητας πριν την στιγμή της πέδησης, ανακτάται από τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση λειτουργεί ως γεννήτρια προκειμένου να φορτίσει τους συσσωρευτές.

3.7 Καταστάσεις λειτουργίας σε υβριδικό όχημα διαχωρισμού ισχύος

Ακολουθεί συγκεντρωτική, σχηματική αναπαράσταση, των δύο καταστάσεων λειτουργίας που συναντώνται σε υβριδικά οχήματα διαχωρισμού ισχύος.

3.7.1 Λειτουργία κυρίως βασιζόμενη στον θερμικό κινητήρα



B= Συσσωρευτής

E= Θερμικός κινητήρας

F= Δεξαμενή καυσίμου

G=Ηλεκτρογεννήτρια

M= Ηλεκτροκινητήρας

P=Μετατροπέας ισχύος

T=Μετάδοση (Περιλαμβάνει σύστημα πέδησης, συμπλέκτες και οδοντωτούς τροχούς)

Στην (α) περίπτωση μόνο ο ηλεκτρικός κινητήρας προωθεί το όχημα, ενώ ο θερμικός κινητήρας απεμπλέκεται. Αυτή η περίπτωση είναι συχνά χρησιμοποιούμενη εντός αστικού περιβάλλοντος που υπάρχουν συνεχείς ακινητοποιήσεις και εκκινήσεις.

Στην (β) περίπτωση ο θερμικός κινητήρας και ο ηλεκτρικός συμμετέχουν από κοινού στην προώθηση του οχήματος. Αυτή η περίπτωση λαμβάνει χώρα, όταν ο οδηγός το απαιτήσει λόγω συνθηκών, συνήθως σε μια προσπάθεια, η οποία πρέπει να γίνει άμεσα.

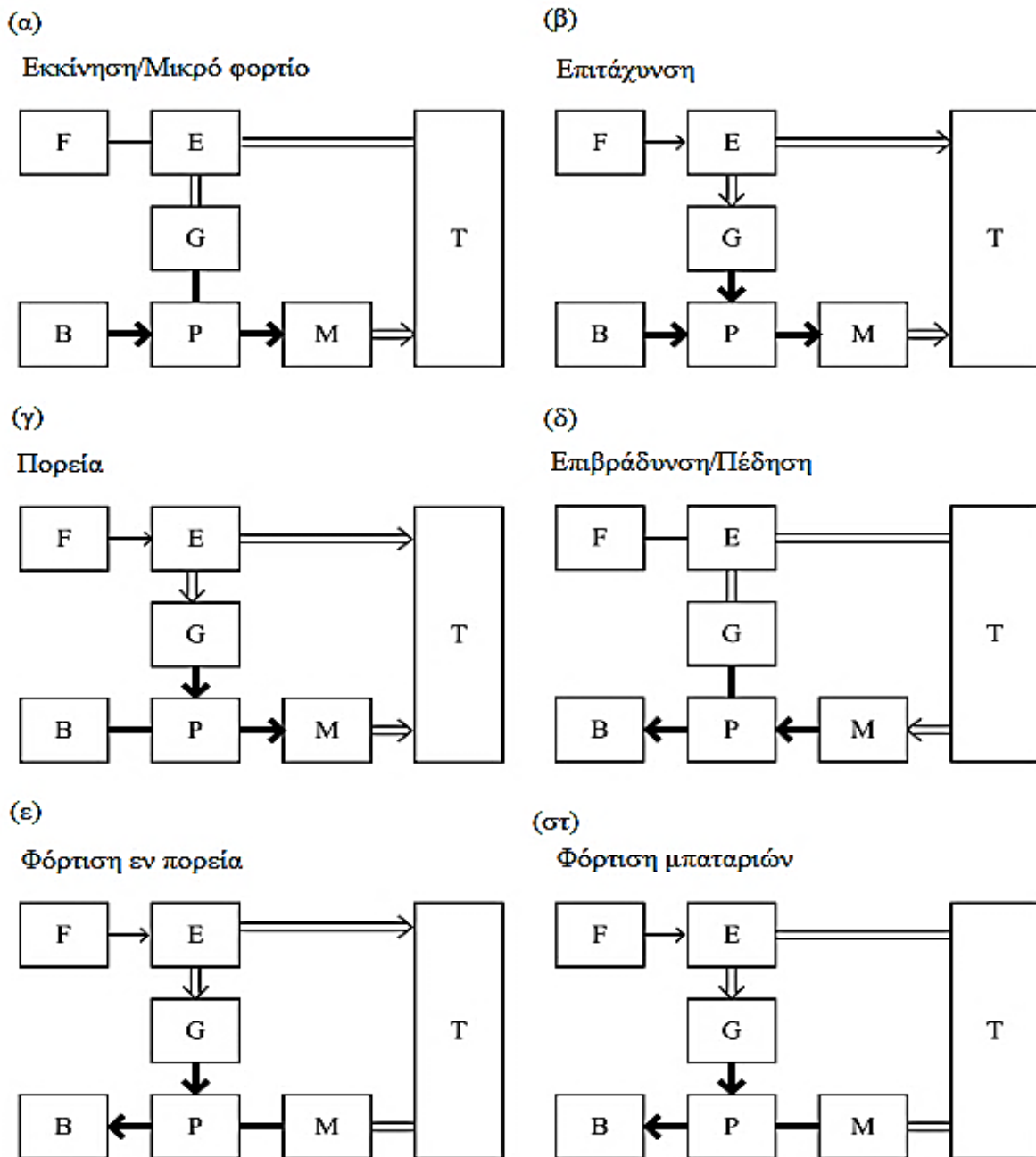
Στην (γ) περίπτωση μόνο ο θερμικός κινητήρας συμμετέχει στην προώθηση του οχήματος, ενώ ο ηλεκτρικός απεμπλέκεται. Αυτή η περίπτωση αφορά συνήθως κίνηση σε εθνικό δρόμο με συγκεκριμένη ταχύτητα ή/και όταν έχουν αδειάσει οι συσσωρευτές του οχήματος.

Στην (δ) περίπτωση έχουμε αναγεννητική πέδηση, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια κατά την επιβράδυνση του οχήματος, ανακτά ένα ποσοστό της κινητικής ενέργειας από την πέδηση και φορτίζει με αυτήν τους συσσωρευτές.

Στην (ε) περίπτωση ο θερμικός κινητήρας προωθεί το όχημα και ταυτόχρονα δίδει μέρος της κινητικής του ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγό γεννήτρια προκειμένου να φορτιστούν οι συσσωρευτές. Αυτή η περίπτωση αφορά περιπτώσεις με κίνηση σε χαμηλή ταχύτητα και φορτίο.

Στην (στ) δεν υφίσταται παραλαβή ισχύος από τους τροχούς, το όχημα είναι εν στάσει και ο θερμικός κινητήρας μέσω της ηλεκτροπαραγωγού γεννήτριας φορτίζει τους συσσωρευτές.

3.7.2 Λειτουργία κυρίως βασιζόμενη στον ηλεκτρικό κινητήρα



B= Συσσωρευτής

E= Θερμικός κινητήρας

F= Δεξαμενή καυσίμου

G=Ηλεκτρογεννήτρια

M= Ηλεκτροκινητήρας

P=Μετατροπέας ισχύος

T=Μετάδοση (Περιλαμβάνει σύστημα πέδησης, συμπλέκτες και οδοντωτούς τροχούς)

Στην (α) περίπτωση ο ηλεκτρικός κινητήρας προωθεί αποκλειστικά το όχημα με ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνει από τους συσσωρευτές.

Στην (β) περίπτωση από κοινού ο θερμικός και ο ηλεκτρικός κινητήρας συμμετέχουν στην πρόωση του οχήματος. Επιπρόσθετα ο θερμικός κινητήρας παρέχει κινητική ενέργεια στην γεννήτρια.

Στην (γ) περίπτωση και οι δυο κινητήριες μονάδες προωθούν το όχημα, ωστόσο η ηλεκτρική ισχύς παρέχεται μόνο από την ηλεκτροπαραγωγό γεννήτρια η οποία τροφοδοτείται από τον θερμικό κινητήρα

Στην (δ) περίπτωση έχουμε αναγεννητική πέδηση, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια κατά την επιβράδυνση του οχήματος, ανακτά ένα ποσοστό της κινητικής ενέργειας από την πέδηση και φορτίζει με αυτήν τους συσσωρευτές.

Στην (ε) περίπτωση ο θερμικός κινητήρας προωθεί το όχημα και ταυτόχρονα δίδει μέρος της κινητικής του ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγό γεννήτρια προκειμένου να φορτιστούν οι συσσωρευτές.

Στην (στ) δεν υφίσταται παραλαβή ισχύος από τους τροχούς, το όχημα είναι εν στάσει και ο θερμικός κινητήρας μέσω της ηλεκτροπαραγωγού γεννήτριας φορτίζει τους συσσωρευτές.

3.8 Διαχωρισμός υβριδικών οχημάτων με βάση τον βαθμό υβριδικής προώθησεως

Όλα τα υβριδικά οχήματα, ανεξάρτητα από την διάταξη των μονάδων προώθησης, χαρακτηρίζονται από έναν βαθμό υβριδοποίησης ο οποίος δείχνει το ποσοστό ηλεκτρικής προώθησης στο όχημα. Όταν ο βαθμός υβριδοποίησης είναι μηδενικός, $BY=0$, τότε υπονοείται ότι το όχημα είναι αμιγώς θερμικό. Για βαθμό υβριδοποίησης, $BY=1$, τότε υπονοείται ότι το όχημα είναι αμιγώς ηλεκτρικό και δεν υφίσταται θερμικός κινητήρας. Όσο πιο κοντά ο βαθμός υβριδοποίησης είναι στο 1, τόσο πιο μικρός κινητήρας θερμικός απαιτείται να υπάρχει στο όχημα, ο οποίος επιπρόσθετα λειτουργεί κοντά στο σημείο της μέγιστης αποδοτικότητάς του, προκειμένου να μειωθεί η κατανάλωση και οι εκπεμπόμενοι ρύποι.

$$BY = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{\theta\kappa}}$$

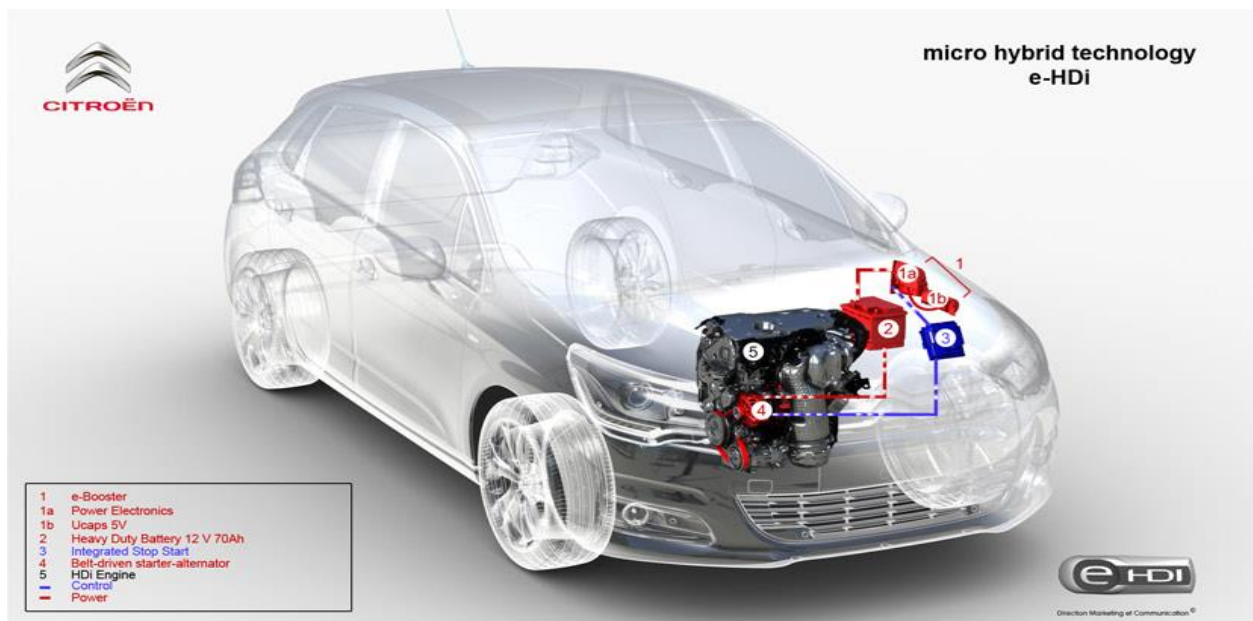
$$P_{\eta\lambda} = \text{Ισχύς ηλεκτρικού κινητήρα}$$

$$P_{\theta\kappa} = \text{Ισχύς θερμικού κινητήρα}$$

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των ανωτέρω αναφερθέντων, το Bmw i3 στην έκδοση range extender, το οποίο εφοδιάζεται πέραν του ηλεκτροκινητήρα, με θερμικό κινητήρα βενζίνης, φυσικής αναπνοής, χωρητικότητας 0.65lt, δύο θαλάμων καύσεως ισχύος 25.4 kW, που είναι ο μικρότερος κινητήρας βενζίνης που τοποθετείται σε όχημα παραγωγής παγκοσμίως. Αυτός σε συνδυασμό με τον σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη που αποδίδει 125 kW, που διαθέτει το όχημα δίνει βαθμό υβριδοποίησης $\approx 0,83$ που είναι μέχρι στιγμής ο υψηλότερος για όχημα που διαθέτει και θερμική μηχανή. Εν γένει όσο πιο υψηλός είναι ο βαθμός υβριδοποίησης σε ένα όχημα τόσο πιο καθοριστική γίνεται η σημασία της αναγεννητικής πεδήσεως λόγω του ότι, η προώθηση του οχήματος, όσο πιο πολύ ο βαθμός υβριδοποίησης αυξάνει, τόσο πιο πολύ βασίζεται το όχημα στους συσσωρευτές του και στον ηλεκτρικό κινητήρα, συνεπώς η ανάκτηση ενέργειας μέσω της αναγεννητικής πεδήσεως έχει άμεση και σημαντική επίδραση στην αυτονομία του οχήματος. Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ωστόσο, πως ο βαθμός υβριδοποίησης, είναι ένα λογιστικό μέγεθος, το οποίο λαμβάνει υπόψιν τις προδιαγραφές των μονάδων προώθησης. Στην πράξη ωστόσο, ο βαθμός υβριδοποίησης σε δεδομένο όχημα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες. Για παράδειγμα όταν ένα υβριδικό όχημα κινείται αποκλειστικά από τον θερμικό κινητήρα, ο βαθμός υβριδοποίησης είναι 0, όταν είναι σε κατάσταση αμιγούς ηλεκτροκίνησης είναι 1 και όταν αμφότεροι οι κινητήρες προωθούν το όχημα, ανάλογα με την συμμετοχή της κάθε μονάδας προώθησης στην παραγόμενη ισχύ την δεδομένη στιγμή, είναι $0 < BY < 1$.

3.8.1 Μικροϋβριδικά οχήματα

Τα μικροϋβριδικά οχήματα έχουν τον μικρότερο βαθμό υβριδοποίησης και συνήθως αποτελούνται από έναν μικρό ηλεκτροκινητήρα/γεννήτρια ο οποίος τροφοδοτείται από την αναγεννητική πέδηση του οχήματος. Σε καταστάσεις πέδησης και πλήρους ακινησίας, ο θερμικός κινητήρας σβήνει και εκκινεί ξανά με την βοήθεια του μικρού ηλεκτρικού κινητήρα πριν εισαχθεί καύσιμο στον θάλαμο καύσεως. Σε συνθήκες επιταχύνσεως, προσφέρει από μικρή ως καθόλου υποβοήθηση στον θερμικό κινητήρα, ανάλογα με τις προδιαγραφές του συστήματος, προκειμένου να επιταχύνει αμεσότερα το όχημα. Ο βαθμός υβριδοποίησης τους είναι πολύ χαμηλός και ως εκ τούτου τα μικροϋβριδικά οχήματα, είναι πολύ κοντά σε χαρακτηριστικά με αμιγώς θερμικά οχήματα. Τα μικροϋβριδικά οχήματα, ωστόσο γνωρίζουν ευρεία διάχυση, γιατί δεν υπάρχει μεγάλη μηχανική πολυπλοκότητα στην υλοποίησή τους και γιατί καταφέρνουν να μειώσουν την κατανάλωση του οχήματος και τους εκπεμπόμενους ρύπους.



Εικόνα 3.4 Απεικόνιση του μικροϋβριδικού οχήματος Citroen C4 e-Hdi σε τομή

3.8.2 Ήπια υβριδικά οχήματα

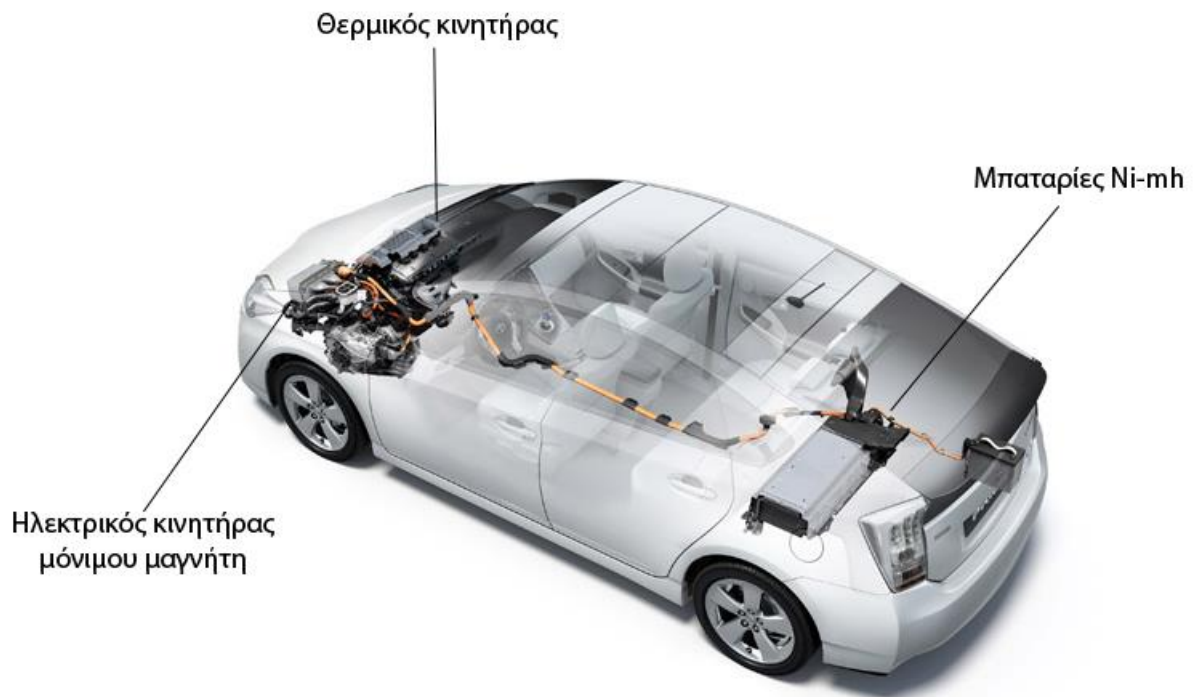
Τα ήπια υβριδικά οχήματα έχουν παρόμοια τεχνοτροπία με τα μικροϋβριδικά, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση ο ηλεκτρικός κινητήρας που διαθέτουν μπορεί να αποδίδει πάνω από 20 kW ισχύος. Οι συσσωρευτές ενέργειας αυτών των οχημάτων έχουν ενεργειακή πυκνότητα με άνω οριακή τιμή την 1kWh. Αυτού του τύπου τα οχήματα έχουν πολύ περιορισμένη αμιγώς ηλεκτρική αυτονομία, ενώ οι συσσωρευτές τους επαναφορτίζονται αποκλειστικά μέσω αναγεννητικής πεδήσεως. Επίσης λόγω μεγαλύτερης ισχύος και παραγόμενης στρεπτικής ροπής, οι ηλεκτροκινητήρες που διαθέτουν, μπορούν να βοηθήσουν με πιο αποφασιστικό τρόπο την επιτάχυνση του οχήματος. Το θετικό αυτού του τύπου υβριδικών οχημάτων, είναι ότι προσφέρουν τα οφέλη ενός υβριδικού οχήματος, όπως χαμηλή κατανάλωση καυσίμου και χαμηλές εκπομπές ρύπων χωρίς τα ελαττώματα των επόμενων κατηγοριών υβριδικών οχημάτων, που είναι οι βαριές μπαταρίες, οι οποίες επηρεάζουν την δυναμική συμπεριφορά του οχήματος.



Εικόνα 3.5 Απεικόνιση του ήπιου υβριδικού οχήματος Honda Insight με λογιστικό βαθμό υβριδοποίησης ≈ 0.12

3.8.3 Πλήρη υβριδικά οχήματα

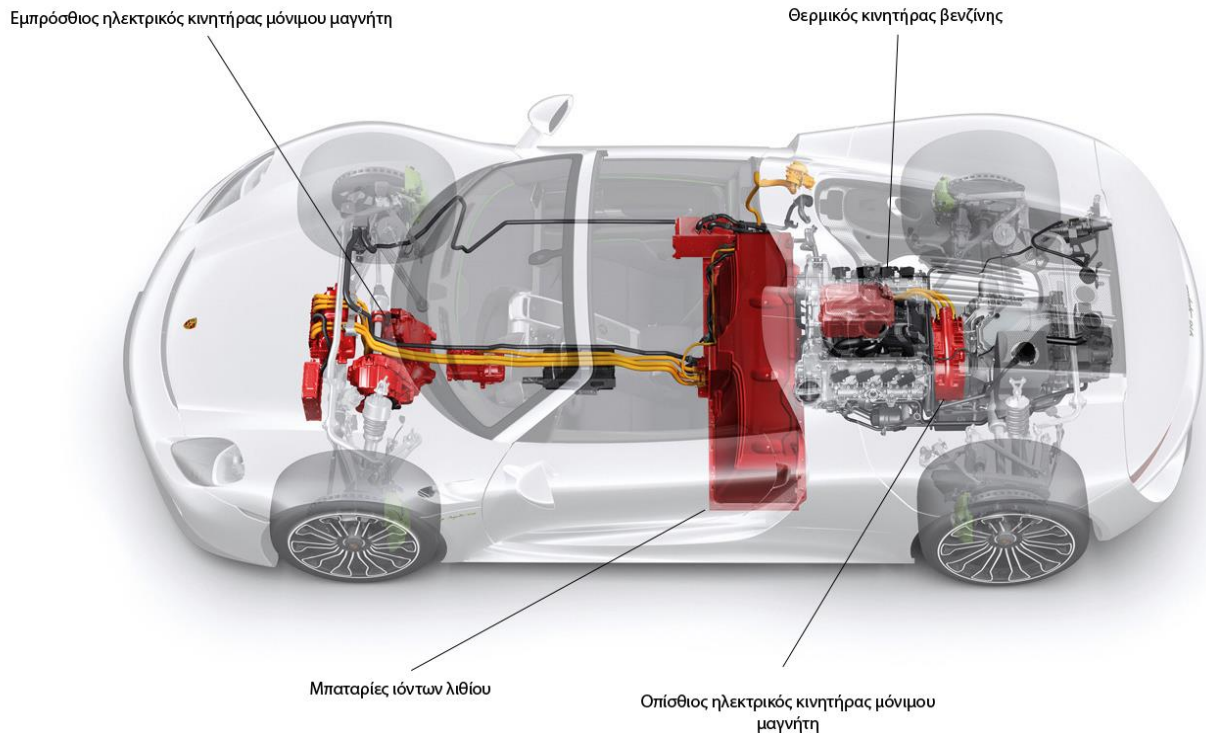
Από αυτήν την κατηγορία, αντικαθίσταται ο μικρός ηλεκτροκινητήρας/γεννήτρια που διαθέτουν τα μικροϋβριδικά και ηπίως υβριδικά οχήματα, με έναν ξεχωριστό ηλεκτρικό κινητήρα, συνήθως ισχύος άνω των 50 kW, ο οποίος έχει επαρκή αποθέματα στρεπτικής ροπής και ισχύος ώστε να προωθήσει το όχημα χωρίς την συνδρομή του θερμικού. Η αμιγής ηλεκτρική αυτονομία εδώ είναι αυξημένη λόγω κατάλληλα επιλεγθέντων συσσωρευτών (συνήθως μπαταριών), ενώ ο θερμικός κινητήρας έχει μικρότερη χωρητικότητα λόγω του ότι ο βαθμός υβριδοποίησης αυξάνεται. Και σε αυτήν την κατηγορία, η φόρτιση των συσσωρευτών λαμβάνει χώρα μέσω αναγεννητικής πεδήσεως. Σε ότι αφορά την κατανάλωση και τις εκπομπές ρύπων, η συγκεκριμένη κατηγορία, είναι ιδιαίτερα αποδοτική, όμως εμφανίζονται τα αναπόφευκτα μειονεκτήματα, της χωροταξίας και του βάρους των μπαταριών.



Εικόνα 3.6 Τομή του πλήρους υβριδικού Toyota Prius με λογιστικό βαθμό υβριδοποίησης ≈ 0.45

3.8.4 Υβριδικά με δυνατότητα φόρτισης από πρίζα (Plug-in)

Τα οχήματα αυτά διαθέτουν παρόμοιας ισχύος ηλεκτρικούς κινητήρες με τα πλήρη υβριδικά, ωστόσο εδώ η ενεργειακή πυκνότητα των συσσωρευτών είναι αρκετά υψηλή (συνήθως πάνω από 5 kWh), ώστε η αναγεννητική πέδηση από μόνη της, να μην επαρκεί ώστε να τους επαναφορτίσει, συνεπώς απαιτείται φόρτιση και από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτήν την κατηγορία, η αμιγής ηλεκτρική αυτονομία του οχήματος, είναι η υψηλότερη από όλες τις υπόλοιπες και είναι εφικτό κάποιος χειριστής-οδηγός που κινείται σε αστικό περιβάλλον, να διεκπεραιώνει τις καθημερινές μετακινήσεις του χωρίς την συνδρομή του θερμικού κινητήρα.



Εικόνα 3.7 Τομή του υβριδικού με δυνατότητα φόρτισης από πρίζα, Porsche 918 Spyder με λογιστικό βαθμό υβριδοποίησης ≈ 0.32

3.9 Η αναγεννητική πέδηση σε αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα

Τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, έχουν κάποιες σημαντικές διαφορές σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους οχημάτων που εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση. Σε αυτήν την κατηγορία οχημάτων, αυτή είναι κεφαλαιώδους σημασίας διότι η τρέχουσα τεχνολογία των συσσωρευτών δεν επιτρέπει αυτονομίες επιπέδου θερμικών οχημάτων, συνεπώς είναι κρίσιμη η όσο το δυνατόν αποδοτικότερη ανάκτηση ενέργειας μέσω της πεδήσεως. Γενικά τα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν κινητήρες με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλή ανάπτυξη στρεπτικής ροπής, χαρακτηριστικά εγγενή των ηλεκτρικών μηχανών, ενώ ο συνδυασμός ιδιαίτερα υψηλής ανάπτυξης R_{pm} , ταυτόχρονα με υψηλή ανάπτυξη στρεπτικής ροπής, επιτρέπουν στους κατασκευαστές τέτοιων οχημάτων να μην χρησιμοποιούν πολύπλοκα συστήματα μεταδόσεως, αλλά αντιθέτως απλούς μειωτήρες με δυο σχέσεις μετάδοσης, μία για εμπρόσθια και μια για οπίσθια κίνηση. Στο ακόλουθο σχήμα (2.5) παρουσιάζεται σχηματικά μια τυπική μορφή ενός σύγχρονου αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης αποτελείται από τρία βασικά υποσυστήματα: Το ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, την πηγή ενέργειας και τα βοηθητικά υποσυστήματα. Το υποσύστημα της ηλεκτρικής πρόωσης, αποτελείται από τον ελεγκτή του οχήματος, τον μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, τον ηλεκτρικό κινητήρα, την μηχανική μετάδοση και τους παραλαμβάνοντες την ισχύ τροχούς. Το υποσύστημα στην πηγή ενέργειας

περιλαμβάνει την πηγή ενέργειας, την μονάδα διαχείρισης ενέργειας και την μονάδα ανεφοδιασμού. Το βοηθητικό σύστημα αποτελείται από την μονάδα του ηλεκτρομηχανικά υποβοηθούμενου τιμονιού, την μονάδα ελέγχου του κλιματισμού, και την εφεδρική μονάδα παροχής ενέργειας. Με βάση τις εισόδους από τα πεντάλ γκαζιού και φρένου, ο ελεγκτής του οχήματος παρέχει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στον μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος λειτουργεί για να ρυθμίζει τη ροή ισχύος μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και της πηγής ενέργειας. Η ροή ισχύος προς τα πίσω οφείλεται στην αναγεννητική πέδηση του ηλεκτροκίνητου οχήματος, κατά την διάρκεια της οποίας η ανακτηθείσα ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στους συσσωρευτές. Οι περισσότερες μπαταρίες ηλεκτροκίνητων οχημάτων, καθώς και οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές, έχουν εύκολα την δυνατότητα να αποδέχονται για αποθήκευση την ανακτηθείσα ενέργεια. Η μονάδα διαχείρισης της ενέργειας συνεργάζεται με τον ελεγκτή του οχήματος για τον έλεγχο της αναγεννητικής πέδησης και της ανάκτησης ενέργειας. Συνεργάζεται επίσης με την μονάδα ανεφοδιασμού ενέργειας για τον έλεγχο της μονάδας ανεφοδιασμού και για να παρακολουθεί την χρησιμοποίηση της πηγής ενέργειας. Η βοηθητική παροχή ισχύος παρέχει την απαραίτητη ισχύ σε διαφορετικά επίπεδα τάσης για όλα τα βοηθητικά συστήματα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, ειδικά για τον έλεγχο του κλιματισμού και το ηλεκτρομηχανικά υποβοηθούμενο τιμόνι. Στο σχήμα 3.5 απεικονίζεται η τοπολογία ενός τυπικού αμιγώς ηλεκτροκίνητου οχήματος.



Σχήμα 3.5 Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού αμιγώς ηλεκτροκίνητου οχήματος

3.10 Διαχωρισμός αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων με βάση τον τύπο του κινητήρα

3.10.1 Ηλεκτρικά οχήματα με σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

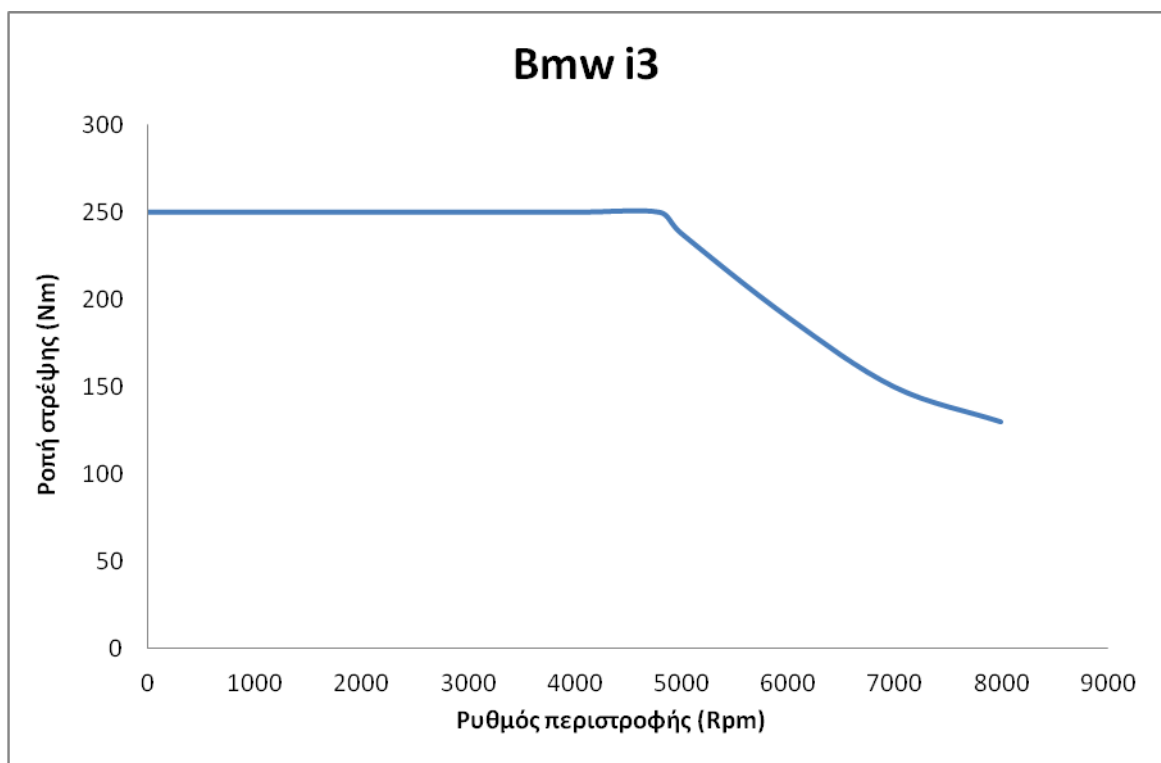
Πρόκειται για τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο τύπο κινητήρα σε εφαρμογές αμιγώς ηλεκτροκίνητων οχημάτων αλλά και υβριδικών. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι για τον υψηλό του βαθμό απόδοσης που φτάνει ως περίπου το 95%, την υψηλή του αποδιδόμενη ισχύ ανά κιλό μάζας κινητήρα αλλά και γιατί ευνοεί ιδιαίτερα την ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πεδήσεως. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι γιατί στους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, το μαγνητικό πεδίο είναι μόνιμο και την ίδια στιγμή που ο οδηγός αφήσει το πεντάλ τρου γκαζιού εμφανίζεται αυτόματα μια αντιηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία τείνει να πεδήσει το όχημα πριν ακόμα ο οδηγός πατήσει το πεντάλ του φρένου.



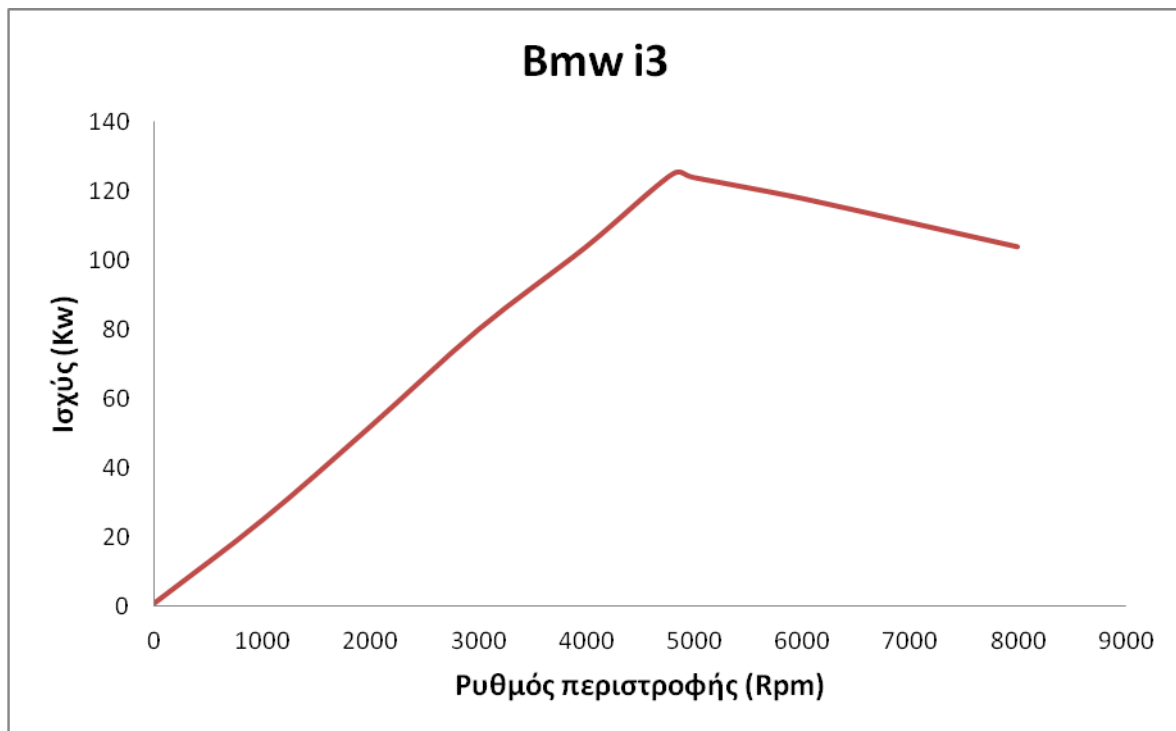
Εικόνα 3.4. Τομή του αμιγώς ηλεκτροκίνητου Bmw i3

Συνεπώς σε ηλεκτροκίνητα οχήματα με κινητήρα μόνιμου μαγνήτη υπάρχει ένα είδος αυθόρμητης πεδήσεως με το που αφήσει ο οδηγός το πεντάλ του γκαζιού και αυτό είναι κάτι που ευνοεί ιδιαίτερα

την ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης. Επιπρόσθετα ο οδηγός στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτροκίνητων οχημάτων μόνιμου μαγνήτη έχει την δυνατότητα να επιλέξει το πόσο έντονη ή όχι θα είναι η αναγεννητική πέδηση, με την πιο ακραία τιμή εφαρμοζόμενη σε αστικά περιβάλλοντα, να είναι δυνατή ακόμα και η μη χρησιμοποίηση του πεντάλ του φρένου για την πέδηση ειδικά όταν η κίνηση είναι με ιδιαίτερα χαμηλές ταχύτητες. Το βασικό μειονέκτημα των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι το γεγονός ότι ο μόνιμος μαγνήτης αποτελείται από σπάνιες γαίες, οι οποίες παράγονται κατά συντριπτικό ποσοστό από την Κίνα, συνεπώς υπάρχει μια δομή μονοπωλιακή ουσιαστικά για αυτές, κάτι που ενδεχομένως θα αποτελούσε τροχοπέδη σε περίπτωση ευρύτερης διάχυσης των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Στο διάγραμμα 3.1 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ ρυθμού περιστροφής και ανάπτυξης στρεπτικής ροπής σε αμιγώς ηλεκτρικό όχημα με κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, ενώ στο διάγραμμα 3.2 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ ρυθμού περιστροφής και ανάπτυξης ισχύος.



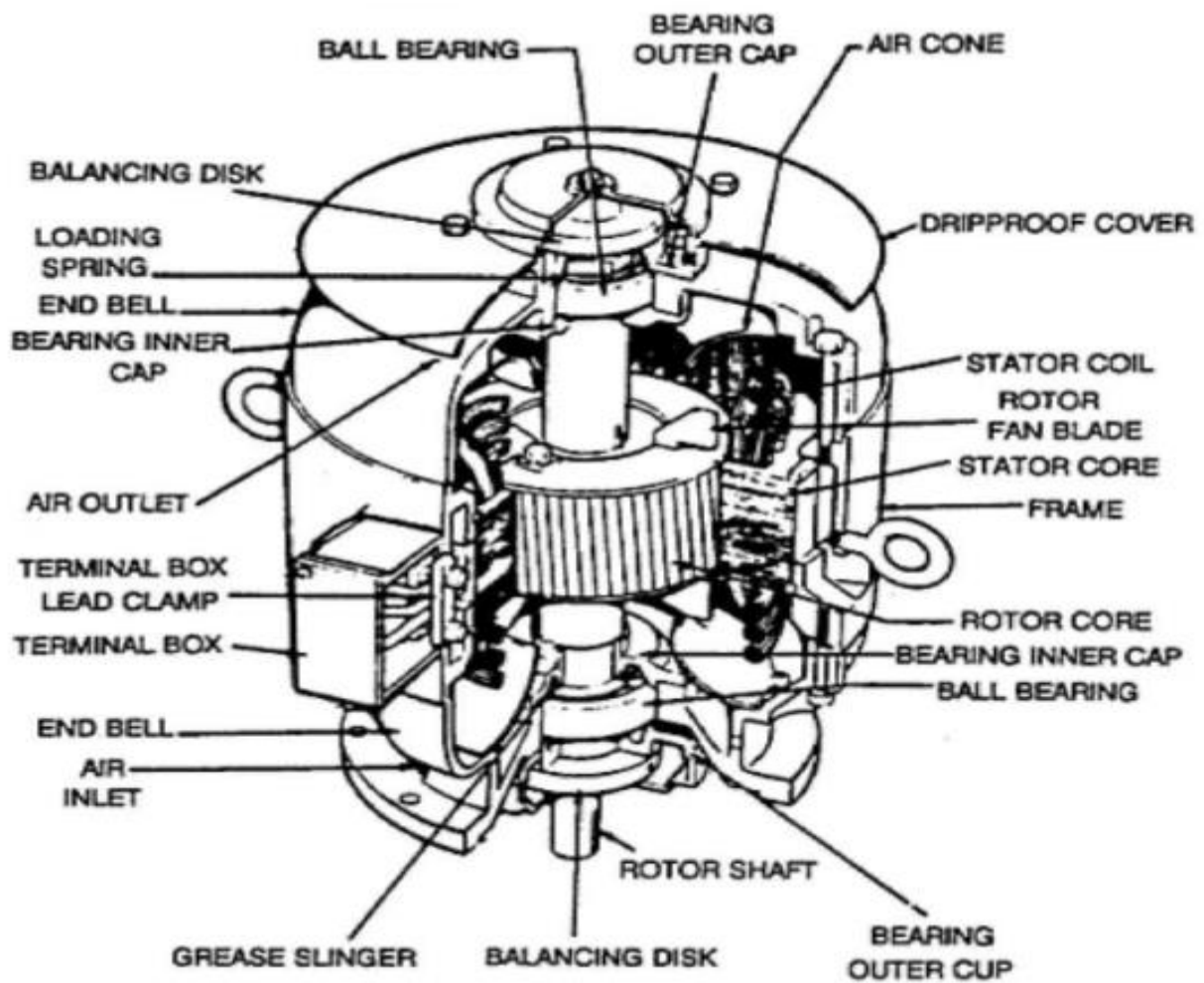
Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα στρεπτικής ροπής-ρυθμού περιστροφής του Bmw i3



Διάγραμμα 3.2 Διάγραμμα ισχύος-ρυθμού περιστροφής του Bmw i3

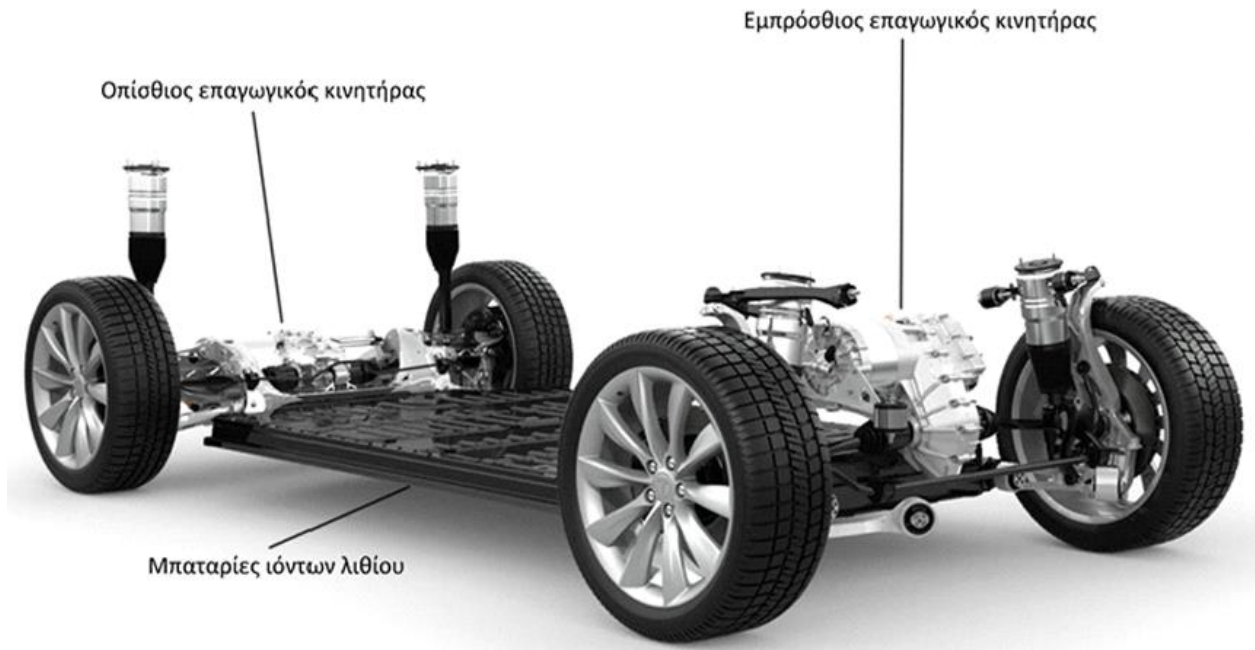
3.10.2 Ηλεκτροκίνητα οχήματα με επαγωγικούς κινητήρες

Πρόκειται για τον δεύτερο τύπο κινητήρα που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά οχήματα σήμερα, με μικρότερη όμως δημοφιλία σε σχέση με τον κινητήρα μόνιμου μαγνήτη που προαναφέρθηκε. Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα δεν ευνοεί την αυθόρμητη αναγεννητική πέδηση, διότι εδώ δεν υπάρχει μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο επί της ουσίας υφίσταται όσο ο οδηγός πατάει το πεντάλ του γκαζιού και χάνεται όταν σηκώσει το πόδι από το γκάζι συνεπώς εδώ δεν υπάρχει η έννοια της αυθόρμητης αναγεννητικής πεδήσεως. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου κινητήρα είναι ότι δεν απαιτεί τις σπάνιες γαίες που απαιτεί ο κινητήρας μόνιμου μαγνήτη και έτσι η κατασκευή του είναι απλούστερη και κατά περιπτώσεις λιγότερο κοστοβόρα. Σε ότι αφορά την αρχή λειτουργίας του, αυτή εκκινεί από το φαινόμενο της ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων με επαγωγή στους αγωγούς του δρομέα. Ο στάτης της μηχανής τροφοδοτείται από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων το οποίο δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής. Το πεδίο αυτό περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της μηχανής, με την σύγχρονη ταχύτητα, η οποία καθορίζεται από την συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και των αριθμό των πόλων του στάτη.

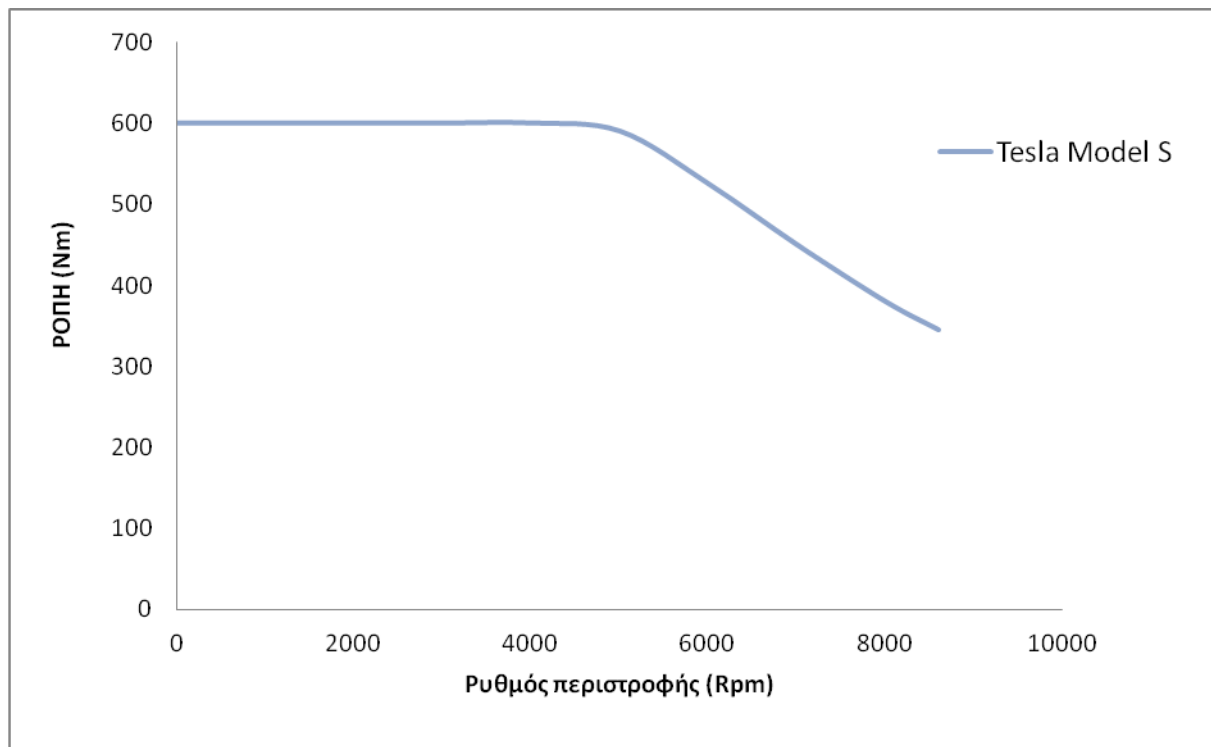


Σχήμα 3.6 Σχηματική απεικόνιση επαγωγικού κινητήρα σε τομή

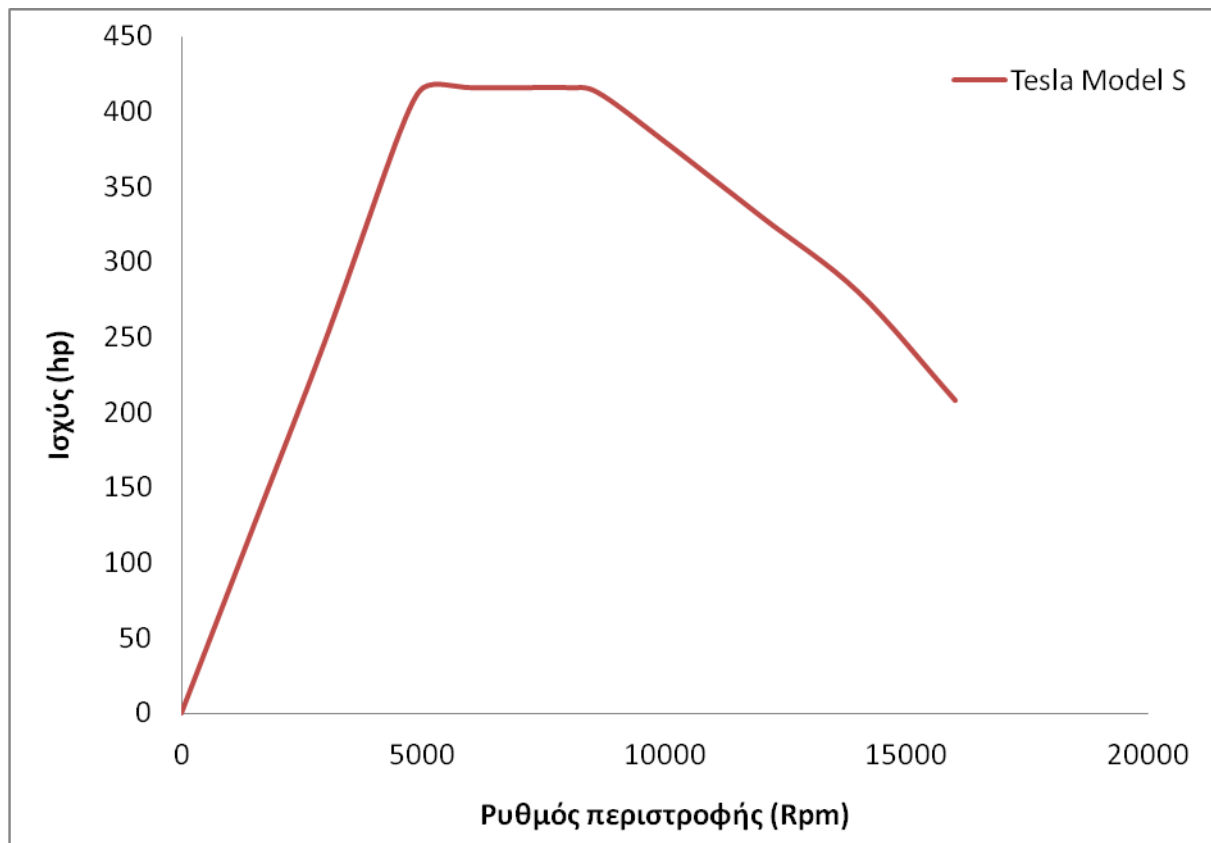
Στους αγωγούς του δρομέα επάγονται λοιπόν ρεύματα, τα οποία με την σειρά τους δημιουργούν ένα διαφορετικό μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο μαγνητικών πεδίων παράγει μια στρεπτική ροπή η οποία περιστρέφει τον δρομέα και συνεπώς τον άξονα της μηχανής. Η διαφορά της σύγχρονης ταχύτητας από την πραγματική ταχύτητα του δρομέα οφείλεται στο φορτίο που είναι συνδεδεμένο στον άξονα. Στην εικόνα 3.5 εκτίθεται τομή οχήματος με 2 επαγωγικούς κινητήρες, έναν σε κάθε άξονα και στα διαγράμματα 3.3, 3.4 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ ρυθμού περιστροφής και ανάπτυξης στρεπτικής ροπής και η σχέση μεταξύ ρυθμού περιστροφής και ανάπτυξης ισχύος σε ηλεκτρικά προωθούμενο όχημα με επαγωγικό κινητήρα.



Εικόνα 3.5 Τομή του Tesla Model X



Διάγραμμα 3.3 Διάγραμμα στρεπτικής ροπής-ρυθμού περιστροφής του Tesla Model S



Διάγραμμα 3.4 Διάγραμμα ισχύος-ρυθμού περιστροφής του Tesla Model S

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Μέθοδοι αποθήκευσης της ανακτηθείσας ενέργειας

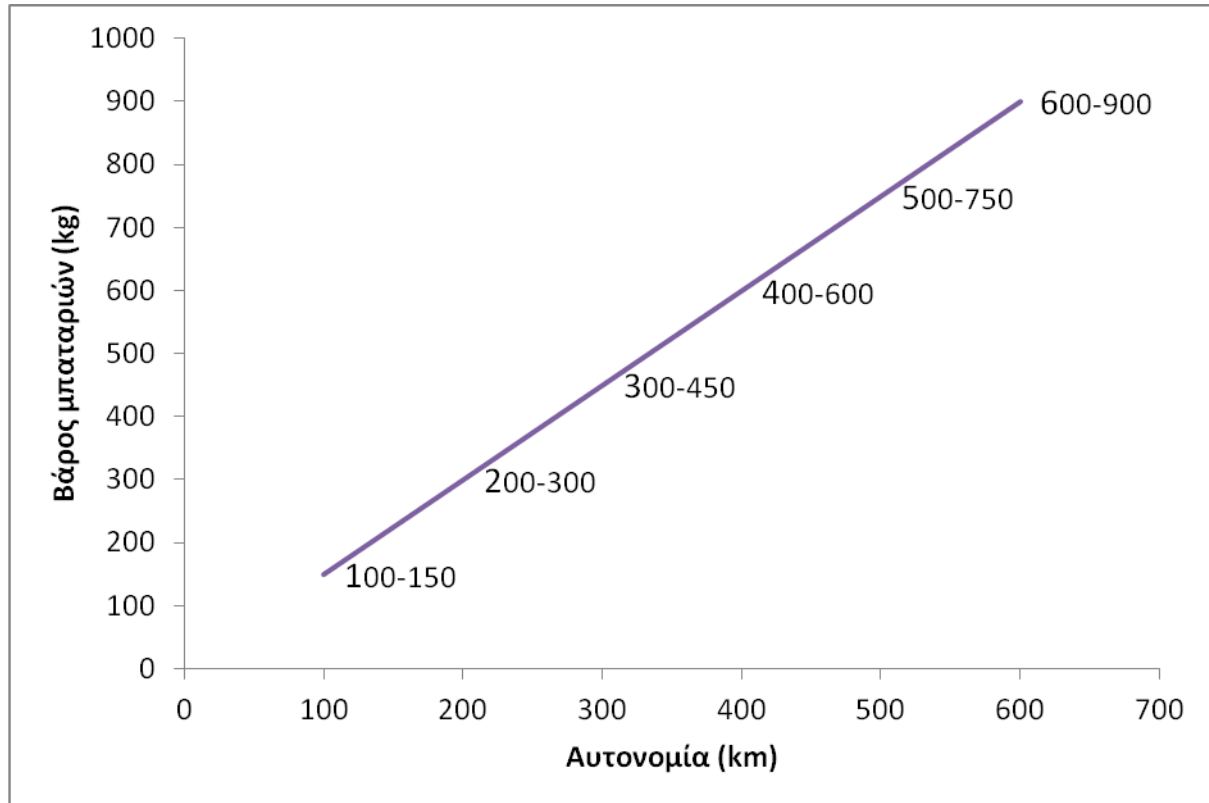
4.1 Γενικά

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αποθήκευση της ανακτηθείσας ενέργειας από την αναγεννητική πέδηση. Οι καθοριστικοί παράγοντες για την επιλογή μιας συγκεκριμένης μέθοδου, είναι το αν το όχημα διαθέτει ή όχι θερμικό κινητήρα και η επιθυμητή ηλεκτρική αυτονομία στην περίπτωση υβριδικού οχήματος. Σε όσα αμιγώς θερμικά οχήματα υφίσταται σύστημα αναγεννητικής πέδησης, η προτιμώτερη επιλογή από τους σχεδιαστές, είναι η ανάκτηση της ενέργειας να λαμβάνει χώρα μέσω υπερπυκνωτών. Σε οχήματα υψηλών επιδόσεων, με κατά κανόνα χρήση στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, χρησιμοποιούνται σφόνδυλοι. Σε υβριδικά και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα ωστόσο, χρησιμοποιούνται μπαταρίες. Στα υβριδικά περιορισμένης αμιγούς ηλεκτρικής αυτονομίας χρησιμοποιούνται μπαταρίες νικελίου-μετάλλου υδριδίου ενώ σε υβριδικά με δυνατότητα φόρτισης από πρίζα και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η αποκλειστική επιλογή. Επίσης εσχάτως δοκιμάζεται και μια καινούργια μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση πνευματικών συσσωρευτών. Οι ανωτέρω αναφερθείσες μέθοδοι αναλύονται στο παρόν κεφάλαιο.

4.2 Μπαταρίες

Οι μπαταρίες σαν μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας, έχουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, εντούτοις υστερούν σε πυκνότητα ισχύος. Η ενεργειακή πυκνότητα μετράται σε Wh και υποδηλώνει την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στην συστοιχία των μπαταριών. Επίσης ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η ειδική ενεργειακή πυκνότητα που δείχνει την ενέργεια ανά μονάδα μάζας των μπαταριών και μετράται σε Wh/kg. Η πυκνότητα ισχύος μετράται σε W και δείχνει την δυνατότητα τροφοδοσίας ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα του οχήματος, ενώ αντιστοίχως υπάρχει και η ειδική πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα μάζας των μπαταριών σε W/kg. Εν γένει οι μπαταρίες βρίσκουν καθολική εφαρμογή σε αμιγώς ηλεκτρικά προωθούμενα οχήματα όπου εκεί ο επικρατών τύπος είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου και σε υβριδικά, όπου χρησιμοποιούνται και οι μπαταρίες νικελίου μετάλλου υδριδίου. Γενικά για τις μπαταρίες υπάρχει η επιδίωξη να λειτουργούν υπό υψηλή διαφορά δυναμικού κάτι που συνεπάγεται ότι για δεδομένη παραγωγή ισχύος, μειώνεται το ρεύμα που διαρρέει τα καλώδια, κάτι που με την σειρά του οδηγεί σε χρήση λεπτότερων καλωδίων και έτσι μειώνονται και οι απώλειες. Αν και οι μπαταρίες εν γένει, είναι ο πιο δημοφιλής τρόπος τροφοδότησης των αμιγώς ηλεκτροκίνητων και των υβριδικών οχημάτων, εντούτοις η χαμηλή ειδική τους ενεργειακή πυκνότητα η οποία είναι περίπου με τις τρέχουσες τεχνολογίες των μπαταριών, 77

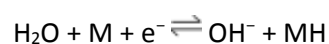
φορές χαμηλότερη της βενζίνης, συνεπάγεται πολύ μεγάλο βάρος για το όχημα προκειμένου να διαθέτει μια ρεαλιστική αυτονομία στην περίπτωση που είναι αμιγώς ηλεκτρικό. Ακολουθεί διάγραμμα συσχέτισης βάρους μπαταριών ιόντων λιθίου με την αυτονομία σε ένα αμιγώς ηλεκτρικό όχημα.



Διάγραμμα 4.1 Συσχέτιση αυτονομίας και βάρους μπαταριών σε αμιγώς ηλεκτρικό όχημα

4.2.1 Μπαταρίες Ni-MH (Νικελίου μετάλλου υδριδίου)

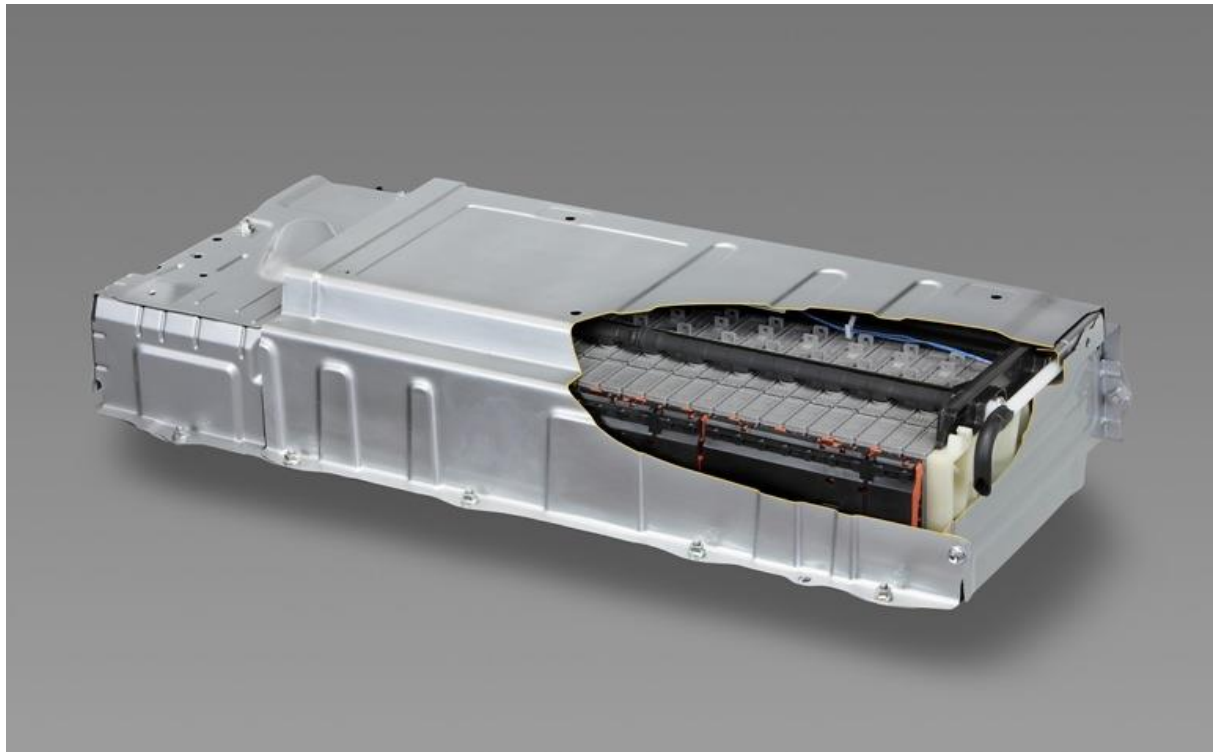
Οι μπαταρίες νικελίου-μετάλλου υδριδίου έχουν πολύ καλές ηλεκτροχημικές ιδιότητες εγγενώς. Αυτού του τύπου οι μπαταρίες χρησιμοποιούν συνδυασμό θετικών ηλεκτροδίων που αποτελούνται από οξυδροξείδιο του νικελίου (NiOOH) και αρνητικών ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούν ένα κράμμα που απορροφά υδρογόνο, καθιστώντας την επί της ουσίας από χημικής πλευράς μπαταρία νικελίου-υδρογόνου. Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι η εξής:



Η χημική αντίδραση της φόρτισης διαβάζεται από αριστερά προς τα δεξιά ενώ της εκφόρτισης από δεξιά προς αριστερά. Στο θετικό ηλεκτρόδιο, σχηματίζεται το οξυδροξείδιο του νικελίου NiO(OH) με την ακόλουθη χημική αντίδραση:



Το μέταλλο M στο αρνητικό ηλεκτρόδιο μιας μπαταρίας νικελίου-μετάλλου υδριδίου είναι στην πραγματικότητα ένα διαμεταλλικό σύμπλοκο. Πολλά διαφορετικά σύμπλοκα έχουν αναπτυχθεί για αυτήν την εφαρμογή, ωστόσο αυτά που χρησιμοποιούνται είναι δύο ειδών. Το πιο συνηθισμένο είναι το AB_5 , όπου το A συμβολίζει το ένα μείγμα από σπάνιες γαίες όπως νεοδύμιο, πρασεοδύμιο και άλλες και το B, συμβολίζει ένα μείγμα μετάλλων όπως νικέλιο αλουμίνιο και άλλα. Ελάχιστες μπαταρίες χρησιμοποιούν υψηλότερης χωρητικότητας υλικά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο τα οποία βασίζονται σε σύμπλοκα AB_2 , όπου το A συμβολίζει τιτάνιο ή/και βανάδιο ενώ το B συμβολίζει ζirkόνιο ή νικέλιο στο οποίο ενυπάρχει χρώμιο, κοβάλτιο, σίδηρος ή/και μαγγάνιο για να βελτιωθεί η διάρκεια ζωής. Όλα τα ανωτέρω αναφερθέντα σύμπλοκα, έχουν επί της ουσίας τον ίδιο ρόλο και αυτός είναι να φτιάξουν με αναστρέψιμο τρόπο ένα μείγμα από σύμπλοκα μετάλλων υδριδίων. Όταν η μπαταρία υπερφορτιστεί με χαμηλούς ρυθμούς, το οξυγόνο που παράγεται στο θετικό ηλεκτρόδιο περνά διαμέσου του διαχωριστή και επανασυνδυάζεται στην επιφάνεια του αρνητικού ηλεκτροδίου. Το υδρογόνο συμπιέζεται και η ενέργεια φόρτισης μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στις μπαταρίες νικελίου μετάλλου υδριδίου να παραμένουν σφραγισμένες κατά την κανονική λειτουργία τους και να μην χρειάζονται συντήρηση. Επίσης διαθέτουν έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη και για το ρόλο του διαχωριστή χρησιμοποιούνται πολυολεφίνες. Οι μπαταρίες νικελίου-μετάλλου υδριδίου βρίσκουν συχνή εφαρμογή στα υβριδικά αυτοκίνητα των Honda, Toyota και Lexus. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου των μπαταριών είναι η φιλικότητα προς το περιβάλλον, η επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης, η δυνατότητα ταχείας επαναφόρτισης και ο υψηλός βαθμός ανθεκτικότητας με τον κύκλο εκφορτίσεων/φορτίσεων να είναι περίπου στις 2000. Στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος, η απαίτηση για ύπαρξη ψυκτικού κυκλώματος, η περιορισμένη δυνατότητά της για λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο σχετικά χαμηλός ενεργειακός βαθμός απόδοσης που είναι της τάξεως του 70% και η ευαισθησία τους σε φαινόμενα μνήμης, όπου η μπαταρία αν υποστεί συνεχόμενους κύκλους φόρτισης χωρίς πρώτα να έχουν εκφορτιστεί πλήρως, τείνουν να "θυμούνται" την μερική φόρτιση ως μέγιστη δυνατή. Η ειδική ενεργειακή της πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 70-90 Wh/kg και η ειδική πυκνότητα ισχύος μεταξύ 200-300 W/kg.



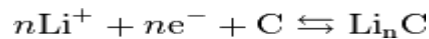
Εικόνα 4.1 Απεικόνιση συστοιχίας μπαταριών νικελίου μετάλλου υδριδίου από το υβριδικό Toyota Prius

4.2.2 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

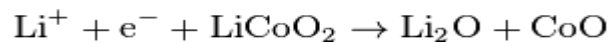
Είναι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε όλα τα αμιγώς ηλεκτροκίνητα οχήματα. Στις μπαταρίες αυτού του τύπου, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο θετικό ηλεκτρόδιο κατά την αποφόρτιση και επιστρέφουν κατά την φόρτιση. Το υλικό του ηλεκτροδίου είναι ένα σύμπλοκο του λιθίου εν συγκρίσει με το απλό μεταλλικό λίθιο που χρησιμοποιείται στις αντίστοιχες μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Σε ότι αφορά την ηλεκτροχημεία τους, υφίστανται τρεις συμμετέχοντες στις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Το θετικό ηλεκτρόδιο, το αρνητικό ηλεκτρόδιο και ο ηλεκτρολύτης. Αμφότερα τα ηλεκτρόδια επιτρέπουν τα ιόντα του λιθίου να μετακινούνται μεταξύ τους. Κατά την εισαγωγή, τα ιόντα εισέρχονται στο ηλεκτρόδιο, ενώ κατά την εξαγωγή εξέρχονται από αυτό. Όταν μια μπαταρία λιθίου εκφορτίζεται, το θετικό ιόν εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (συνήθως γραφίτης) και εισέρχεται στο θετικό ηλεκτρόδιο που είναι το σύμπλοκο του λιθίου. Όταν η μπαταρία φορτίζεται συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία. Έργο παράγεται όταν τα ηλεκτρόνια ρέουν διαμέσου ενός κλειστού εξωτερικού κυκλώματος. Οι ακόλουθες εξισώσεις δείχνουν ένα παράδειγμα της χημικής αντίδρασης σε moles με την χρήση συντελεστού n . Η αρχική αντίδραση αφορά το θετικό ηλεκτρόδιο:



Η αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι:



Η συνολική αντίδραση έχει τα όριά της. Η υπερφόρτιση δημιουργεί υπερκορεσμό στον κοβαλτίτη του λιθίου, κάτι που οδηγεί στον σχηματισμό οξειδίου του λιθίου, πιθανότατα από την ακόλουθη μη αναστρέψιμη αντίδραση:



Γενικά οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν υποφέρουν από φαινόμενα μνήμης, έχουν αντοχή στις χαμηλές θερμοκρασίες και ο ρυθμός αυτοεκφόρτισής τους είναι χαμηλός. Για τις συμβατικές μπαταρίες λιθίου η ειδική ενεργειακή πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 70-90 Wh/kg και η ειδική πυκνότητα ισχύος μεταξύ 200-300 W/kg, για τις υψηλής ισχύος τα αντίστοιχα νούμερα είναι από 85-95 kW/kg και 4000 W/kg, ενώ για τις υψηλής ενέργειας είναι 135-150 Wh/kg και 600 W/kg.



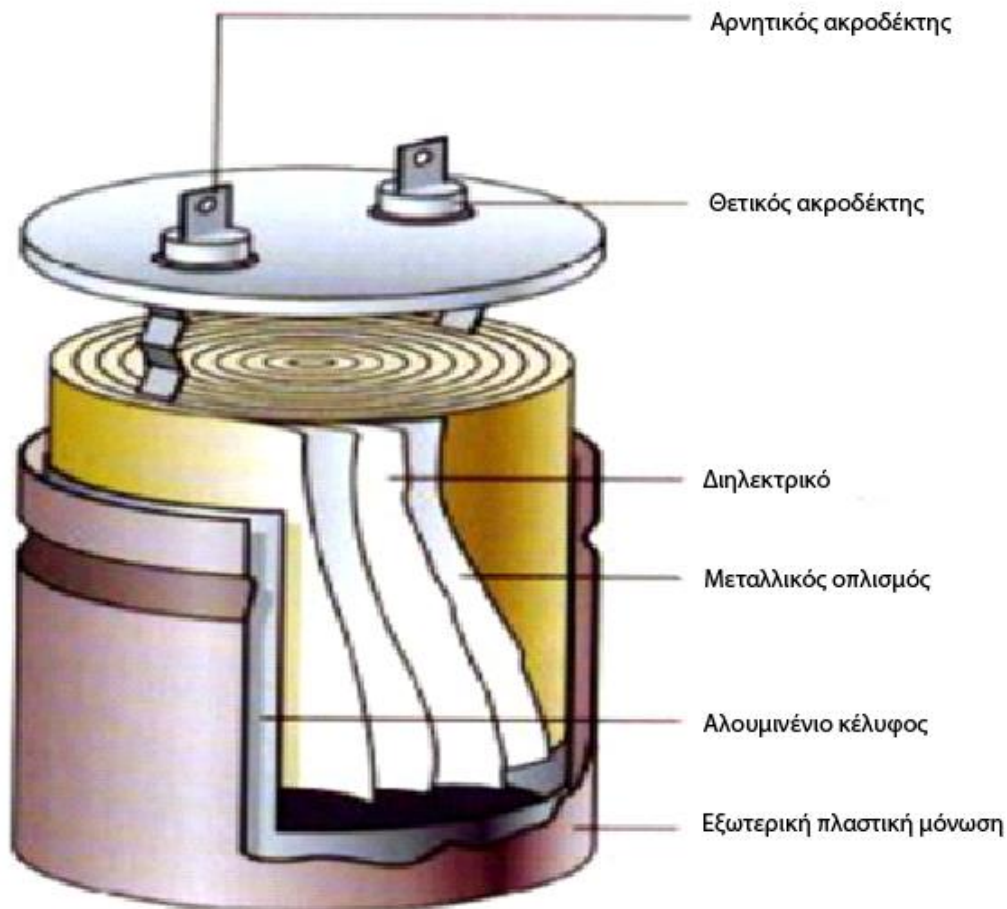
Εικόνα 4.2 Απεικόνιση συστοιχίας μπαταριών ιόντων λιθίου από το ηλεκτροκίνητο Bmw i3

4.3 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται εν γένει σε πολλές εφαρμογές. Βρίσκονται στους αποταμιευτές φορτίου για ακαριαία εκφόρτιση, όπως για παράδειγμα στα φλας των φωτογραφικών μηχανών, στα συστήματα συγκόλλησης μετάλλων, σε τροφοδοτικά, σε μητρικές πλακέτες ηλεκτρονικών υπολογιστών, στα συστήματα ανάφλεξης ΗΖΚ, στα συστήματα πυροδότησης των αερόσακων και των προεντατήρων ζωνών ασφαλείας, ενώ επίσης συναντώνται και στους αποταμιευτήρες ήπιας εκφόρτισης, όπως το κύκλωμα προσωρινής διατήρησης των δεδομένων στην μνήμη τυχαίας προσπέλασης των εγκεφάλων. Σε ότι αφορά την χρήση τους σαν συσσωρευτές ενέργειας στα οχήματα, συνήθως απαντώνται σε αμιγώς θερμικά στα οποία εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση, ή σε ήπια υβριδικά. Τα χαρακτηριστικά τους είναι παρόμοια με των απλών συμβατικών πυκνωτών, με την θεμελιώδη διαφορά τους να είναι το γεγονός ότι ολόκληρη η μάζα των ηλεκτροδίων να χαρακτηρίζεται "ενεργή" και όχι μόνο η εξωτερική όπως στους απλούς πυκνωτές. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτή η μείωση του συνολικού όγκου των υπερπυκνωτών σε ένα μόλις κλάσμα των συμβατικών, αλλά και ο εντυπωσιακός πολλαπλασιασμός της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους, παρόλο που εξακολουθεί να υστερεί έναντι των μπαταριών. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται, η δυνατότητα για πολλαπλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης χωρίς πρόβλημα, η λειτουργία σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η δυνατότητα για σχεδόν ακαριαία φόρτιση και εκφόρτιση και η φιλική προς το περιβάλλον κατασκευή. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγεται το γεγονός ότι έχουν ενεργειακή πυκνότητα που είναι το 1/5 των μπαταριών, αλλά και το μεγάλο κόστος για εφαρμογές με υπερπυκνωτές υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Από την σκοπιά της αναγεννητικής πεδήσεως, οι υπερπυκνωτές μπορούν να ανακτήσουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας κατά την πέδηση λόγω της εγγενούς υψηλής πυκνότητας ισχύος που παρουσιάζουν. Γενικά οι υπερπυκνωτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Ηλεκτροστατικοί
2. Ηλεκτρολυτικοί
3. Ηλεκτροχημικοί

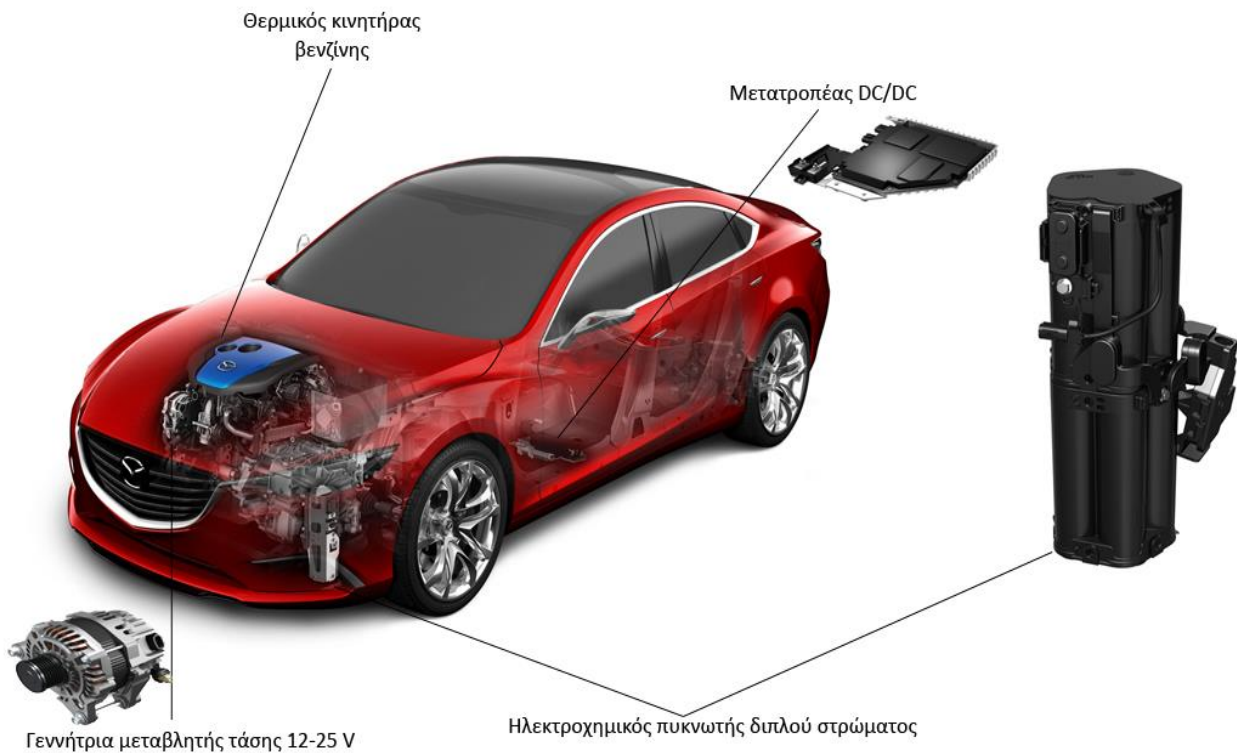
Αν και η τρίτη κατηγορία παραπέμπει ευθέως στην αρχή λειτουργίας των μπαταριών, εντούτοις και οι τρεις κατηγορίες αποθηκεύουν ενέργεια με την μορφή του ηλεκτροστατικού πεδίου λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς.



Εικόνα 4.2 Απεικόνιση συμβατικού πυκνωτή

Η εγγενής δυνατότητα των πυκνωτών να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας που ανακτώνται κατά την πέδηση του οχήματος, καθώς και η σημαντικά μειωμένη εσωτερική ωμική αντίσταση, σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματά τους, συνιστούν μια εύλογη επιλογή για τα υβριδικά οχήματα με χαμηλούς βαθμούς υβριδοποίησης. Σε ότι αφορά την λειτουργία τους, η σύνδεσή τους σε σειρά επιτρέπει την δημιουργία μιας αξιοποιήσιμης διαφοράς δυναμικού για την τροφοδότηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης με ένα εύρος από 48-600 V. Ωστόσο λόγω του ότι ο κάθε πυκνωτής έχει διαφορετικό ρυθμό εκφόρτισης, παραβιάζεται η ισορροπία των διαφορών δυναμικού μεταξύ τους. Το πρόβλημα αυτό οξύνεται από το γεγονός ότι σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης, αυτή η ανισορροπία αυξάνεται, προκαλώντας υπέρταση που οδηγεί σε βράσιμο του ηλεκτρολύτη όπου διασπάται το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, με τελικό επακόλουθο την κατάρρευση ενός ή περισσότερων πυκνωτών της συστοιχίας. Για αυτόν τον λόγο, όταν είναι συνδεδεμένοι σε σειρά πάνω από τρεις συμμετρικοί πυκνωτές, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είτε παθητική είτε ενεργητική εξισορρόπηση. Στην παθητική εξισορρόπηση, ο πυκνωτής είναι ενσωματωμένος με μια αντίσταση σε παράλληλη σύνδεση με αυτόν, ενώ στην ενεργητική χρησιμοποιούνται εξωτερικά, ψηφιακά

ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ασύμμετροι πυκνωτές, δεν απαιτείται εξισορρόπηση των διαφορών δυναμικού, ενώ παρουσιάζουν και πενταπλάσια πυκνότητα ενέργειας, με το μειονέκτημά τους να είναι η μικρότερη πυκνότητα ισχύος. Επίσης όταν η τάση τους μειωθεί στο μισό, η αποθηκευμένη ενέργεια τους μειώνεται κατά 3/4. Σε ότι αφορά τους ηλεκτροχημικούς πυκνωτές, αυτοί διακρίνονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, τους ηλεκτροχημικούς διπλού στρώματος και τους ψευδοπυκνωτές.



Εικόνα 4.3 Ο ηλεκτροχημικός πυκνωτής διπλού στρώματος που χρησιμοποιείται στο αμιγώς θερμικό Mazda 6

Σε ότι αφορά τους ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος, οι οπλισμοί είναι κατασκευασμένοι από ενεργό άνθρακα, ενώ στην περίπτωση των ψευδοπυκνωτών, οι οπλισμοί είναι κατασκευασμένοι από οξειδία μετάλλων όπως RuO_2 και MnO_2 πάνω σε φορέα ενεργού άνθρακα. Και στις δύο περιπτώσεις, οι οπλισμοί είναι εμβαπτισμένοι σε ηλεκτρολύτη. Οι ψευδοπυκνωτές βρίσκονται στην αιχμή του δόρατος σε ότι αφορά την τεχνολογική τους στάθμη και μπορούν να αποθηκεύσουν 80% περισσότερη ενέργεια από έναν ίδιων διαστάσεων ηλεκτροχημικό πυκνωτή διπλού στρώματος, χάρη στην μεγαλύτερη πυκνότητα ηλεκτροδίων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από οξειδία μετάλλων. Τα μειονέκτηματά τους είναι η μεγάλη εσωτερική αντίσταση που παρουσιάζουν καθώς και οι αυξημένες αυθόρμητες διαρροές ρεύματος.

4.4 Σφόνδυλοι

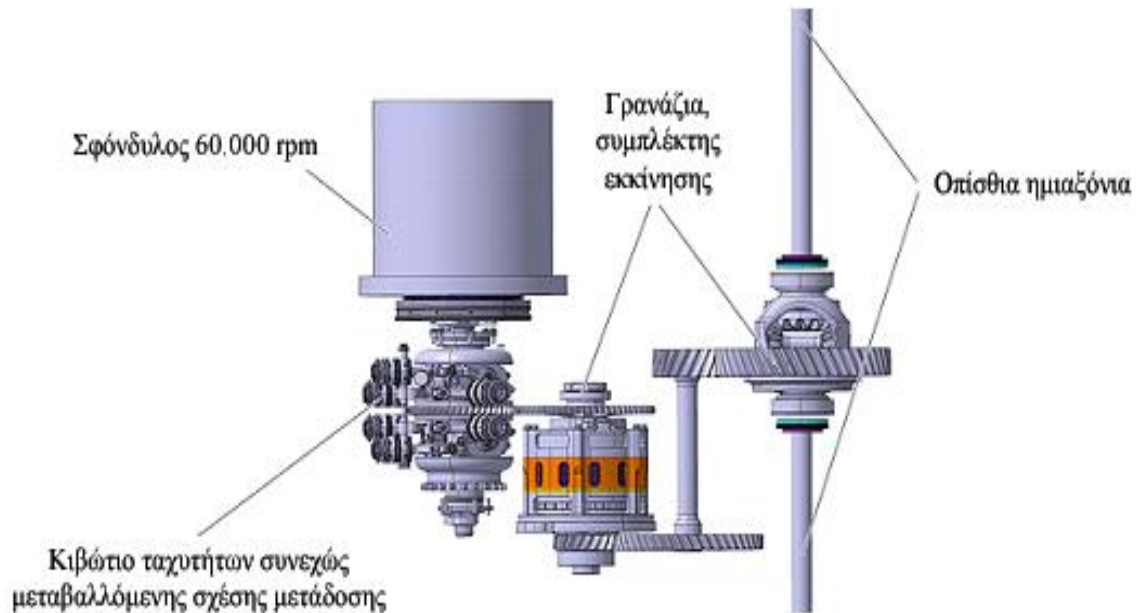
Ο σφόνδυλος είναι ένα περιστρεφόμενο μηχανικό σύστημα το οποίο δρα ως αποταμιευτής ενέργειας. Η κινητική ενέργεια ενός οχήματος που βρίσκεται στην διαδικασία της πέδησης χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τον σφόνδυλο. Ο σφόνδυλος ακολούθως είναι συνδεδεμένος με την μετάδοση του οχήματος, ώστε να βοηθήσει το όχημα να εκκινήσει ακόμα και χωρίς την χρήση του κινητήρα. Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται στον σφόνδυλο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} \times j \times \omega^2$$

Όπου j = Η αδράνεια του σφονδύλου και ω = Η γωνιακή ταχύτητα

Ένας σφόνδυλος που χρησιμοποιείται σαν συσσωρευτής ενέργειας θα απολέσει ένα ποσοστό αυτής της ενέργειας λόγω αεροδυναμικών απωλειών. Η εκτιμηθείσα πρακτική ενεργειακή πυκνότητα είναι αρκετά χαμηλότερη από την θεωρητική λόγω του πρόσθετου βάρους των εδράνων, του άξονα μετάδοσης, του μειωτήρα με τον οποίο ενδεχομένως συνεργάζεται ο σφόνδυλος, αλλά και του δοχείου που τον εσωκλείει. Ο σφόνδυλος περιστρέφεται σε κενό προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες ανεμισμού. Λόγω του υψηλού ρυθμού περιστροφής του σφονδύλου και λόγω της καθοριστικής σημασίας που έχει η ελαχιστοποίηση των τριβών, χρησιμοποιούνται μαγνητικά έδρανα. Γενικά για να εξαχθεί ενέργεια από έναν σφόνδυλο, χρησιμοποιείται μια γεννήτρια. Αυτή η γεννήτρια πρέπει να είναι σε θέση να ανθέξει τους πολύ υψηλούς ρυθμούς περιστροφής σε ένα δυσμενές περιβάλλον περιβάλλον ψύξης, που εν προκειμένω είναι το κενό. Η ηλεκτρική μηχανή που συνήθως επιλέγεται είναι τύπου μόνιμου μαγνήτη λόγω του εξαιρετικού βαθμού απόδοσής της. Ένας τυπικός συνδυασμός σφονδύλου/κινητήρα/γεννήτριας έχει μέγιστο ρυθμό περιστροφής 30000-50000 Rpm και ελάχιστο ρυθμό περιστροφής 7500-12500 Rpm. Αυτός ο λόγος 4:1 μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου ρυθμού περιστροφής, επιτρέπει την χρήση περίπου του 94% της διαθέσιμης κινητικής ενέργειας. Αν και οι σφόνδυλοι γενικά διαθέτουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις μπαταρίες, δυνατότητα υψηλού ρυθμού παραγωγής έργου και πρακτικά απεριόριστο χρόνο ζωής, εντούτοις το υψηλό βάρος, κόστος αλλά και η πολυπλοκότητα που συνεπάγεται η χρήση τους, δεν τους καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλή επιλογή. Στην προσπάθεια μείωσης της πολυπλοκότητας που ενέχει ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας με σφόνδυλο, η Volvo δοκίμασε ένα σύστημα, το οποίο δεν συνεργάζεται με ηλεκτροκινητήρα και γεννήτρια, αλλά αντίθετα, ένας σφόνδυλος φτιαγμένος από εξωτικά συνθετικά υλικά (ίνες άνθρακα) για λόγους μείωσης του βάρους, είναι τοποθετημένος στον οπίσθιο άξονα του οχήματος και μέσω ενός

κιβωτίου ταχυτήτων συνεχώς μεταβαλλόμενης σχέσης, δίδει την ανακτηθείσα κινητική ενέργεια από την πέδηση κατευθείαν στους οπίσθιους τροχούς του οχήματος. Έτσι το όχημα κατά την εκκίνηση μπορεί να χρησιμοποιεί μόνο τον οπίσθιο άξονά του μέσω της ανακτηθείσας ενέργειας από τον σφόνδυλο, χωρίς να χρησιμοποιεί τον θερμικό του κινητήρα.

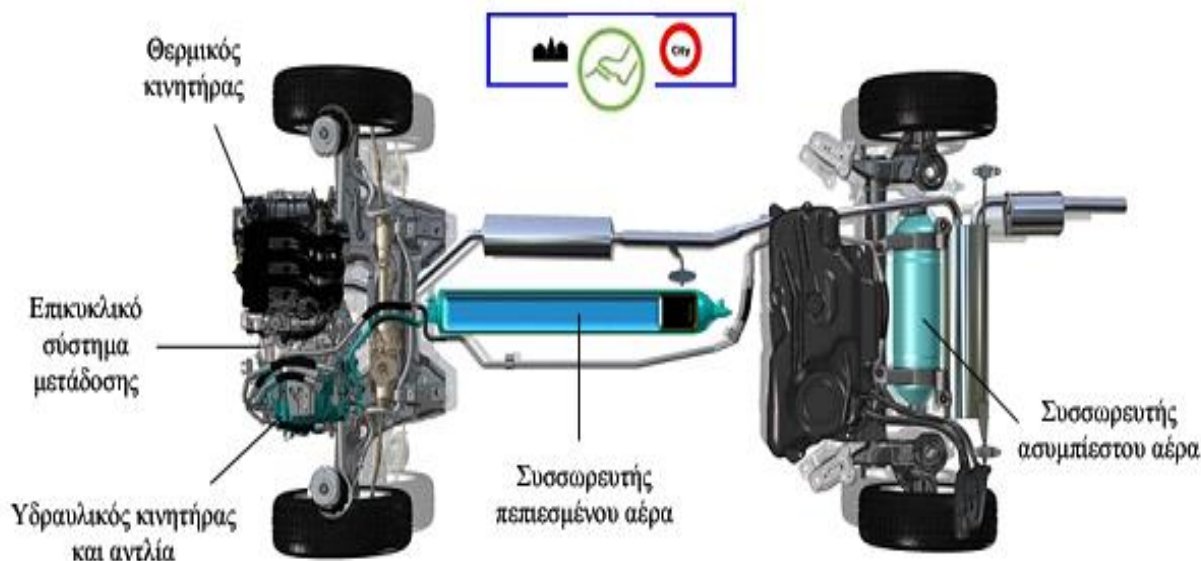


Εικόνα 4.4 Σύστημα ανάκτησης κινητικής ενέργειας μέσω σφονδύλου της Volvo

4.5 Πνευματικοί συσσωρευτές

Οι πνευματικοί συσσωρευτές είναι μια τεχνολογία συσσώρευσης ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται σε υβριδικά οχήματα τα οποία δεν έχουν τους ανωτέρω αναφερθέντες τύπους συσσωρευτών. Οι πνευματικοί συσσωρευτές αφορούν υβριδικά οχήματα, στα οποία πέραν του θερμικού κινητήρα, υπάρχει ένας υδραυλικός κινητήρας και μια υδραυλική αντλία ενσωματωμένα σε ένα κέλυφος. Ο υδραυλικός κινητήρας-αντλία είναι τοποθετημένος δίπλα από τον εγκάρσια τοποθετημένο θερμικό κινητήρα στο εμπρός μέρος του οχήματος. Ο υδραυλικός κινητήρας τροφοδοτείται από πεπιεσμένο αέρα ο οποίος παρέχεται από έναν διαμήκως τοποθετημένο στο κέντρο του αμαξώματος πνευματικό συσσωρευτή. Επίσης υπάρχει και ένας συσσωρευτής στο οπίσθιο μέρος του οχήματος, ο οποίος είναι γομωμένος με αέρα σε πίεση περιβάλλοντος. Κατά την πέδηση του οχήματος, η ενέργεια που ανακτάται χρησιμοποιείται από την υδραυλική αντλία ώστε να συμπιέσει τον αέρα που βρίσκεται στον κεντρικό συσσωρευτή, ενώ πέραν της πέδησης του οχήματος, συμμετέχει και ο θερμικός κινητήρας στην συμπίεση του αέρα που βρίσκεται στον κεντρικό πνευματικό συσσωρευτή, όταν περιστρέφεται στις στροφές μέγιστου βαθμού απόδοσης. Κατόπιν, όταν το όχημα επιταχύνει, ένας ηλεκτρονικός

εγκέφαλος, ανάλογα με τις οδικές συνθήκες, εμπλέκει τον υδραυλικό κινητήρα μέσω ενός επικυκλικού μηχανισμού, ο οποίος συμμετέχει και αυτός στην πρόωση του οχήματος.



Εικόνα 4.5 Σύστημα με πνευματικούς συσσωρευτές (Hybrid Air) του ομίλου PSA. Απεικόνιση της λειτουργίας της αναγεννητικής πεδήσεως

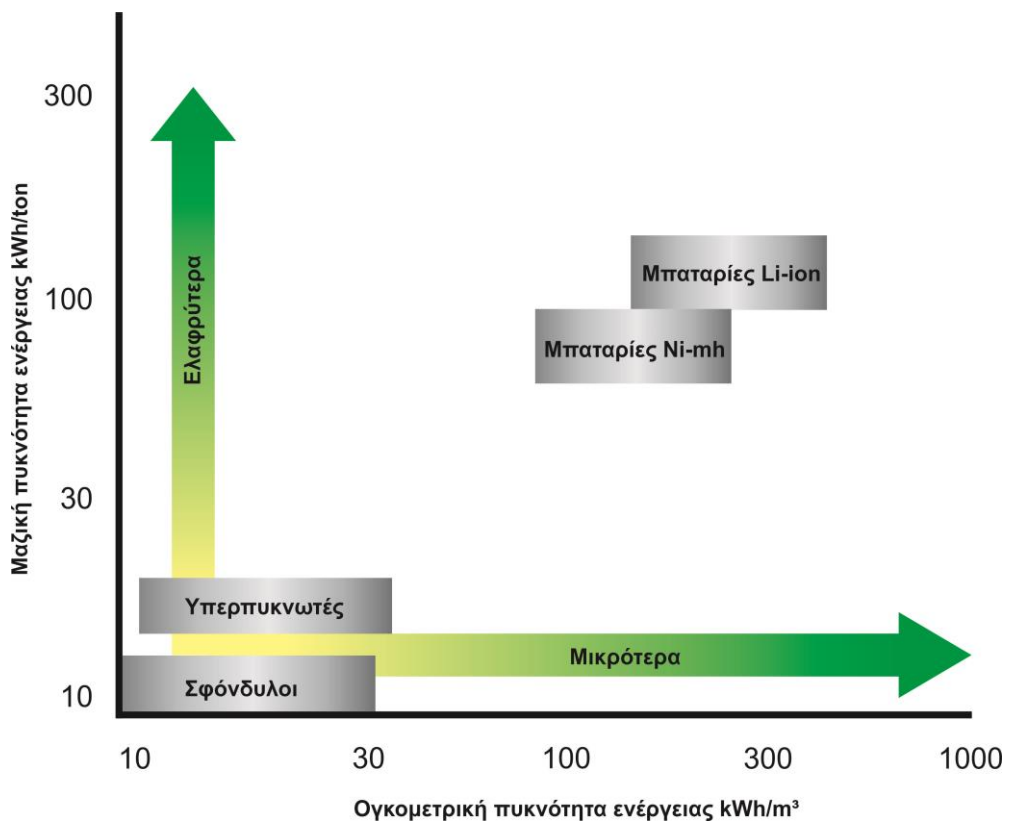
4.6 Σύγκριση των μεθόδων συσσώρευσης ενέργειας

	Ειδική ενεργειακή πυκνότητα	Ειδική πυκνότητα ισχύος	Βαθμός απόδοσης	Κύκλος ζωής
Τεχνολογία	(Wh/kg)	(W/kg)	%	Αριθμός φορτίσεων - εκφορτίσεων
Ni-Mh	70-90	200-300	70	750-1200
Li-ion	80-130	200-300	>95	1000
Li-ion θείου	100-130	150-250	80	1000
Li-ion Υψηλής ισχύος	85-95	4000	-	-
Li-ion Υψηλής ενέργειας	135-150	600	-	-
Υπερπυκνωτές	2,3	2900	-	500000

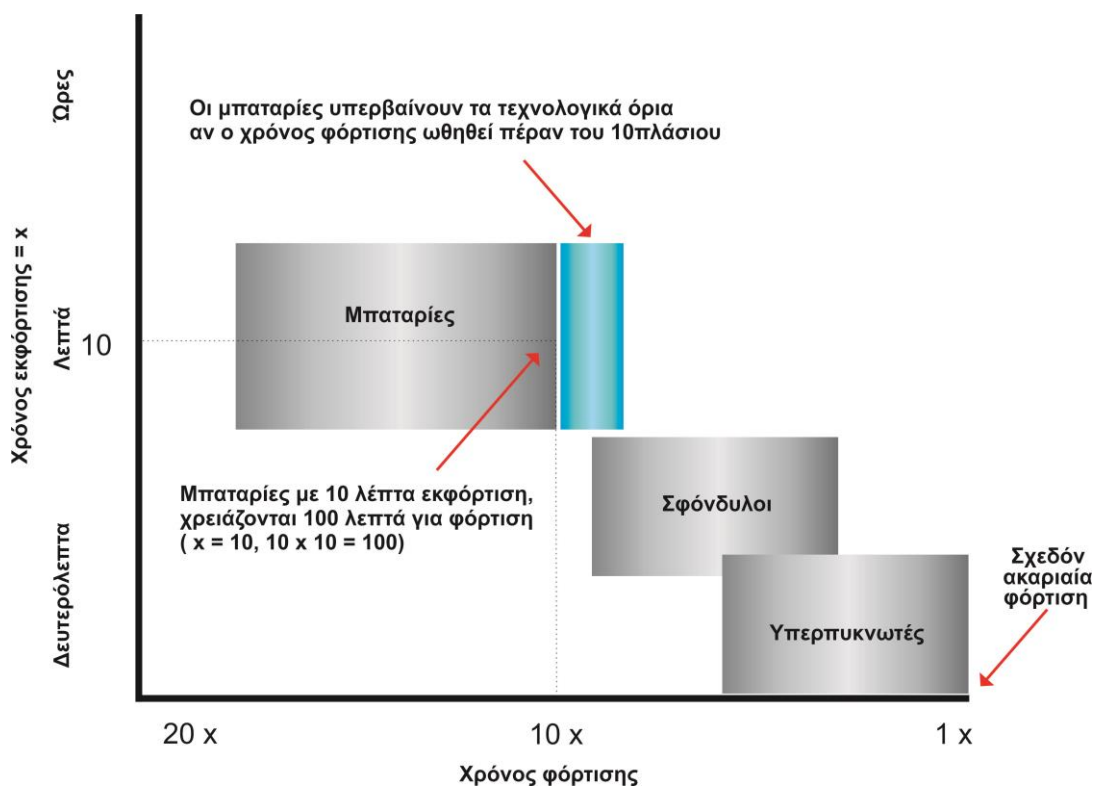
Πίνακας 4.1 Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών μπαταριών και υπερπυκνωτών

	Μπαταρίες	Υπερπυκνωτές	Σφόνδυλοι
Τυπικός χρόνος λειτουργίας	5'-8 ώρες	10''-1'	1''-1'
Ιστορία στην αγορά	Πολλές δεκαετίες	Λίγα χρόνια	Μακρά ιστορία οι χαμηλού ρυθμού περιστροφής, πιο πρόσφατοι οι υψηλού ρυθμού περιστροφής
Συνθήκες λειτουργίας	Στενό θερμοκρασιακό εύρος	Πλατύ θερμοκρασιακό εύρος	Πλατύ θερμοκρασιακό εύρος
Περιβαλλοντικός αντίκτυπος	Επιβλαβείς. Έκλυση υδρογόνου κατά την φόρτιση	Επιβλαβείς αν καούν	Επιβλαβείς αν δεν ανακυκλωθούν
Ασφάλεια	Απαιτούνται ειδικοί χειρισμοί όταν οι μπαταρίες έχουν φτάσει στο τέλος ζωής τους	Απαιτούν μεγάλες τάσης λειτουργίας	Απαιτούνται κελύφη για σφονδύλους υψηλού ρυθμού περιστροφής
Εύρος ισχύος	Μέχρι Αρκετά MW	Μέχρι δεκάδες χιλιάδες kW	Μέχρι αρκετά MW
Αξιοπιστία	Μέτρια	Υψηλή	Μέτρια
Συντήρηση	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια για σφονδύλους από ίνες άνθρακα, υψηλότερη για σφονδύλους κατασκευασμένους από συμβατικά υλικά
Χρόνος φόρτισης	Δεκαπλάσιος της εκφόρτισης	Δευτερόλεπτα	Δευτερόλεπτα ή λεπτά
Κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης	Μέχρι 3000	Μέχρι 1.000.000	Απεριόριστοι με την προϋπόθεση επαρκούς συντήρησης

Πίνακας 4.2 Σύγκριση ιδιοτήτων μπαταριών, υπερπυκνωτών και σφονδύλων



Διάγραμμα 4.1 Σύγκριση διαφόρων τύπων συσσωρευτών



Διάγραμμα 4.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών φόρτισης-εκφόρτισης διαφόρων συσσωρευτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Ποσοτική επίδραση της αναγεννητικής πέδησης στα οχήματα.

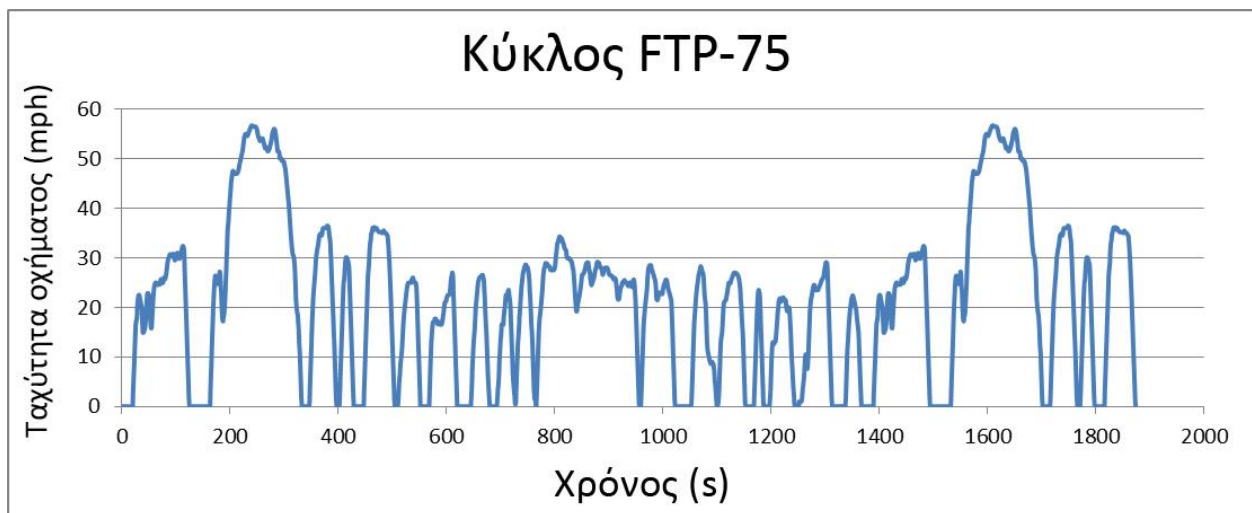
5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η ποσοτική επίδραση που έχει η αναγεννητική πέδηση στην κατανάλωση, τους εκπεμπόμενους ρύπους και την αυτονομία των διαφόρων τύπων οχημάτων. Γενικά ο επακριβής προσδιορισμός των ανωτέρω, είναι ιδιαίτερα δυσχερές γιατί επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι σαν φαινόμενο είναι δυναμικό και μεταβάλλονται συνεχώς κατά την οδήγηση. Οι παράγοντες αυτοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τον οδηγό, η δεύτερη αφορά το ίδιο το όχημα και η τρίτη σχετίζεται με εξωτερικούς παράγοντες. Σε ότι αφορά τον οδηγό, η επιλεχθείσα διαδρομή, για παράδειγμα αν είναι εντός αστικού ιστού, εθνικής οδού ή επαρχιακού δρόμου, ο τρόπος που οδηγεί το όχημα με το αν είναι επιθετικός και συνεπαγόμενα ενεργοβόρος ή συντηρητικός και συνεπαγόμενα λιγότερο ενεργοβόρος, το αν χρησιμοποιεί τον κλιματισμό ή όχι, το αν έχει ανοιχτά τα παράθυρα, τα οποία επηρεάζουν την αεροδυναμική απόδοση, η επαρκής συντήρηση του οχήματος κ.ο.κ, είναι παράγοντες που συμβάλλουν στην διαμόρφωση της κατανάλωσης του οχήματος. Σε ότι αφορά το ίδιο το όχημα, ο κινητήρας του, η αεροδυναμική του απόδοση, το βάρος του, το είδος του συστήματος μετάδοσης, η κλιμάκωση των σχέσεων μετάδοσης (σε αμιγώς θερμικά και υβριδικά οχήματα) και η επιλογή των ελαστικών, είναι παράγοντες που συμμετέχουν καθοριστικά στην διαμόρφωση της κατανάλωσης. Τέλος σε ότι αφορά τους εξωτερικούς παράγοντες, ο καιρός, το υψόμετρο που κινείται το όχημα, η κατάσταση και ο συντελεστής τριβής του οδοστρώματος και ο κυκλοφοριακός φόρτος, συμβάλλουν και αυτά από την μεριά τους στην τελική κατανάλωση, τους εκπεμπόμενους ρύπους και την αυτονομία των οχημάτων. Επειδή ακριβώς το φαινόμενο του προσδιορισμού αυτών των μεγεθών είναι πολυπαραγοντικό, έχουν δημιουργηθεί κάποιοι τυποποιημένοι κύκλοι οδήγησης, οι οποίοι προσπαθούν να τα προσδιορίσουν. Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιούνται οι κύκλοι Ευρώπης και Αμερικής, αντιστοίχως NEDC και EPA. Αυτοί οι κύκλοι σε ότι αφορά την ακρίβειά τους είναι σχετικά ικανοποιητικοί, ωστόσο είναι κυρίως ενδεικτικοί προκειμένου οι δυνητικοί αγοραστές κάποιου οχήματος να έχουν στην διάθεσή τους πληροφόρηση για μια τυποποιημένη ένδειξη κατανάλωσης και εκπεμπόμενων ρύπων του οχήματος που τους ενδιαφέρει.

5.2 Τυποποιημένοι κύκλοι οδήγησης EPA και NEDC

5.2.1 Κύκλος EPA

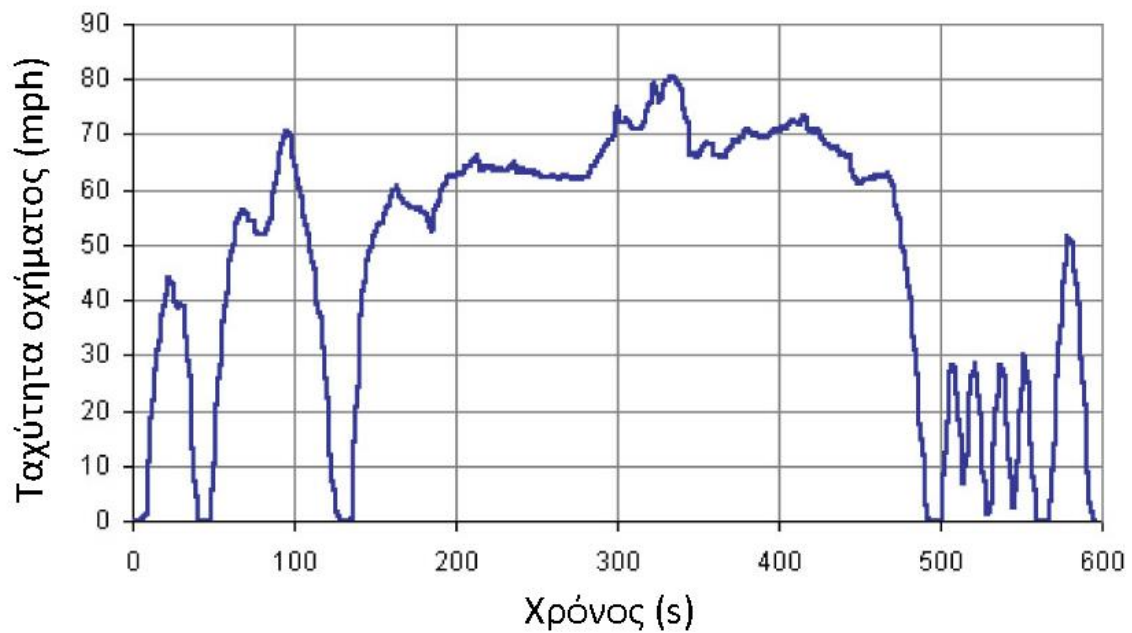
Αυτός ο κύκλος χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α και αναλύεται στις διαδικασίες FTP-75, US06, SC03 και "ψυχρός κύκλος". Η διαδικασία FTP-75 αφορά κίνηση σε αστικό περιβάλλον με μέση ωριαία ταχύτητα 34.1 km/h, διανυθείσα απόσταση 17.77 km και διάρκεια 1874 s. Η διαδικασία απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1 Αστικός κύκλος οδήγησης κατά EPA

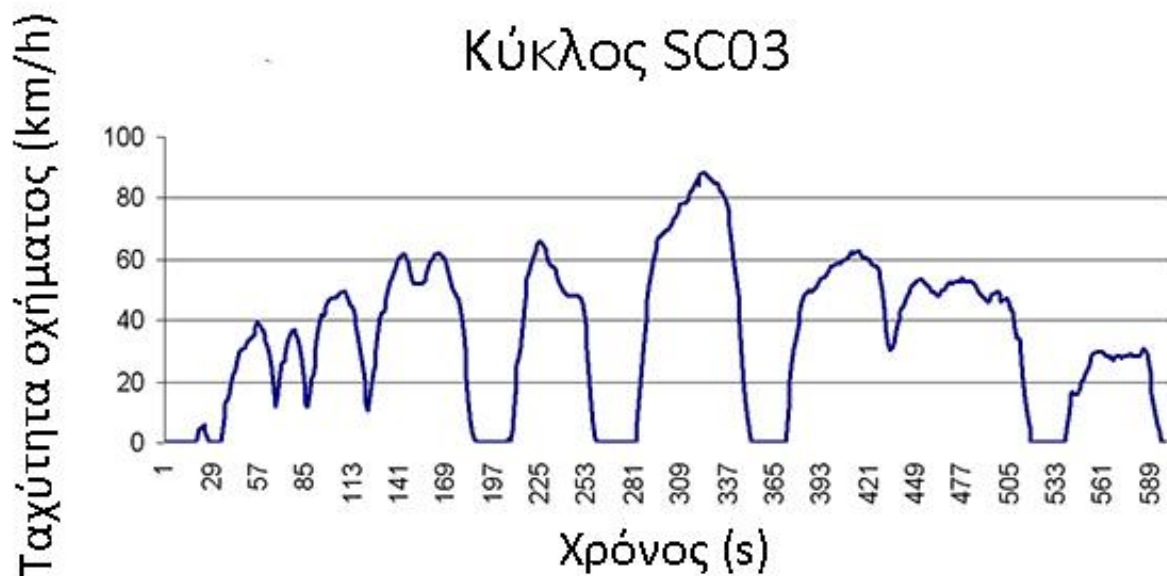
Ο κύκλος US06 εξομοιώνει κίνηση σε εθνική οδό με υψηλές ταχύτητες και γρήγορες επιταχύνσεις. Σε αυτόν τον κύκλο υπάρχει μια διαδικασία υψηλής ταχύτητας και ταχείας επιτάχυνσης διάρκειας 10 min, η οποία καλύπτει απόσταση 13 km με μέση ταχύτητα 77 km/h και μέγιστη ταχύτητα 130 km/h. Σε αυτόν περιλαμβάνονται τέσσερις στάσεις και επιτάχυνση με μέγιστο ρυθμό 13.62 km/h ανά s. Ο κινητήρας στην περίπτωση θερμικού και υβριδικού οχήματος ξεκινά ζεστός, ενώ δεν χρησιμοποιείται ο κλιματισμός. Τέλος η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται μεταξύ **20 – 30°C**. Η διαδικασία απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.2.

Κύκλος US06



Διάγραμμα 5.2 Υπεραστικός κύκλος οδήγησης κατά EPA

Ο κύκλος SC03 είναι μια παραλλαγή του FTP-75 και περιλαμβάνει στους υπολογισμούς την χρήση του συστήματος κλιματισμού. Σε αυτόν τον κύκλο, η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 35°C , θερμοκρασία όπου χρησιμοποιείται το σύστημα κλιματισμού του οχήματος. Η διαδικασία διαρκεί 9.9 min, η διαδρομή είναι 5.8 km, η μέση ταχύτητα είναι 35 km/h, ενώ η μέγιστη ορίζεται στα 88.2 km/h. Επίσης περιλαμβάνονται 5 στάσεις, ενώ το όχημα είναι σε κατάσταση ρελαντί το 19% του συνολικού χρόνου και η επιτάχυνση είναι 8.16 km/sec. Τέλος ο κινητήρας εκκινεί θερμός. Στο διάγραμμα 5.3 απεικονίζεται ο κύκλος οδήγησης SC03



Διάγραμμα 5.3 Αστικός κύκλος με χρήση κλιματισμού

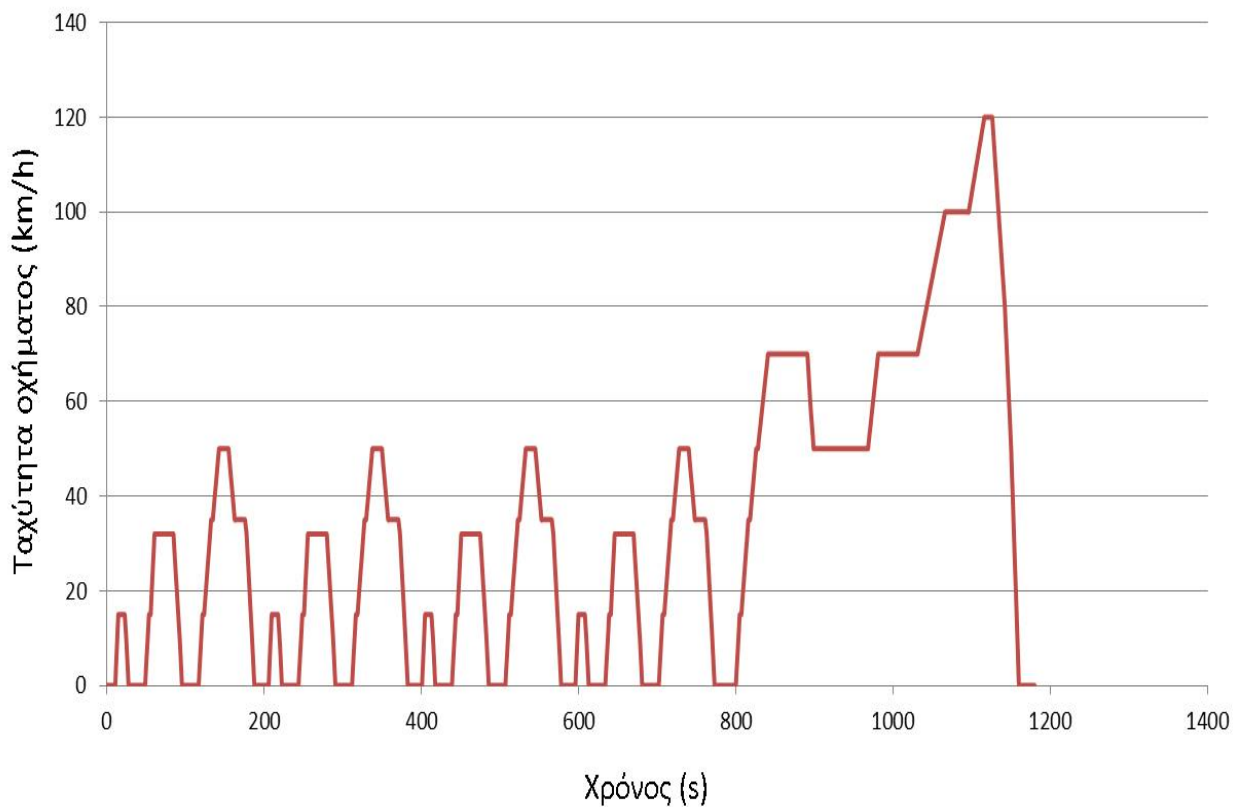
Τέλος, ο ψυχρός κύκλος αφορά αστικό περιβάλλον κίνησης του οχήματος με εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος -7°C .

5.2.2 Κύκλος NEDC

Πρόκειται για τον κύκλο προσδιορισμού ρύπων και κατανάλωσης που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη. Αφορά τα επιβατικά οχήματα και εξαιρεί τα ελαφρά φορτηγά και επαγγελματικά οχήματα. Ο στόχος του κύκλου είναι να εξομοιώσει ένα τυπικό σχήμα χρήσης ενός αυτοκινήτου. Αποτελείται από δυο υποκύκλους που ονομάζονται ECE-R15 και EUDC. Ο ECE-R15 εξομοιώνει την κίνηση του οχήματος σε αστικό περιβάλλον ενώ ο EUDC εξομοιώνει την κίνηση σε εθνική οδό με υψηλότερες ταχύτητες. Κατά την εκτέλεση, λαμβάνουν χώρα 4 συνεχόμενοι ECE-R15 κύκλοι και ένας EUDC. Ο κύκλος εκτελείται με κρύο τον κινητήρα του οχήματος και θερμοκρασία περιβάλλοντος $20 - 30^{\circ}\text{C}$, σε οδόστρωμα χωρίς κλίση και με απουσία ανέμου. Ωστόσο για λόγους επαναληπτικότητας της διαδικασίας, ο κύκλος εκτελείται με το όχημα να είναι πάνω σε ράουλα με μια ηλεκτρική μηχανή να εξομοιώνει αεροδυναμική αντίσταση αλλά και την αδράνεια του οχήματος. Επίσης στον κύκλο δεν χρησιμοποιούνται επιμέρους συστήματα του οχήματος, όπως κλιματισμός, φώτα, θερμαινόμενα

παράθυρα κτλ. Ο κύκλος κατά την εκτέλεση περιλαμβάνει ήπιες επιταχύνσεις με χαμηλές ταχύτητες, συνεχόμενες ακινητοποιήσεις και επανεκκινήσεις μέχρι τα 780 s, όπου από εκεί και πέρα συνεχίζεται με την διαδικασία EUDC για εξομίωση κίνησης εθνικής οδού, με πιο επιθετικό σχήμα οδήγησης, μεγαλύτερες ταχύτητες και υψηλότερους ρυθμούς επιτάχυνσης. Η μέγιστη ταχύτητα που επιτυγχάνεται είναι 120 km/h, ωστόσο για χαμηλής ισχύος οχήματα η μέγιστη ταχύτητα περιορίζεται στα 90 km/h. Η διάρκεια του υπεραστικού κύκλου είναι 400 s ενώ η συνολική διάρκεια αστικού και υπεραστικού κύκλου είναι 1180 s. Ο συνολικός κύκλος απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.4.

Κύκλος NEDC

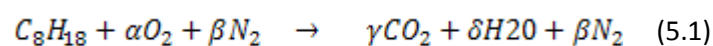


Διάγραμμα 5.4 Κύκλος NEDC

5.3 Προσδιορισμός εκπομπών ρύπων CO_2 σε βενζινοκίνητα, πετρελαιοκίνητα και αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα

5.3.1 Βενζινοκίνητα οχήματα

Για κινητήρες βενζίνης η αντίδραση της καύσης για στοιχειομετρικό μείγμα είναι η ακόλουθη:



Για να προσδιοριστεί το ποσό των ρύπων CO_2 ακολουθείται η εξής διαδικασία. Καταρχήν θεωρείται δεδομένο ότι ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα έχει ατομικό βάρος 44, το οποίο αναλύεται σε 32 για το διατομικό οξυγόνο και 12 για τον άνθρακα. Για να υπολογιστεί για παράδειγμα, το ποσό των ρύπων CO_2 που παράγονται από την καύση ενός λίτρου βενζίνης, το βάρος του άνθρακα στην βενζίνη πολλαπλασιάζεται με το $44/12=3,667$, όπου 44 το συνολικό ατομικό βάρος του διοξειδίου του άνθρακα και 12, το ατομικό βάρος του άνθρακα. Θεωρείται επίσης δεδομένο, ότι η στοιχειακή ανάλυση της βενζίνης σε ότι αφορά τον άνθρακα είναι 87% C, σύμβαση που χρησιμοποιούν οι αυτοκινητοβιομηχανίες όταν ανακοινώνουν εκπομπές ρύπων και ότι 1 λίτρο βενζίνης ζυγίζει 0,73 kg. Συνεπώς αφού στην βενζίνη ο άνθρακας είναι το 87% του βάρους της και 1 lt βενζίνης ζυγίζει 0,73 kg, άρα ο άνθρακας σε ένα λίτρο βενζίνης ζυγίζει $0,73 \times 0,87 = 0,6351 \text{ kg}$. Τελικά πολλαπλασιάζοντας το βάρος του άνθρακα με 3,667, προκύπτει ότι για την καύση 1 λίτρου βενζίνης εκλύονται στην ατμόσφαιρα $0,6351 \times 3,667 \approx 2,3287 \text{ kg } CO_2$. Γενικά όμως στα οχήματα οι εκπομπές ρύπων CO_2 δίνονται σε γραμμάρια/χλμ.

Αριθμητική εφαρμογή:

Έστω ότι υπάρχει ένα βενζινοκίνητο όχημα με μέση κατανάλωση 5 lt/100 km και ζητείται να προσδιοριστούν οι εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα σε γραμμάρια ανά χιλιόμετρο. Το 1 lt καιόμενης βενζίνης έχει ήδη υπολογιστεί ότι εκλύει στην ατμόσφαιρα 2.3287 kg διοξείδιο του άνθρακα, άρα τα 5 λίτρα εκλύουν 11,6435 kg στα 100 km, άρα στο km εκλύονται $11,6435 \times 10 = 116.435 \text{ gr}$ ή $116 \text{ gr } CO_2/\text{km}$.

5.3.2 Πετρελαιοκίνητα οχήματα

Για τον προσδιορισμό του ποσού των ρύπων CO_2 σε πετρελαιοκίνητα οχήματα ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτήν των βενζινοκίνητων με την διαφορά εδώ να είναι η διαφορετική πυκνότητα του πετρελαίου και η διαφορετική σύσταση άνθρακα. Συνεπώς για την περίπτωση του πετρελαίου ισχύει ότι 1 λίτρο ζυγίζει 0,825 kg. Σε ότι αφορά τον άνθρακα, στο πετρέλαιο αποτελεί το 86.2% του καυσίμου, συνεπώς στο 1 lt πετρελαίου ο άνθρακας ζυγίζει $0,825 \times 0,862 = 0,71115 \text{ kg}$. Τελικά πολλαπλασιάζοντας το βάρος του άνθρακα με 3,667, θα έχουμε ότι για την καύση 1 lt πετρελαίου εκλύονται στην ατμόσφαιρα $0,71115 \times 3,667 \approx 2,60755 \text{ kg } CO_2$.

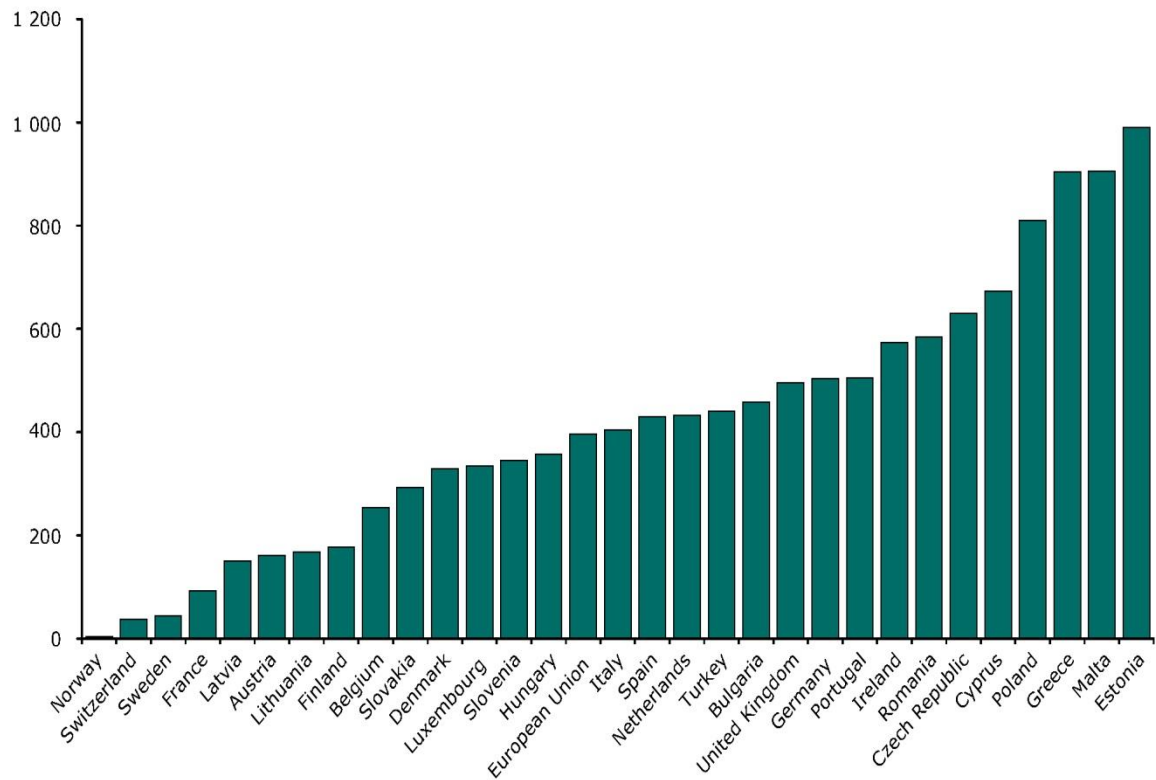
Αριθμητική εφαρμογή:

Έστω ότι μελετάται ένα πετρελαιοκίνητο όχημα με μέση κατανάλωση 5 lt/100 km και ζητείται να προσδιοριστούν οι εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα σε γραμμάρια ανά χιλιόμετρο. Το 1 lt καιόμενου πετρελαίου εκλύει στην ατμόσφαιρα 2.60755 kg διοξείδιο του άνθρακα, οπότε τα 5 λίτρα εκλύουν 13,03775 kg στα 100 km, άρα στο km εκλύονται $13,03775 \times 10 = 130,3775 \text{ gr}$ ή $130 \text{ gr } CO_2/\text{km}$.

5.3.3 Ηλεκτροκίνητα οχήματα

Τα ηλεκτρικά οχήματα εγγενώς δεν παράγουν ρύπους σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή σε επίπεδο οχήματος, διότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες δεν χρησιμοποιούν κάποιο ορυκτό υδρογονάνθρακα ώστε να προωθήσουν το όχημα, ωστόσο εκλύονται ρύποι σε υπερτοπικό επίπεδο, δηλαδή στους τόπους που λαμβάνει χώρα η ηλεκτροπαραγωγή. Επειδή το μείγμα ανανεωσίμων και μη ανανεωσίμων πηγών για την ηλεκτροπαραγωγή είναι διαφορετικό για κάθε χώρα, δεν μπορεί να θεωρηθεί μια καθολική τιμή έκλυσης ρύπων, όπως συμβαίνει για την βενζίνη ή το πετρέλαιο. Στο διάγραμμα 5.5 απεικονίζονται οι ρύποι CO_2/kWh παραγόμενου ρεύματος σε διάφορες χώρες.

Εκπομπές CO₂ (gr)/kWh
παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας



Διάγραμμα 5.5 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για ηλεκτροπαραγωγή σε διάφορες χώρες

Από το διάγραμμα παρατηρούμε, πως αν έχουμε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα με κατανάλωση έστω 15 kWh/100 km, αυτό σημαίνει πως στην Σουηδία συνεισφέρει 750 gr CO₂/100 km, συνεπώς 7,5 gr/km CO₂, ενώ στην Ελλάδα που η ηλεκτροπαραγωγή βασίζεται σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κυρίως λιγνίτη, η κατανάλωση του ηλεκτρικού οχήματος συνεισφέρει 13500 gr CO₂/100 km ή 135 gr/km CO₂. Αυτή η ποσότητα εκλυόμενων ρύπων διοξειδίου του άνθρακα αντιστοιχεί σε σύγχρονο, μικρομεσαίο όχημα με θερμικό κινητήρα πετρελαίου χωρητικότητας 2 lt ή αντίστοιχο με θερμικό κινητήρα βενζίνης 1,4 lt, αμφότερων υπερπληρωμένων. Συνεπώς το πόσο επωφελές για το περιβάλλον είναι ένα ηλεκτρικό όχημα καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο επιβαρύνει το περιβάλλον αυτή καθαυτή η ηλεκτροπαραγωγή.

5.4 Ποσοτική επίδραση της αναγεννητικής πέδησης στην κατανάλωση, τις εκπομπές ρύπων και την αυτονομία διαφόρων τύπων οχημάτων

5.4.1 Θερμικό όχημα με χρήση σφονδύλου

Μελετάται η επίδραση της αναγεννητικής πέδησης σε θερμικό όχημα εφοδιαζόμενο με κινητήρα βενζίνης και χρήση σφονδύλου. Στον πίνακα 5.1 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του οχήματος χωρίς σύστημα αναγεννητικής πέδησης και σφόνδουλου ως συσσωρευτή κινητικής ενέργειας.

Ταυτότητα οχήματος	Volvo S60
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps)	304
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,28
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,23
Βάρος (kg)	1752

Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά Volvo S60 χωρίς σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

Στον πίνακα 5.2 παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Volvo S60 με σύστημα αναγεννητικής πέδησης και χρήση σφονδύλου ως συσσωρευτή κινητικής ενέργειας.

Ταυτότητα οχήματος	Volvo S60 KERS
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps)	200-220
Ισχύς σφονδύλου (ps)	80
Ενεργειακή πυκνότητα σφονδύλου (kWh)	0.15
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,28
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,23
Βάρος (Kg)	1724

Πίνακας 5.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Volvo S60 με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

Για τον προσδιορισμό της ενεργειακής πυκνότητας σφονδύλου που εισάγαμε στον πίνακα 5.2 εργαζόμαστε ως εξής: Ξέρουμε ότι η κινητική ενέργεια του σφονδύλου είναι

$$E = \frac{1}{2} \times j \times \omega^2 \quad (5.2)$$

$$\text{Όμως η αδράνεια} \quad j = k \times m \times r^2 \quad (5.3)$$

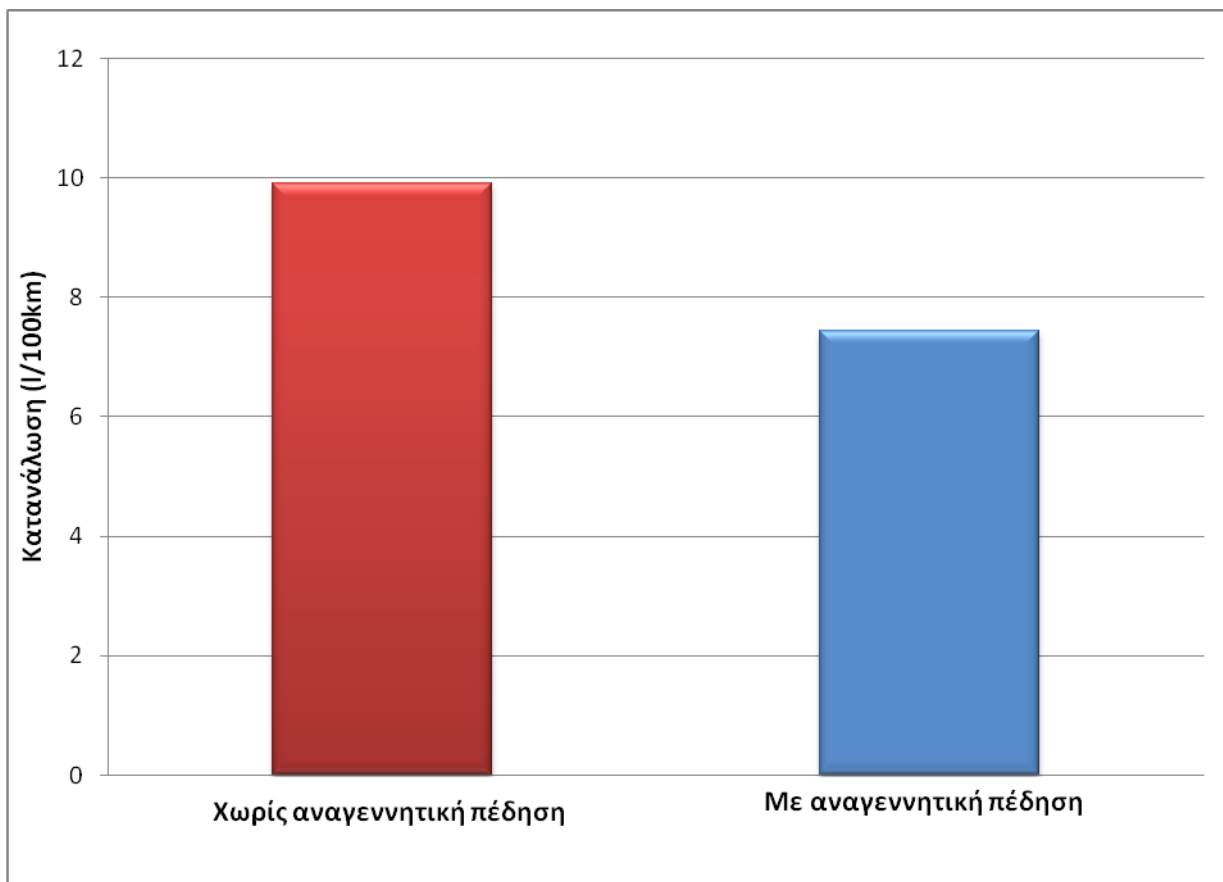
k=σταθερά αδράνειας=0,5

m=μάζα του σφονδύλου=5,985 kg

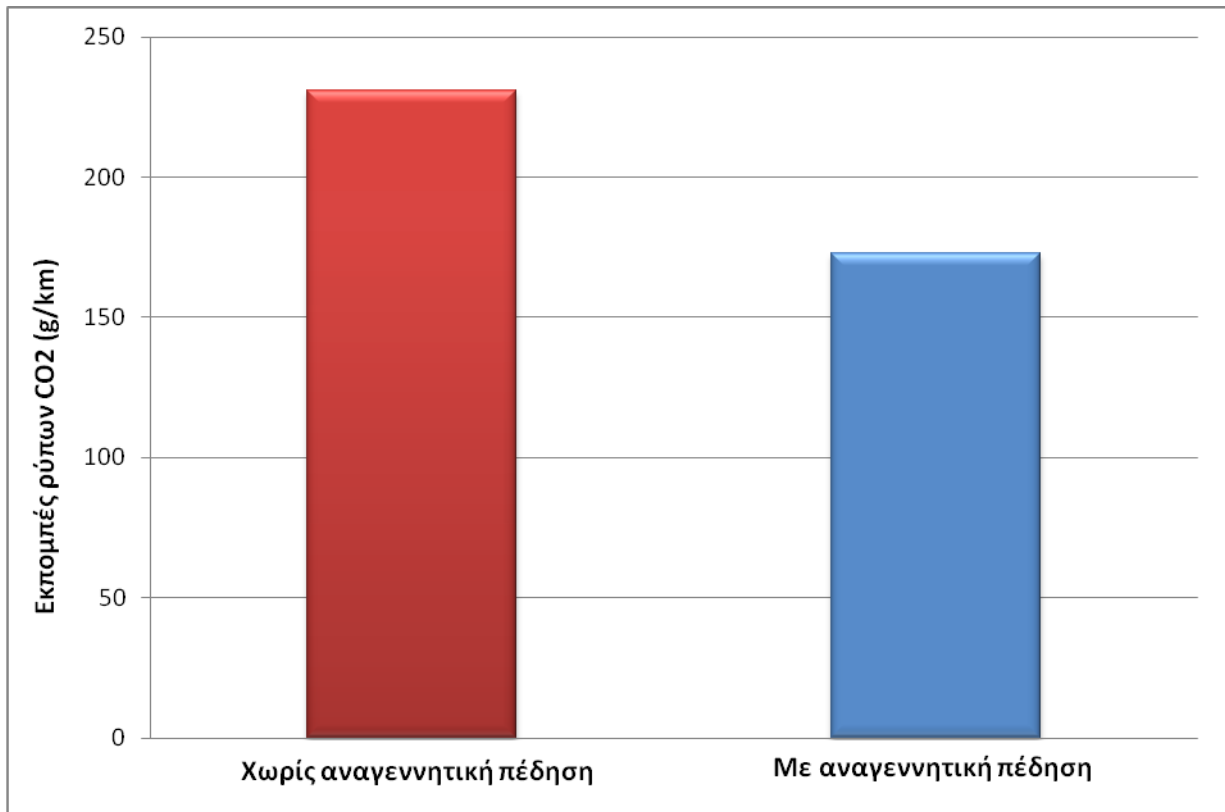
r= ακτίνα σφονδύλου=0,1 m

$\omega=6283 \text{ rad/s}=60000 \text{ rpm}$

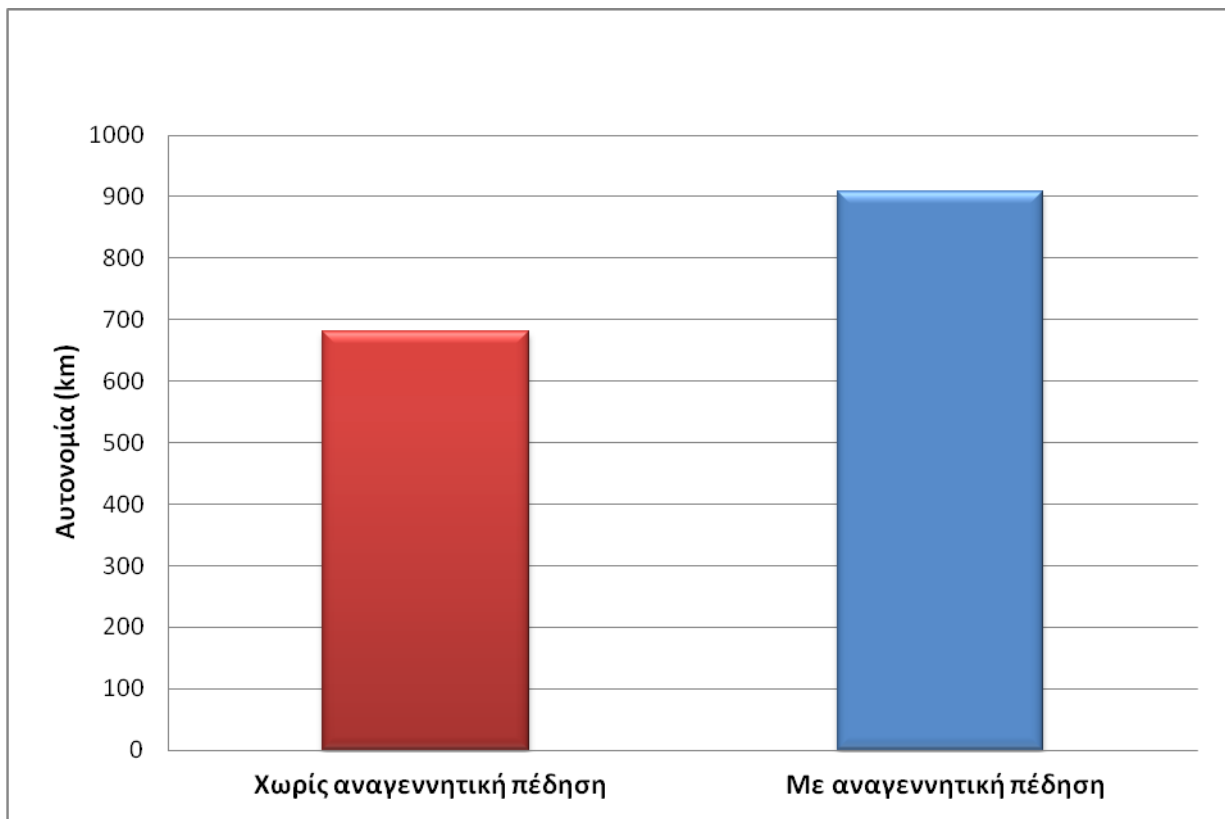
Μετά από πράξεις προκύπτει ότι $E=577337.8 \text{ J}$ και με μετατροπή σε W θα έχουμε ότι είναι περίπου 160 W. Θεωρώντας έναν τυπικό βαθμό απόδοσης σφονδύλου 94%, θα έχουμε τελικά περίπου 150 W. Στα ακόλουθα διαγράμματα συγκρίνονται η κατανάλωση, οι εκπομπές ρύπων και η αυτονομία του οχήματος για χρήση και χωρίς χρήση σφονδύλου με αναγεννητική πέδηση σε κύκλο NEDC.



Διάγραμμα 5.6 Σύγκριση κατανάλωσης με χρήση σφονδύλου και χωρίς, κατά NEDC



Διάγραμμα 5.7 Σύγκριση εκπομπών ρύπων με χρήση σφονδύλου και χωρίς, κατά NEDC



Διάγραμμα 5.8 Σύγκριση αυτονομίας με χρήση σφονδύλου και χωρίς, κατά NEDC

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι υπάρχει μια βελτίωση περίπου 25%, στην κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα και 33% στην αυτονομία του οχήματος για χωρητικότητα δεξαμενής βενζίνης 67,5 lt. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο σφόνδυλος και εφαρμόζεται αναγεννητική πέδηση, ο θερμικός κινητήρας αφενός έχει χαμηλότερη χωρητικότητα, καθώς είναι τετρακύλινδρος σε αντίθεση με τον εξακύλινδρο κινητήρα του οχήματος αναφοράς, αφετέρου το αυτοκίνητο σε σχήμα χρήσης εντός του αστικού ιστού, με συνεχείς ακινητοποιήσεις και επανεκκινήσεις, τον μισό χρόνο μπορεί να κινείται μόνο από την ισχύ που προσφέρει ο σφόνδυλος, ισχύς η οποία δεν έχει κόστος ενεργειακό διότι έχει ανακτηθεί κατά την πέδηση. Σε ότι αφορά την παραλαβή της ισχύος, ο σφόνδυλος την μεταδίδει στους οπίσθιους τροχούς. Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας έχει δυο προγράμματα λειτουργίας. Στο πρόγραμμα 'hybrid', ο θερμικός κινητήρας απεμπλέκεται σε περιπτώσεις ήπιας επιτάχυνσης και όταν ο σφόνδυλος έχει αποθηκευμένη ενέργεια. Στο πρόγραμμα 'sport' ο σφόνδυλος από κοινού με τον θερμικό κινητήρα προωθούν το όχημα για μια διαδικασία γρήγορης επιτάχυνσης. Τα ανωτέρω παρατεθέντα διαγράμματα αφορούν κίνηση στο πρόγραμμα 'hybrid'.

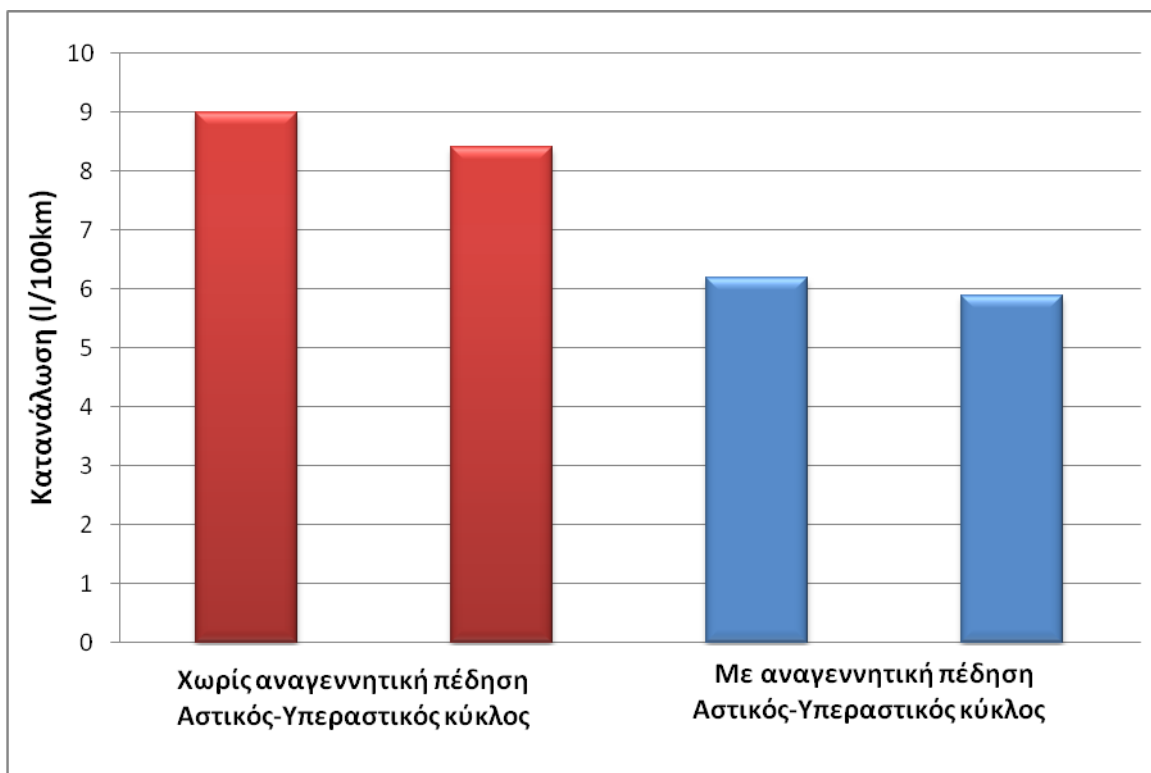
5.4.2 Θερμικό όχημα με υπερπυκνωτή

Εδώ μελετάται η επίδραση της αναγεννητικής πέδησης σε όχημα με χρήση ηλεκτροχημικού πυκνωτή διπλού στρώματος. Στον πίνακα 5.3 παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος αναφοράς χωρίς σύστημα αναγεννητικής πέδησης και υπερπυκνωτή ως συσσωρευτή κινητικής ενέργειας.

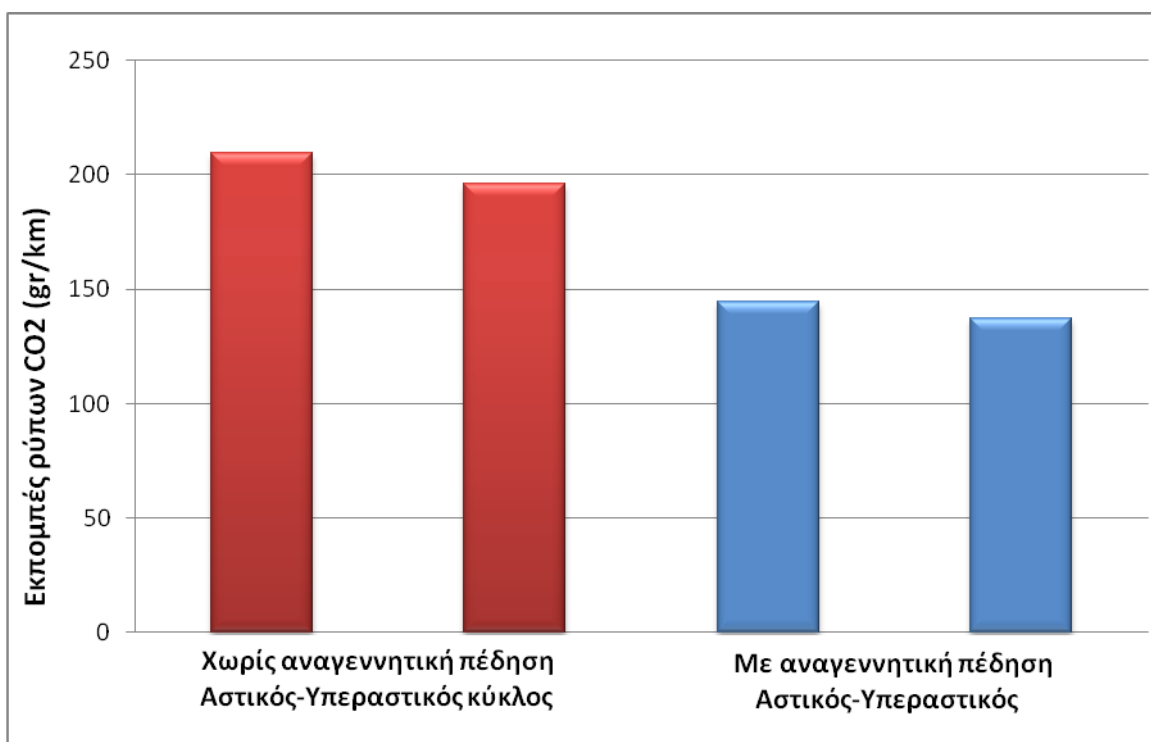
Ταυτότητα οχήματος	Mazda 6
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps κατά SAE)	184
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,26
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	-
Βάρος (kg)	1454

Πίνακας 5.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά Mazda 6 χωρίς ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

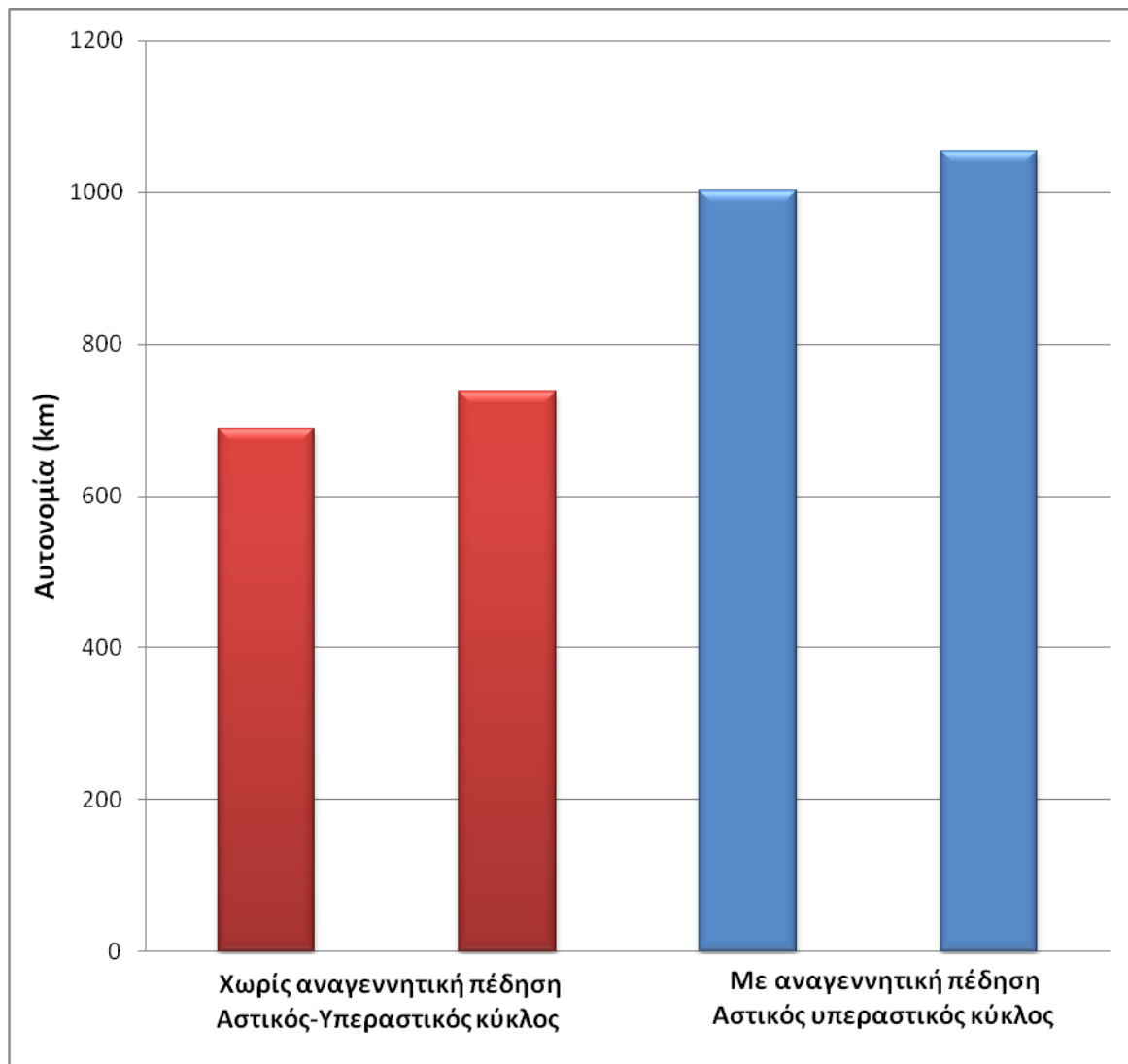
Στο όχημα που εφοδιάζεται με πυκνωτή και σύστημα αναγεννητικής πέδησης, δεν υφίστανται αλλαγές στα ανωτέρω τεχνικά χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 5.9 Σύγκριση κατανάλωσης με χρήση υπερπυκνωτή και χωρίς, σε αστικό και υπεραστικό κύκλο κατά ΕΡΑ



Διάγραμμα 5.10 Σύγκριση εκπομπών ρύπων με χρήση υπερπυκνωτή και χωρίς, σε αστικό και υπεραστικό κύκλο κατά ΕΡΑ



Διάγραμμα 5.11 Σύγκριση αυτονομίας με χρήση υπερπυκνωτή και χωρίς, σε αστικό και υπεραστικό κύκλο κατά EPA

Από τα διαγράμματα παρατηρείται, ότι η μείωση της κατανάλωσης, των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα και η αύξηση της αυτονομίας είναι της τάξεως περίπου του 7% στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο υπερπυκνωτής για την συσσώρευση ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση του συγκεκριμένου οχήματος, η ανακτηθείσα ενέργεια χρησιμοποιείται για περιφερειακές ανάγκες του οχήματος και όχι προώθησης, για παράδειγμα για τον κλιματισμό, το ηχοσύστημα, τα ηλεκτρικά παράθυρα, την υποβοήθηση του τιμονιού. Με αυτόν τον τρόπο ανακουφίζεται ο θερμικός κινητήρας από την ηλεκτροπαραγωγή και έτσι οι ηλεκτρικές ανάγκες σε έναν βαθμό ικανοποιούνται από τον υπερπυκνωτή. Με δεδομένο ότι το όχημα είναι αμιγώς θερμικό, ο υπερπυκνωτής δεν παραδίδει την ηλεκτρική του ισχύ σε κάποιον ηλεκτροκινητήρα που θα μπορούσε να συμμετέχει στην προώθηση, περίπτωση η οποία θα συνέβαλλε περισσότερο θετικά στην κατανάλωση, τις εκπομπές ρύπων και την αυτονομία του οχήματος.

5.4.3 Υβριδικό όχημα με πνευματικούς συσσωρευτές

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η επίδραση της αναγεννητικής πέδησης σε όχημα το οποίο διαθέτει πνευματικούς συσσωρευτές σε συνδυασμό με υδραυλικό κινητήρα-αντλία αντί για ηλεκτρικό και έναν θερμικό κινητήρα βενζίνης φυσικής αναπνοής. Στον πίνακα 5.4 εκτίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμικού οχήματος αναφοράς.

Ταυτότητα οχήματος	Peugeot 208
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps)	82
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,31
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,11
Βάρος (kg)	975

Πίνακας 5.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά Peugeot 208 χωρίς σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

Στον πίνακα 5.5 εκτίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υβριδικού Peugeot 208 με πνευματικούς συσσωρευτές και υδραυλικό κινητήρα-αντλία.

Ταυτότητα οχήματος	Peugeot 208 Hybrid Air
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps)	82
Ισχύς υδραυλικού κινητήρα (ps)	≈ 7
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,31
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,11
Βάρος	1075

Πίνακας 5.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά Peugeot 208 Hybrid air με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

Στην περίπτωση του υβριδικού οχήματος, για να υπολογιστεί η ισχύς που παρέχει ο υδραυλικός κινητήρας, με δεδομένο ότι το όχημα μπορεί να προωθηθεί αποκλειστικά από αυτόν για ταχύτητες μέχρι 70 km/h, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος τύπος:

$$P = F \times V = (m \times g \times v + A \times C_d \times \rho \times V^2 / 2) \times V \quad (5.4)$$

P= Ισχύς υδραυλικού κινητήρα

m=Μάζα οχήματος

g= Επιτάχυνση βαρύτητας

v=Συντελεστής αντιστάσεως κυλίσεως= Θεωρείται 0,01 λόγω της οικολογικής φύσης του οχήματος

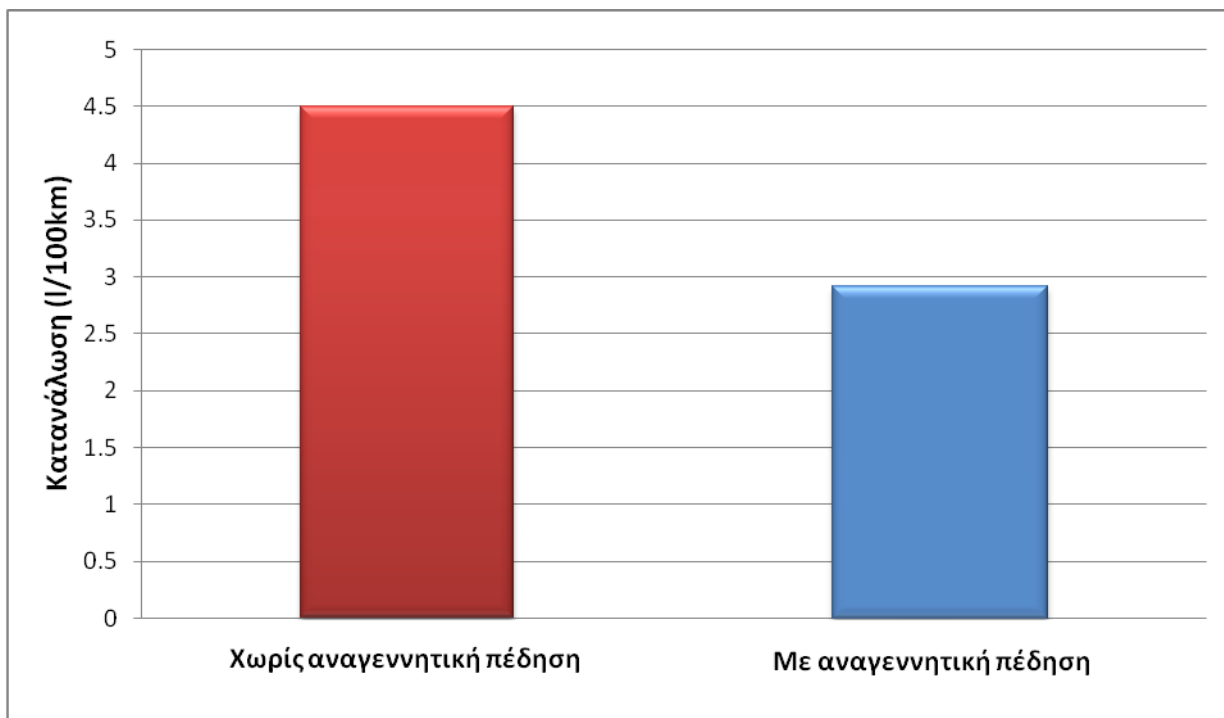
A= Μετωπική επιφάνεια οχήματος

C_d = Συντελεστής οπισθέλκουσας του οχήματος

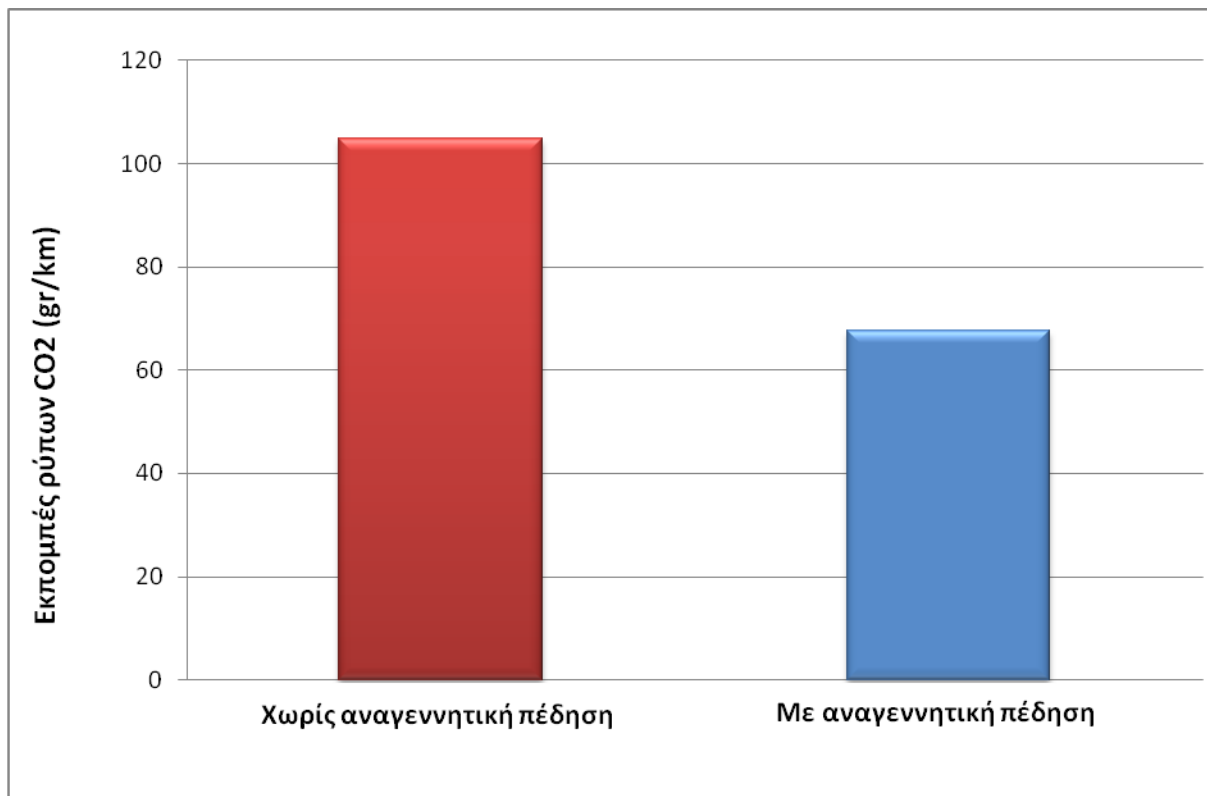
ρ =Πυκνότητα αέρα. Τυπική τιμή 1.205 kg/m³

V=Ταχύτητα οχήματος. Στην προκείμενη περίπτωση 70 km/h ή 19,44 m/s

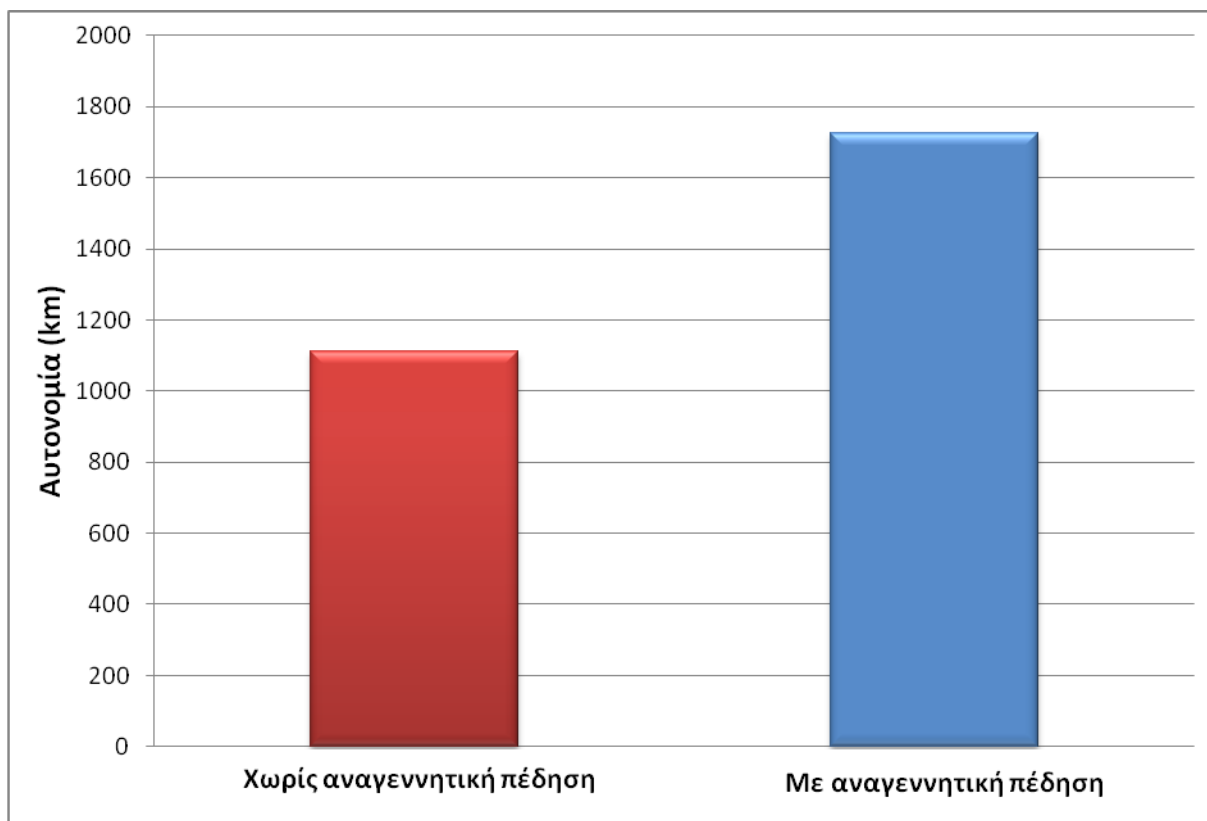
Στα ακόλουθα διαγράμματα συγκρίνονται η κατανάλωση, οι εκπομπές ρύπων και η αυτονομία του οχήματος για χρήση και χωρίς χρήση υδραυλικού κινητήρα με αναγεννητική πέδηση σε κύκλο NEDC.



Διάγραμμα 5.13 Σύγκριση κατανάλωσης με χρήση πνευματικού συσσωρευτή και χωρίς, κατά NEDC



Διάγραμμα 5.14 Σύγκριση εκπομπών ρύπων CO2 με χρήση πνευματικού συσσωρευτή και χωρίς, κατά NEDC



Διάγραμμα 5.15 Σύγκριση αυτονομίας με χρήση πνευματικού συσσωρευτή και χωρίς, κατά NEDC

Από τα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα κατά 25% και αύξηση της αυτονομίας του οχήματος κατά 35% για χωρητικότητα δεξαμενής βενζίνης 50 lt. Τα ανωτέρω διαγράμματα αφορούν συνδυασμένη κατανάλωση, ρύπους και αυτονομία. Είναι πρόδηλο ότι σε ένα προφίλ χρήσης αστικό, τα υπό μελέτη μεγέθη βελτιώνονται ακόμα περισσότερο, διότι οι συχνοί κύκλοι ακινητοποίησης και επανεκκίνησης ευνοούν περαιτέρω την ανάκτηση ενέργειας και έτσι μπορεί να λειτουργεί μόνο ο υδραυλικός κινητήρας για περισσότερο χρόνο για την προώθηση του οχήματος χωρίς την συνδρομή του θερμικού, ενώ θα πρέπει να υπογραμμισθεί εδώ πως το υβριδικό όχημα με αναγεννητική πέδηση είναι και 100 kg βαρύτερο από το αμιγώς θερμικό άνευ αναγεννητικής πέδησης.

5.4.4 Υβριδικό όχημα με μπαταρίες ιόντων λιθίου

Μελετάται η επίδραση της αναγεννητικής πέδησης σε υβριδικό όχημα εφοδιαζόμενο με θερμικό κινητήρα πετρελαίου χωρητικότητας 2.1 lt, διβάθμια υπερπληρωμένου, ηλεκτροκινητήρα μόνιμου μαγνήτη και μπαταρίες ιόντων λιθίου ως συσσωρευτές ενέργειας. Στον πίνακα 5.6 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου αμιγώς θερμικού οχήματος χωρίς σύστημα αναγεννητικής πέδησης και μπαταριών ως συσσωρευτές ενέργειας.

Ταυτότητα οχήματος	Mercedes-Benz E250 CDI
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps)	204
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,26
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,31
Βάρος (kg)	1775

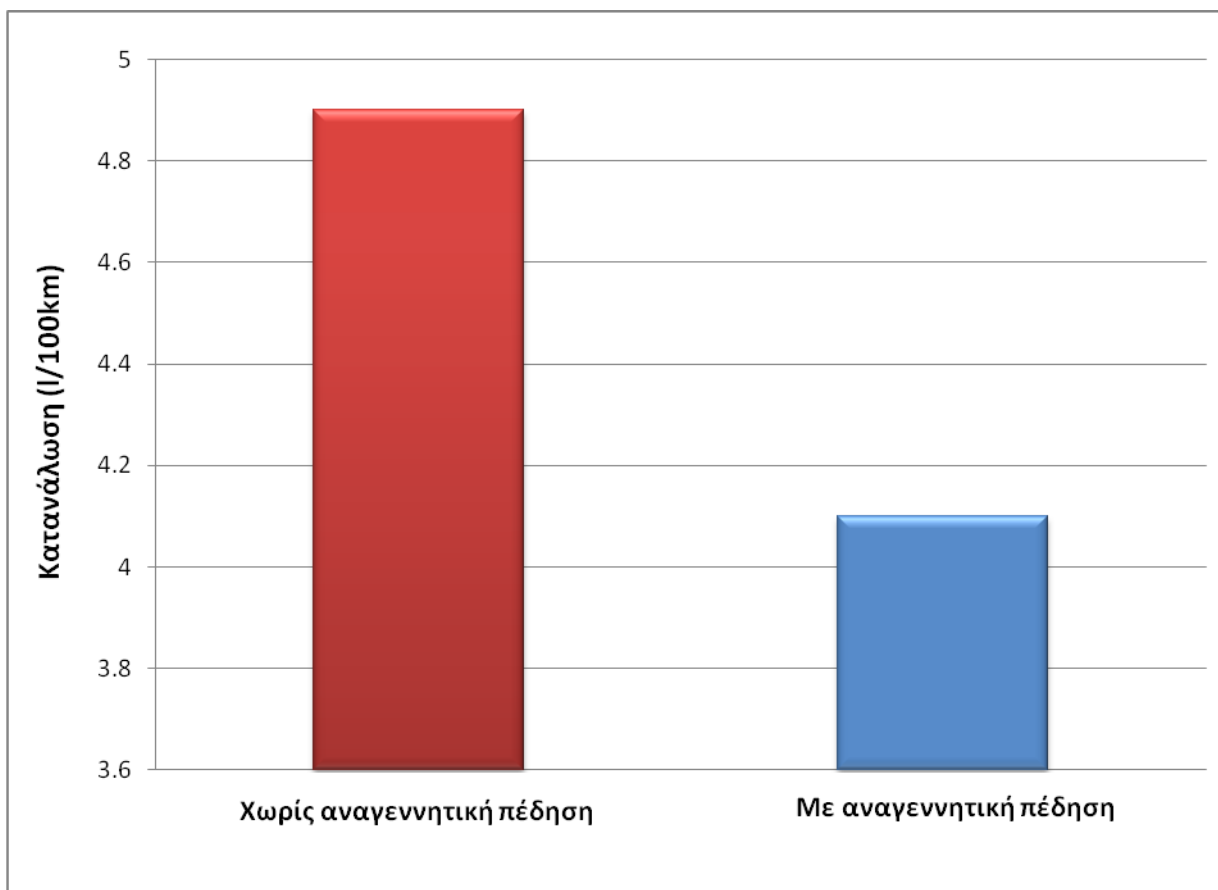
Πίνακας 5.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά Mercedes-Benz E250 CDI χωρίς σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

Στον πίνακα 5.7 παρατίθενται τα στοιχεία του αντίστοιχου υβριδικού οχήματος με σύστημα ανάκτησης ενέργειας και μπαταρίες ιόντων λιθίου ως συσσωρευτές.

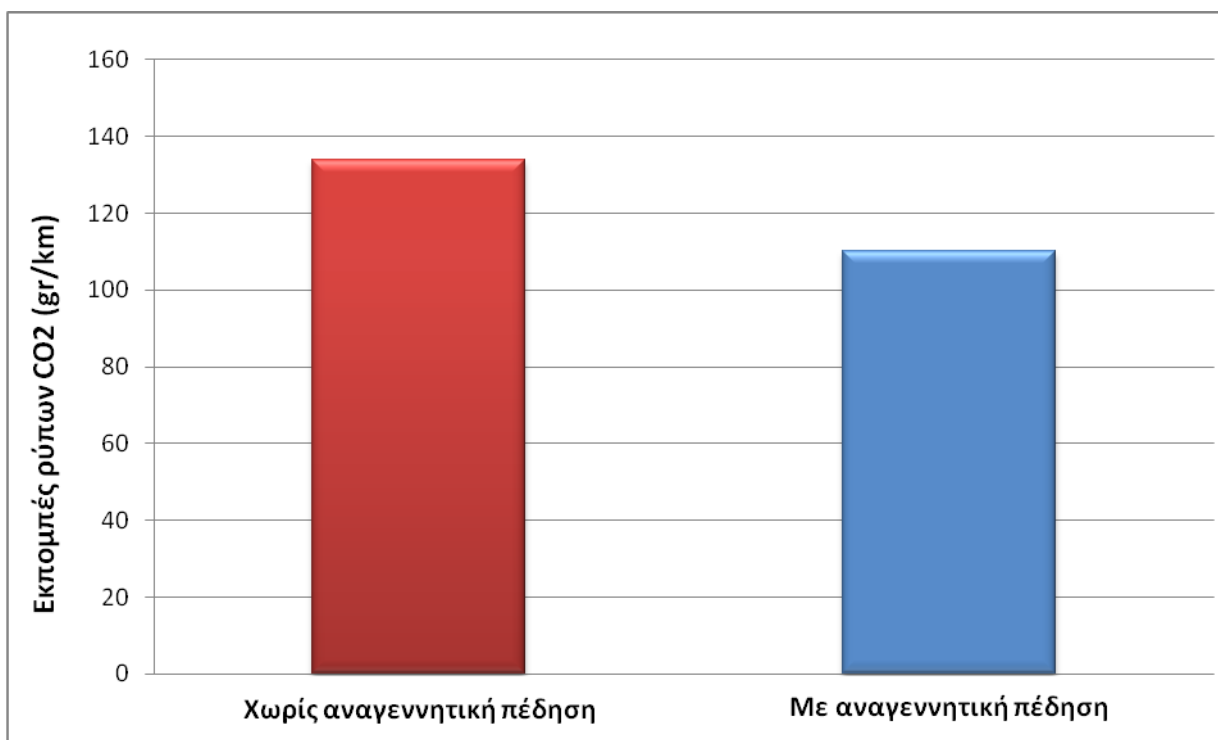
Ταυτότητα οχήματος	Mercedes-Benz E300 Bluetec Hybrid
Ισχύς θερμικού κινητήρα (ps)	204
Ισχύς ηλεκτρικού κινητήρα (ps)	27
Ενεργειακή πυκνότητα μπαταριών (kWh)	0,8
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,26
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,31
Βάρος (kg)	1845

Πίνακας 5.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά Mercedes-Benz E300 Bluetec Hybrid με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης

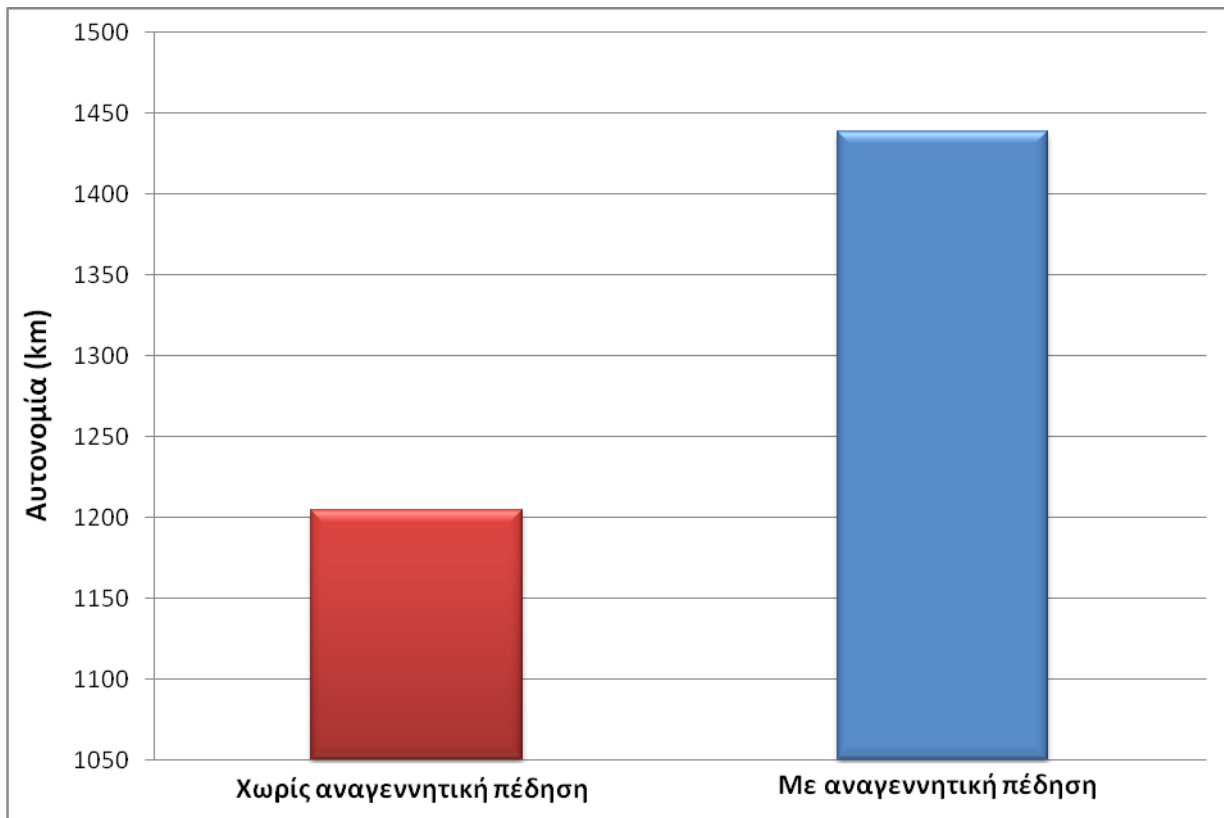
Στα ακόλουθα διαγράμματα συγκρίνονται η κατανάλωση, οι εκπομπές ρύπων και η αυτονομία του οχήματος για χρήση και χωρίς χρήση μπαταριών και ηλεκτροκινητήρα με αναγεννητική πέδηση σε κύκλο NEDC.



Διάγραμμα 5.16 Σύγκριση κατανάλωσης με χρήση μπαταριών ως συσσωρευτών κατά NEDC



Διάγραμμα 5.17 Σύγκριση εκπομπών ρύπων CO2 με χρήση μπαταριών ως συσσωρευτών κατά NEDC



Διάγραμμα 5.18 Σύγκριση αυτονομίας με χρήση μπαταριών ως συσσωρευτών κατά NEDC

Από τα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα κατά 16% και αύξηση της αυτονομίας του οχήματος κατά 19,5% για χωρητικότητα δεξαμενής πετρελαίου 59 lt. Τα ανωτέρω διαγράμματα αφορούν συνδυασμένη κατανάλωση, ρύπους και αυτονομία. Η βελτίωση των μεγεθών κρίνεται σχετικά μετριοπαθής και αυτό γιατί στην περίπτωση που εφαρμόζεται αναγεννητική πέδηση, το υβριδικό όχημα διαθέτει έναν ασθενή ηλεκτρικό κινητήρα με ισχύ 27 ps, ο οποίος δεν μπορεί να ανακτήσει πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την πέδηση. Ωστόσο το μικρό μέγεθος του κινητήρα επελέγη για λόγους χωροταξικούς και για να μην υποστεί το όχημα μεγάλης κλίμακας αλλαγές σε σχέση με το αμιγώς θερμικό. Επίσης το βάρος του υβριδικού οχήματος που ενσωματώνει αναγεννητική πέδηση είναι κατά 70 κιλά αυξημένο.

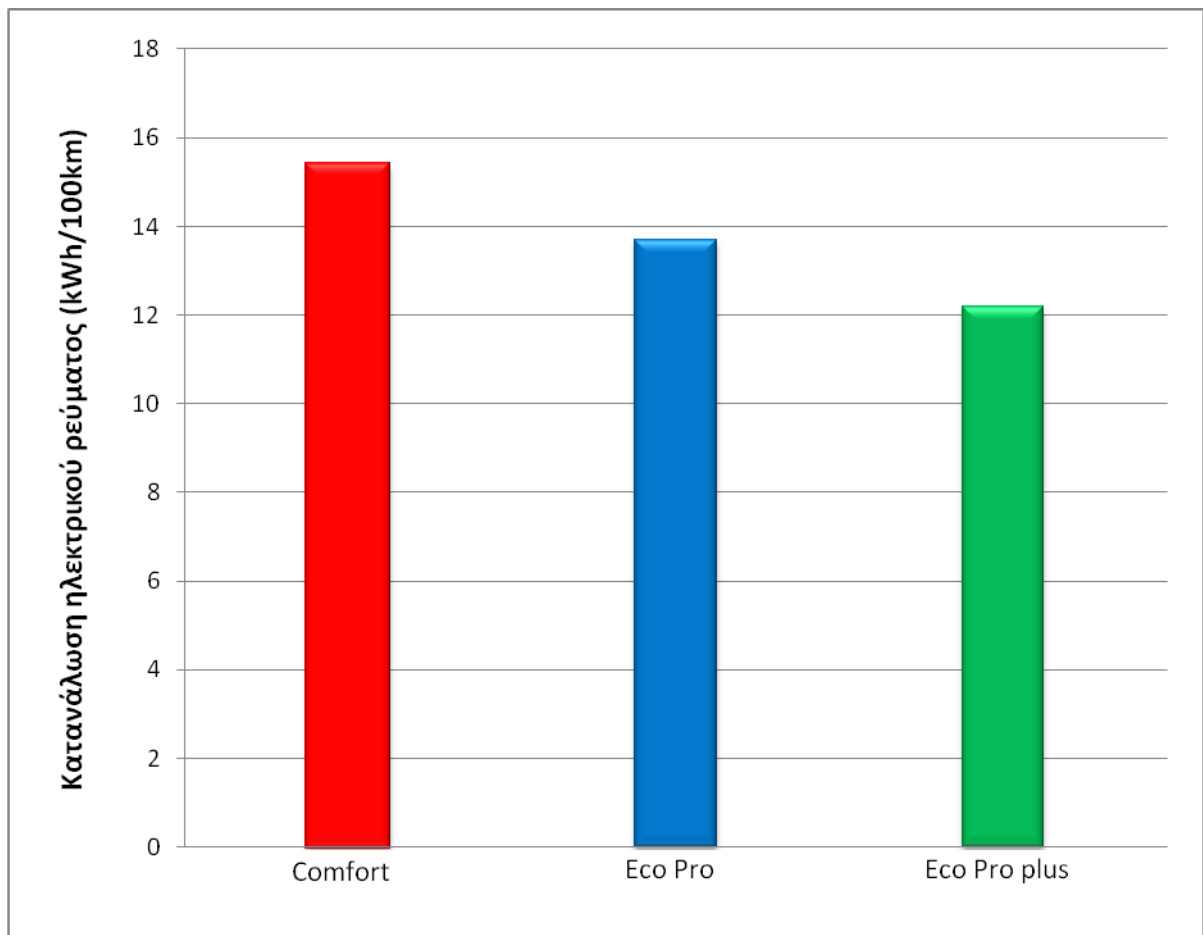
5.4.5 Αμιγώς ηλεκτρικό όχημα με μπαταρίες ιόντων λιθίου

Στην περίπτωση αυτή μελετάται το αμιγώς ηλεκτροκίνητο Bmw i3. Στο συγκεκριμένο όχημα υπάρχει μια δυσχέρεια στο να υπολογιστεί η συμβολή της αναγεννητικής πέδησης στην ανάκτηση ενέργειας διότι στα ηλεκτρικά οχήματα δεν υφίσταται εγγενώς λειτουργία χωρίς ανάκτηση ενέργειας από την πέδηση, όμως ο χειριστής του οχήματος έχει στην διάθεσή του, την δυνατότητα να επιλέξει εκείνος τον βαθμό της αναγεννητικής πέδησης του οχήματος. Στο συγκεκριμένο όχημα που εξετάζεται εδώ, υπάρχουν 3 προγράμματα αναγεννητικής πέδησης, τα Comfort, Eco Pro και Eco Pro Plus για χαμηλή, μέτρια και ισχυρή αναγεννητική πέδηση αντιστοίχως. Στον πίνακα 5.8 εκτίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος.

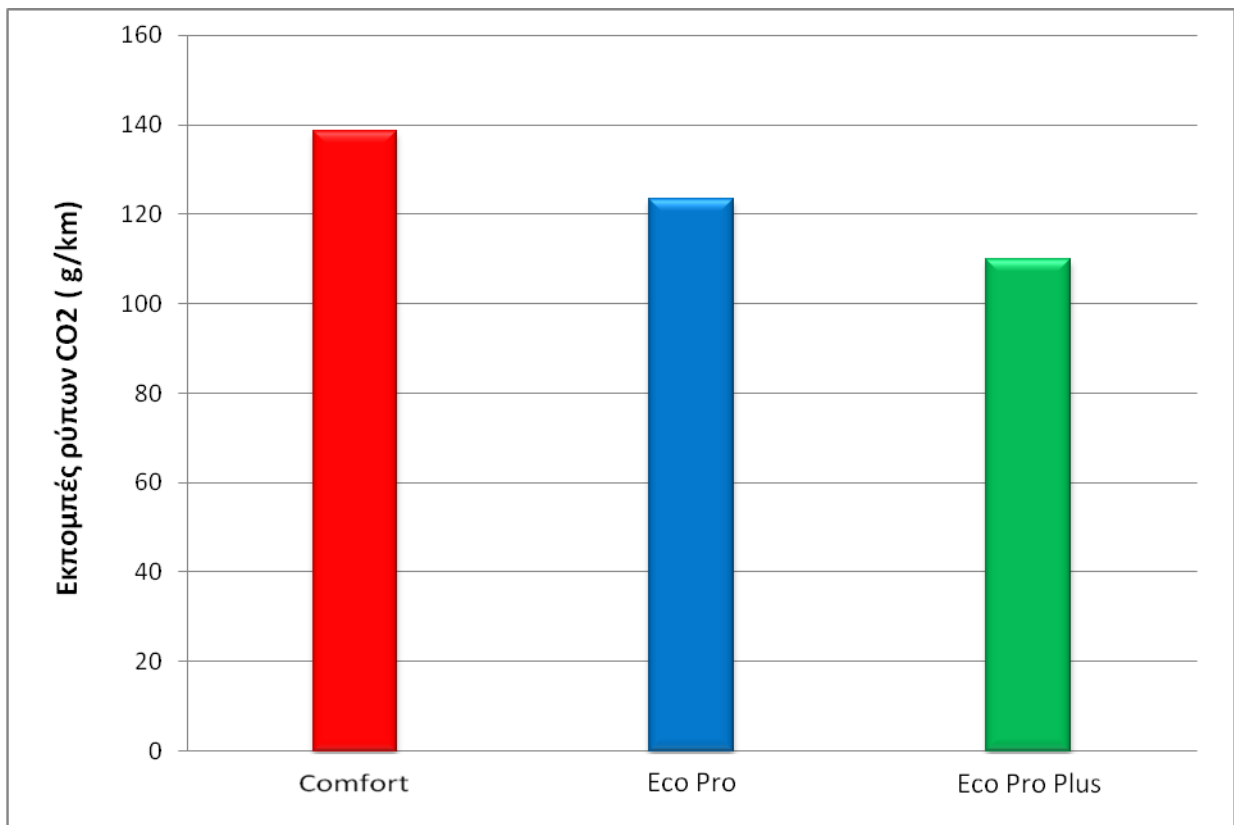
Ταυτότητα οχήματος	Bmw i3
Ισχύς ηλεκτρικού κινητήρα (ps)	170
Ενεργειακή πυκνότητα μπαταριών (kWh)	18,8
Συντελεστής οπισθέλκουσας (cD)	0,29
Μετωπική επιφάνεια (m^2)	2,38
Βάρος (kg)	1270

Πίνακας 5.8 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αμιγώς ηλεκτροκίνητου Bmw i3

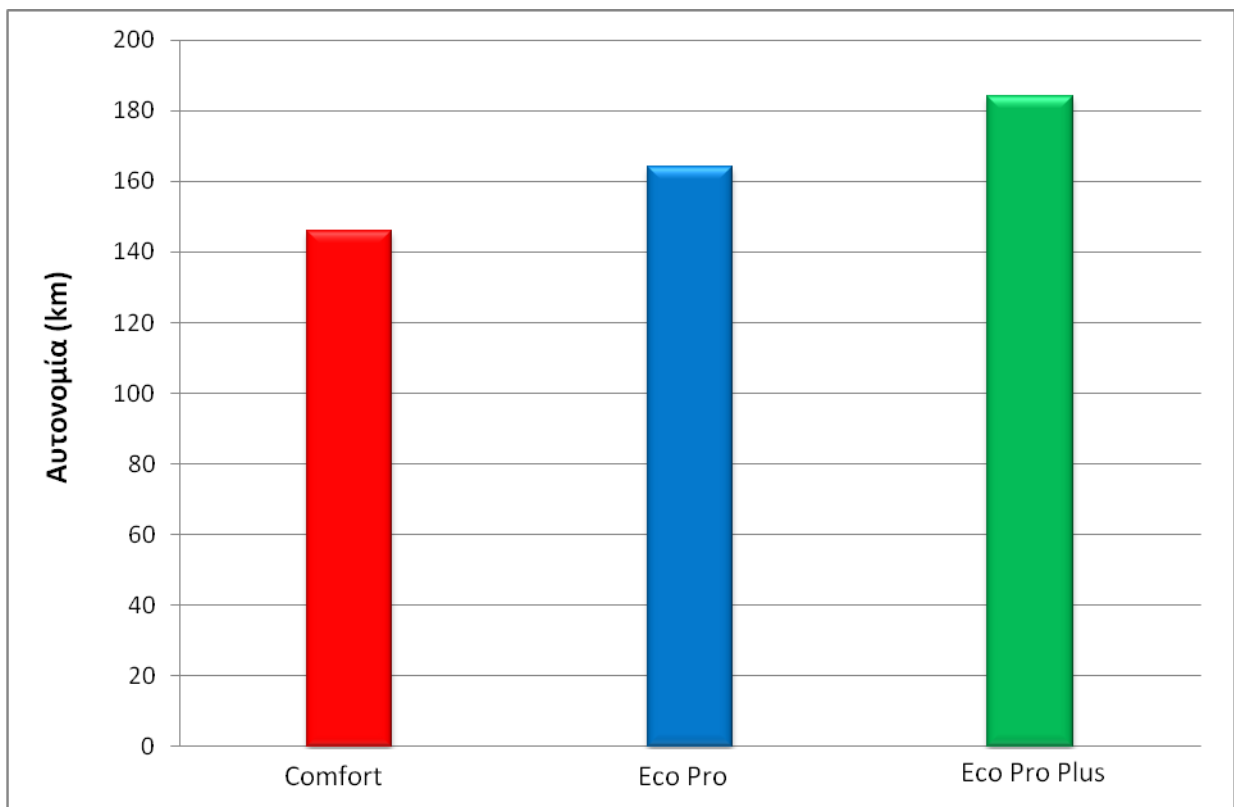
Στα ακόλουθα διαγράμματα συγκρίνονται η κατανάλωση, οι εκπομπές υπερτοπικών ρύπων και η αυτονομία του οχήματος για τους τρεις βαθμούς αναγεννητικής πέδησης του οχήματος σε κύκλο NEDC. Να σημειωθεί εδώ, ότι οι υπολογισθέντες ρύποι αφορούν το μείγμα ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας με στοιχεία που λήφθηκαν από το διάγραμμα 5.5, ενώ στην κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος έχουν συμπεριληφθεί τυπικές απώλειες από φορτιστή και μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο με τυπικούς αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης 93% και 90%.



Διάγραμμα 5.19 Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για διαφορετικούς βαθμούς αναγεννητικής πεδήσεως κατά NEDC



Διάγραμμα 5.20 Εκπομπές ρύπων CO2 λόγω ηλεκτροπαραγωγής για διαφορετικούς βαθμούς αναγεννητικής πεδήσεως κατά NEDC



Διάγραμμα 5.21 Αυτονομία οχήματος για διαφορετικούς βαθμούς αναγεννητικής πεδήσεως κατά NEDC

Από τα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα κατά 11% στο πρόγραμμα Eco Pro και ακόμα 11% στο πρόγραμμα Eco Pro Plus σε σχέση με το πρόγραμμα Comfort και αύξηση της αυτονομίας του οχήματος κατά 12% μεταξύ των προγραμμάτων. Τα ανωτέρω διαγράμματα αφορούν συνδυασμένη κατανάλωση, ρύπους και αυτονομία. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η βελτίωση στα ανωτέρω μεγέθη δεν οφείλεται αποκλειστικά στον βαθμό που εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση, αλλά και γιατί στα προγράμματα Eco Pro και ειδικά στο Eco Pro Plus, περιορίζεται ακόμα περισσότερο η ήδη ηλεκτρονικά περιορισμένη τελική ταχύτητα του οχήματος, ωστόσο σε οχήματα του είδους με κυρίως αστικό προσανατολισμό όπου οι ταχύτητες κίνησης είναι χαμηλές, είναι ασφαλές να θεωρηθεί, ότι η βελτίωση της κατανάλωσης, των εκπομπών ρύπων αλλά και της αυτονομίας οφείλεται σε καθοριστικό βαθμό, από τον βαθμό που εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση.

5.5 Σύγκριση της ποσοτικής επίδρασης της αναγεννητικής πέδησης σε διάφορους τύπους οχημάτων

Τύποι οχημάτων	Κατανάλωση (±%)	Εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα (±%)	Αυτονομία οχήματος (±%)
Θερμικό όχημα με χρήση σφονδύλου	-25%	-25%	+33%
Θερμικό όχημα με χρήση υπερπυκνωτή	-7%	-7%	+7%
Υβριδικό όχημα με πνευματικούς συσσωρευτές	-25%	-25%	+35%
Υβριδικό όχημα με μπαταρίες ιόντων λιθίου	-16%	-16%	+19.5%
Ηλεκτροκίνητο όχημα με μπαταρίες ιόντων λιθίου	-22%	-22%	+24%

Πίνακας 5.8 Σύγκριση της ποσοτικής επίδρασης της αναγεννητικής πέδησης σε διάφορους τύπους οχημάτων

Από τα ποσοτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 5.8, παρατηρείται ότι το υβριδικό όχημα με τους πνευματικούς συσσωρευτές, καθώς και το αμιγώς θερμικό με την χρήση σφονδύλου ως συσσωρευτή κινητικής ενέργειας να παρουσιάζουν τις καλύτερες επιδόσεις κατανάλωσης, εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα και αυτονομίας σε σχέση με τις αντίστοιχες συμβατικές εκδόσεις χωρίς εφαρμογή αναγεννητικής πεδήσεως. Ακολουθούν τα υβριδικά οχήματα με μπαταρίες και τελευταίο στην κατάταξη το αμιγώς θερμικό όχημα με υπερπυκνωτή, το οποίο χρησιμοποιεί την ανακτηθείσα ενέργεια αποκλειστικά για περιφερειακές ηλεκτρικές ανάγκες και όχι για την πρόωση του οχήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Συμπεράσματα

Η εκστρατεία της παγκόσμιας αυτοκινητοβιομηχανίας για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπαγόμενης μείωσης των εκπεμπόμενων ρυπαντών είναι ένας από τους λόγους της ευρείας διαχύσης της αναγεννητικής πεδήσεως πλέον των ηλεκτροκίνητων και υβριδικών οχημάτων, ακόμα και σε αμιγώς θερμικά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η αναγεννητική πέδηση σε όλους τους τύπους των οχημάτων όπου εφαρμόζεται και παρουσιάστηκε η ποσοτική της επίδραση στα οχήματα. Η αναγεννητική πέδηση πέραν της βελτίωσης της κατανάλωσης, της μείωσης των ρύπων αλλά και της βελτίωσης της αυτονομίας των οχημάτων που λαμβάνει χώρα με άμεσο τρόπο, έχει και μια έμμεση επίδραση στα ανωτέρω μεγέθη. Αυτή βρίσκει εφαρμογή σε υβριδικά αλλά και αμιγώς θερμικά οχήματα όπου η ανακτηθείσα ενέργεια χρησιμοποιείται για την πρόωση του οχήματος. Με αυτόν τον τρόπο στα υβριδικά οχήματα μπορεί να αυξηθεί ο βαθμός υβριδοποίησης αφού οι κατασκευαστές έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν θερμικούς κινητήρες μικρότερων χωρητικότητων και ως εκ τούτου πιο φειδωλούς σε κατανάλωση και εκπομπές ρύπων, με την πρόσθετη ισχύ να παρέχεται είτε από κάποιον ηλεκτρικό κινητήρα είτε από κάποιον σφόνδυλο, ισχύς η οποία έχει ανακτηθεί από την πέδηση του οχήματος και ως εκ τούτου δεν έχει κανένα αρνητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σε ότι αφορά την άμεση επίδρασή της στα αμιγώς ηλεκτροκίνητα οχήματα, είναι κεφαλαιώδους σημασίας και αυτό γιατί οι τρέχουσες τεχνολογίες των μπαταριών δεν είναι σε επαρκές επίπεδο τεχνολογικής στάθμης, ώστε η αυτονομία ενός τέτοιου τύπου οχήματος να είναι συγκρίσιμη με κάποιο το οποίο διαθέτει θερμικό κινητήρα. Συνεπώς ο μόνος τρόπος που υπάρχει για να βελτιωθεί η αυτονομία των αμιγώς ηλεκτροκίνητων οχημάτων, είναι ανάλογα με τον βαθμό που εφαρμόζεται η αναγεννητική πέδηση, ο οποίος βαθμός αναγεννητικής πεδήσεως στα σύγχρονα ηλεκτροκίνητα οχήματα επιλέγεται από τον οδηγό. Η αναγεννητική πέδηση τέλος παρέχει και ένα παράπλευρο όφελος σε κάποιο υβριδικό όχημα και αυτό είναι η βελτίωση της ποιότητας όχησης διότι οι ηλεκτροκινητήρες εγγενώς όταν λειτουργούν παράγουν ελάχιστο θόρυβο, με αποτέλεσμα στις περιπτώσεις όπου λειτουργεί μόνο ο ηλεκτροκινητήρας του υβριδικού οχήματος και απεμπλέκεται ο θερμικός, η ποιότητα παραμονής εντός του αυτοκινήτου βελτιώνεται σημαντικά.

Βιβλιογραφία και πηγές

- Iqbal Husain/ Electric and hybrid vehicles design fundamentals
- John Miller/ Propulsion systems for hybrid vehicles
- C.M Jefferson, R.H Barnard / Hybrid vehicle propulsion
- C.C Chan, K.T Chau / Modern electric vehicle technology
- Piranavan Suntharalingam / Kinetic energy recovery and power management for hybrid electric vehicles
- Steven M. De Mers/ Mechanical and regenerative braking integration for a hybrid electric vehicle
- Par Mikaelsson / Fuel consumption optimization study for the SEP 6X6 diesel-electric powertrain
- Daniel Northcott/ Design, simulation and construction of a series hybrid electric vehicle
- DR. S J Clegg/ A review of regenerative braking systems
- Horace Lai and David Madas/ Test vehicle for regenerative braking emulation
- Selim Oleksowicz, Keith Burnham/ Assessment of hybrid vehicle braking technologies
- Sendun Kuruppu / Implementation and performance evaluation of a regenerative braking system coupled to ultracapacitors for a brushless DC hub motor driven electric tricycle
- Jeongwoo Lee/ Rotating inertia impact on propulsion and regenerative braking for electric motor driven vehicles
- Junzhi Zhang, Xin Lu, Junliang Xue, Bos Li/ Regenerative braking system for series hybrid electric city bus
- Arno Mathoy/ The future of hybrids
- K.T. Chau, Y.S. Wong/ Overview of power management in hybrid electric vehicles
- William Price/ Regenerative braking on the Lotus renewable energy vehicle
- Stephen McCluer, Jean-Francois Christin/ Comparing data center batteries, flywheels and ultracapacitors
- Alberto A. Boretti/ Improvements of truck fuel economy using mechanical regenerative braking
- Peter CLarke, Tariq Muneer, Kevin Cullinane/ Cutting vehicle emissions with regenerative braking
- Saharat Chanthanumataporn, Sarawut Lerspalungsanti and Monsak Pimsarn / Design of regenerative braking system for an electric vehicle (EV) modified from used car
- Guodong Yin and Xianjian Jin/ Cooperative control of regenerative braking and antilock braking for a hybrid electric vehicle
- Δρ.-Μηχ Δ. Κουλοχέρης / Ηλεκτροκίνητα οχήματα

- Λουκία Χρυσούλα/ Προβλεπτικός έλεγχος βάσει μοντέλου, εφαρμοσμένος σε υβριδικό ηλεκτρικό όχημα μεικτής συνδεσμολογίας
- Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος/ Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ
- Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος/ Ασκήσεις Μ.Ε.Κ
- <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/co2-electricity-g-per-kwh>
- <http://www.ecoscore.be/en/how-calculate-co2-emission-level-fuel-consumption>
- http://www.engineeringtoolbox.com/flywheel-energy-d_945.html
- <http://www.solar-facts.com/inverters/inverter-efficiency.php>
- <http://www.courtesytire.com/v4/brakes.html>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain#Power-split_or_series-parallel_hybrid
- http://en.wikipedia.org/wiki/Regenerative_braking
- http://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle
- http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density
- <http://en.wikipedia.org/wiki/FTP-75>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Li_ion
- <http://en.wikipedia.org/wiki/NiMH>
- http://www.leapcad.com/Transportation/GM_Volt_Simulation.pdf
- <http://www.completecoach.com/services/hybrid-propulsion-systems>
- <http://www.mazda.com>
- <http://www.toyota.com>
- <http://www.porsche.com>
- <http://www.honda.com>
- <http://www.mercedes-benz.com>
- <http://www.bmw.com>
- <http://www.volvo.com>
- <http://www.psa-peugeot-citroen.com>
- <http://www.youtube.com/watch?v=jJFxrzbWE6c>
- <http://www.youtube.com/watch?v=IY1rMQjkd8Q&app=desktop>
- <http://www.youtube.com/watch?v=KTdoOAXE0zM>